



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

**PLANEACIÓN, DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN
PROTOTIPO PARA LA CONVERSIÓN DE
DESECHOS ORGÁNICOS A ENERGÍA TÉRMICA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ENERGÍA - ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

P R E S E N T A :

SERGIO JUÁREZ HERNÁNDEZ

TUTORA:
DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

2012

JURADO ASIGNADO:

P r e s i d e n t e : Dra. Claudia Sheinbaum Pardo
S e c r e t a r i o : Dra. Alejandra Castro González
V o c a l : Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo
1^{er} S u p l e n t e : M.I. Constantino Gutiérrez Palacios
2^{do} S u p l e n t e : M.I. Carlos Villanueva Moreno

Lugar donde se realizó la Tesis: *Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México D.F.*

TUTORA DE TESIS:

Dra. Alejandra Castro González

FIRMA

PALABRAS DE GRATITUD

Agradezco la asistencia permanente y sustantiva que hasta el momento me han proporcionado **los integrantes de mi familia**, especialmente a mi madre, padre, hermana y sobrinas, y que ha sido y sigue siendo fundamental para mantener condiciones propicias para extender mi permanencia en el sistema escolar.

Es menester agradecer al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por la aportación económica y beneficios sociales que me concedió durante mis estudios de Maestría.

Asimismo, se agradece la ayuda recibida, en distintas formas y momentos, de parte del **Goethe-Institut** y del **Museo Universitario Arte Contemporáneo (UNAM)**.

El apoyo otorgado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico a través del **Proyecto PAPIME** número **100810**, merece igualmente un agradecimiento.

Considero justo reconocer a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, en particular a su Facultad de Ingeniería, por poner al alcance de sus estudiantes los recursos, infraestructura y servicios, así como un ambiente favorable para el estudio, la convivencia y la recreación, que posibilitan una formación de muy buen nivel en distintos ámbitos además del meramente académico. De igual modo, a los profesores, por los conocimientos, recomendaciones y enseñanzas ofrecidas, y a los colegas, por sus diversidad de enfoques y camaradería.

A **los miembros del Jurado**, sirva esta mención como muestra de gratitud por su disposición a fungir como tales en el proceso de evaluación del presente trabajo.



Índice de Figuras, *ix*

Índice de Tablas, *xi*

Resumen, *xiii*

Introducción, *xv*

Objetivo, *xxi*

C a p í t u l o I - Antecedentes, 1

I.1 - Residuos sólidos urbanos. I.2 - Generación de residuos sólidos urbanos. I.2.1 - Panorama mundial. I.2.2 - Panorama nacional. **I.3 - Afectaciones ambientales asociadas a los residuos sólidos urbanos.** I.3.1 - Efectos sobre los cuerpos de agua. I.3.2 - Efectos sobre el suelo. I.3.3 - Efectos sobre la calidad del aire y la composición de la atmósfera. **I.4 - Manejo integral de los residuos sólidos urbanos.** I.4.1 - Reducción en la fuente. I.4.2 - Reutilización y reciclaje. I.4.3 - Tratamiento. *I.4.3.1 - Tratamiento mecánico. I.4.3.2 - Tratamiento térmico. I.4.3.3 - Tratamiento biológico. I.4.3.4 - Disposición final.* I.4.4 - Panorama internacional del manejo de los residuos sólidos urbanos. I.4.5 - Panorama nacional del manejo de los residuos sólidos urbanos.

C a p í t u l o II - Fundamentos I: Contexto energético mundial. Participación de las fuentes renovables. El caso particular de la bioenergía, 39

II.1 - Panoramas energéticos mundial y nacional. II.2 - Fuente renovables de energía. II.2.1 - Características distintivas de las fuentes renovables de energía. II.2.2 - Nivel actual de participación de las fuentes renovables de energía. **II.3 - Energía de la biomasa.** II.3.1 - Recursos de la biomasa para la obtención de energía. II.3.2 - Principales alternativas tecnológicas. *II.3.2.1 - Procesos termoquímicos. II.3.2.2 - Procesos químicos. II.3.2.3 - Procesos bioquímicos.* II.3.3 - Combustibles derivados de la biomasa. II.3.4 - Implicaciones de la obtención y utilización de la energía de la biomasa.

C a p í t u l o III - Fundamentos II: Biomasa residual para aprovechamiento energético. Residuos sólidos urbanos y degradación anaerobia. Tecnologías, 71

III.1 - Biomasa residual. III.1.1 - Biomasa residual forestal. III.1.2 - Biomasa residual agrícola. III.1.3 - Biomasa residual industrial. III.1.4 - Biomasa residual pecuaria. III.1.5 - Aguas residuales urbanas. III.1.6 - Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. **III.2 - Biomasa residual húmeda. III.3 - Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y sus alternativas de tratamiento. III.4 - Degradación anaerobia.** III.4.1 - Descripción del proceso. III.4.2 - Tipos de reactores anaerobios. III.4.3 - Pre-tratamiento de la biomasa. III.4.4 - Condiciones del entorno y parámetros de control del proceso. *III.4.4.1 - Inóculo inicial. III.4.4.2 - Entorno anaerobio. III.4.4.3 - Grado de mezclado. III.4.4.4 - Temperatura. III.4.4.5 - El pH. III.4.4.6 - Alcalinidad. III.4.4.7 - Ácidos grasos volátiles. III.4.4.8 - Nutrientes. III.4.4.9 - Presencia de sustancias tóxicas.* III.4.5 - Post-

tratamiento de la biomasa digerida. III.4.6 – Tratamiento del biogás. III.4.6.1 – *Remoción del vapor de agua.* III.4.6.2 – *Remoción del sulfuro de hidrógeno.* III.4.6.3 – *Remoción del dióxido de carbono.* III.4.7 – Indicadores de desbalance del proceso. III.4.8 – Ventajas e inconvenientes. III.4.9 – Tecnologías para la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

Capítulo IV – Planeación y diseño de la planta prototipo para la generación de biogás. Metodología y resultados, 107

IV.1 – Procedencia de la biomasa. IV.1.1- Generación estimada. IV.1.2 – Características fisicoquímicas relevantes. IV.1.3 – Preparación y características de la alimentación del sistema anaerobio. **IV.2 – Consideraciones para el diseño del sistema anaerobio.** IV.2.1 – Temperatura de operación. IV.2.2 – Reactor anaerobio. IV.2.2.1 – *Criterio del tiempo de residencia hidráulico.* IV.2.2.2 – *Criterio de la velocidad de carga orgánica.* IV.2.3 – Producción de biogás. IV.2.3.1 – *Estimación de la producción de metano a partir de la composición química del residuo.* IV.2.3.2 – *Estimación de la producción de metano a partir de la tasa de producción específica.* IV.2.3.3 – *Composición del biogás.* IV.2.4 – Remoción de materia orgánica y producción de lodos digeridos. **IV.3 – Acondicionamiento del biogás.** IV.3.1 – Remoción del sulfuro de hidrógeno. IV.3.2 – Remoción del vapor de agua. **IV.4 – Sistema de conducción y almacenamiento del biogás.** IV.4.1 – Tuberías de canalización. IV.4.2 – Elementos accesorios: Válvula de alivio. IV.4.3 – Elementos accesorios: Trampa de llama. IV.4.4 – Almacenamiento del biogás. **IV.5 – Aprovechamiento energético del biogás.** IV.5.1 – Estimación de la potencia térmica de los quemadores. IV.5.2 – Consideraciones para el empleo del biogás en el equipo de combustión. **IV.6 – Generalidades en torno de la seguridad del uso de biogás como combustible.** **IV.7 – Secuencia completa del proceso propuesto.** IV.7.1 – Acopio, traslado y pre-tratamiento de los residuos para la obtención del sustrato. IV.7.2 – Alimentación al reactor anaerobio R-I. IV.7.3 – Alimentación al reactor anaerobio R-II. IV.7.4 – Estanques de sedimentación. IV.7.5 – Limpieza de las líneas de conducción del sustrato. IV.7.6 – Conducción, limpieza, almacenamiento y suministro del biogás. **IV.8 – Balance de energía del proceso.** **IV.9 – Evaluación económica.** **IV.10 – Impacto ambiental.** **IV.11 – Indicadores de sustentabilidad energética.** IV.11.1 – Indicadores para la dimensión económica. IV.11.2 – Indicadores para la dimensión social. IV.11.3 – Indicadores para la dimensión ambiental. **IV.12 – Comparación de los resultados.**

Capítulo V – Instalación de la planta prototipo para la generación de biogás. Resultados, 191

V.1 – Obra civil. V.2 – Instalación de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio. V.3 – Instalación de los componentes para el manejo del biogás. V.4 – Instalación de los componentes para el aprovisionamiento del biogás.

Capítulo VI – Conclusiones, 209

Referencias, 215

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 - Generación per cápita anual de residuos sólidos urbanos en países seleccionados	6
Figura I.2 - Generación de residuos sólidos urbanos e ingreso per cápita en países seleccionados	8
Figura I.3 - Evolución de la generación de residuos sólidos urbanos en México	10
Figura I.4 - Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad	12
Figura I.5 - Generación de residuos sólidos urbanos y PIB por entidad federativa	14
Figura I.6 - Evoluciones demográfica y de la generación total de residuos sólidos urbanos en México	14
Figura I.7 - Composición de los residuos sólidos urbanos generados en México	15
Figura I.8 - Estrategias para el manejo integral y sustentable de los residuos sólidos	22
Figura I.9 - Jerarquía del manejo de los residuos sólidos urbanos	23
Figura I.10 - Esquema simplificado del tratamiento mecánico de los residuos sólidos urbanos	25
Figura I.11 - Esquema simplificado del proceso de incineración de los residuos sólidos urbanos	26
Figura I.12 - Esquema simplificado de la gasificación de los residuos sólidos urbanos	27
Figura I.13 - Esquema simplificado de la pirólisis de residuos sólidos urbanos	28
Figura I.14 - Esquema simplificado del proceso de compostaje de residuos orgánicos	30
Figura I.15 - Esquema simplificado del proceso de degradación anaerobia de residuos orgánicos	31
Figura I.16 - Estructura de los esquemas de manejo integral de los residuos sólidos urbanos en países seleccionados	34
Figura I.17 - Panorama del manejo de los residuos sólidos urbanos en México en el 2009	36
Figura I.18 - Evolución de la capacidad de disposición y de la generación de residuos sólidos urbanos en México	36
Figura II.1 - Estructura del aprovisionamiento de energía primaria en el mundo y en México	43
Figura II.2 - Participación de las fuentes renovables en el aprovisionamiento mundial de energía primaria y contribución de cada fuente en el 2008	56
Figura II.3 - Contribución de las fuentes renovables de energía en distintos rubros energéticos	57
Figura II.4 - Participación de las fuentes renovables en la producción nacional de energía primaria y contribución de cada fuente	57
Figura II.5 - Participación relativa de las variedades de biomasa en la contribución de ésta a la energía primaria mundial y detalle de la estructura de los subproductos agropecuarios	60
Figura II.6 - Comparativa entre el potencial estimado y el aprovechamiento actual de la biomasa en México y potenciales calculados correspondientes a los distintos tipos de recursos	62
Figura II.7 - Usos finales de la energía obtenida de la biomasa en México	62
Figura II.8 - Rutas predominantes para la conversión energética de la biomasa	65
Figura III.1 - Biomasa apta para la degradación anaerobia y aprovechamiento de los subproductos	83
Figura III.2 - Clasificación de las tecnologías en reactores anaerobios	86
Figura IV.1 - Actividades comprendidas en las distintas fases del desarrollo de la planta de biogás	108
Figura IV.2 - Vistas del restaurante seleccionado	109
Figura IV.3 - Comportamiento de la generación de residuos sólidos orgánicos en el caso de estudio	110
Figura IV.4 - Selección de muestras representativas para la ejecución de pruebas	111
Figura IV.5 - Diferentes vistas preliminares del reactor R-I	120
Figura IV.6 - Diferentes vistas preliminares del reactor R-II	121

Figura IV.7 -	Balance de masas del proceso anaerobio	126
Figura IV.8 -	Diferentes arreglos de trampas de condensación para remover vapor de agua del biogás	133
Figura IV.9 -	Diámetro de la tubería en función del gasto de biogás y la distancia al punto de consumo	135
Figura IV.10 -	Válvulas de alivio para unidades de producción de biogás a pequeña y mediana escala	137
Figura IV.11 -	Componentes para el armado de una trampa de llama	138
Figura IV.12 -	Diferentes vistas preliminares del reservorio de biogás	143
Figura IV.13 -	Funcionamiento de un medidor de desplazamiento positivo tipo diafragma	144
Figura IV.14 -	Aplicaciones energéticas del biogás	145
Figura IV.15 -	Diferentes vistas de la estufa exterior del restaurante	148
Figura IV.16 -	Aspecto de los quemadores instalados en la estufa exterior del restaurante	148
Figura IV.17 -	Dimensiones del quemador instalado en la estufa exterior del restaurante	148
Figura IV.18 -	Diagramas simplificados del quemador e identificación de las principales variables	150
Figura IV.19 -	Adaptaciones sugeridas para el suministro del biogás e incorporación de un juego adicional de quemadores	156
Figura IV.20 -	Secuencia del tren de tratamiento anaerobio aplicado a la planta de biogás	159
Figura IV.21 -	Secuencia y componentes de los procesos de degradación anaerobia y manejo de lodos digeridos	165
Figura IV.22 -	Secuencia y componentes del sistema de conducción, limpieza, almacenamiento y suministro del biogás	166
Figura IV.23 -	Análisis de sensibilidad de la relación B/C	172
Figura IV.24 -	Análisis de sensibilidad del costo unitario nivelado por GJ del biogás	173
Figura IV.25 -	Comparativa de los indicadores de sustentabilidad energética	184
Figura V.1 -	Dimensiones del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento	192
Figura V.2 -	Vista isométrica del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento	193
Figura V.3 -	Geometría y ubicación de los estanques de sedimentación y de la base para la bomba	193
Figura V.4 -	Levantamiento de la infraestructura de la planta generadora de biogás	195
Figura V.5 -	Principales componentes del sistema de tratamiento anaerobio	197
Figura V.6 -	Ubicación final de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio	198
Figura V.7 -	Dirección de las pendientes en la colocación de la tubería de conducción del biogás	199
Figura V.8 -	Componentes del sistema para el manejo del biogás (I)	200
Figura V.9 -	Componentes del sistema para el manejo del biogás (II)	201
Figura V.10 -	Arreglo final de los componentes del sistema para el manejo del biogás	202
Figura V.11 -	Componentes del sistema de suministro de biogás al equipo de combustión	203
Figura V.12 -	Ubicación relativa de los componentes para el manejo del biogás y del equipo de combustión	203
Figura V.13 -	Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (I)	204
Figura V.14 -	Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (II)	205
Figura V.15 -	Vista frontal del habitáculo y de algunos otros componentes de la planta de biogás	206
Figura V.16 -	Vista superior de planta de biogás donde se distinguen los sistemas para el tratamiento anaerobio de los residuos, para el manejo del biogás y para su aprovechamiento energético	207

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1	- Fracciones identificables en los residuos sólidos urbanos	3
Tabla I.2	- Generación de residuos sólidos urbanos en países seleccionados	5
Tabla I.3	- Generación de residuos sólidos urbanos e ingreso nacional bruto en países seleccionados	7
Tabla I.4	- Composición de los residuos sólidos urbanos en ciudades seleccionadas	9
Tabla I.5	- Generaciones per cápita diaria y anual de residuos sólidos urbanos por zona geográfica	11
Tabla I.6	- Cambios en la composición de los residuos sólidos urbanos generados en México	16
Tabla I.7	- Fuentes y principales atributos de los gases de efecto invernadero antropógenos	21
Tabla I.8	- Porcentaje de los subproductos de la pirólisis en función de la temperatura de operación	29
Tabla I.9	- Relación C/N de algunos componentes presentes en los residuos sólidos urbanos	30
Tabla I.10	- Comparativa de emisiones de compuestos volátiles de los tratamientos aerobio y anaerobio	31
Tabla I.11	- Porcentaje de residuos sólidos urbanos incinerados en países seleccionados	35
Tabla II.1	- Descripción, historia y variantes de los recursos energéticos renovables	47
Tabla II.2	- Factores determinantes, sitios idóneos, componentes y aspectos técnicos de los recursos energéticos renovables	49
Tabla II.3	- Aspectos económicos, participantes en la industria y vida útil de las tecnologías de los recursos energéticos renovables	51
Tabla II.4	- Aplicaciones, principales ventajas e inconvenientes de los recursos energéticos renovables	52
Tabla II.5	- Ventajas del uso de fuentes renovables de energía	54
Tabla II.6	- Fuentes de biomasa aprovechables para fines energéticos	59
Tabla II.7	- Estatus global y local de las principales tecnologías de conversión energética de la biomasa	68
Tabla II.8	- Variantes de los combustibles derivados de la biomasa	69
Tabla III.1	- Variantes y tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa residual	73
Tabla III.2	- Resumen de fuentes principales de biomasa	78
Tabla III.3	- Características relevantes de algunas clases de biomasa residual húmeda	79
Tabla III.4	- Opciones para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	82
Tabla III.5	- Clasificación y características de los microorganismos del proceso de degradación anaerobia	85
Tabla III.6	- Variantes típicas de reactores anaerobios para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	89
Tabla III.7	- Opciones de pre-tratamiento para biomasa sólida	91
Tabla III.8	- Valores de referencia de parámetros relativos a la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	97
Tabla III.9	- Opciones para el post-tratamiento de los efluentes de la digestión	98
Tabla III.10	- Recomendaciones para remediar una situación de desbalance en el proceso anaerobio	103
Tabla III.11	- Parámetros de operación relevantes de las tecnologías comerciales para el tratamiento anaerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	106
Tabla IV.1	- Valores obtenidos en la caracterización de la biomasa	112
Tabla IV.2	- Rasgos distintivos de la modalidad de digestión húmeda	113
Tabla IV.3	- Concentración de sólidos totales en mezclas con distintas proporciones residuos:agua	113
Tabla IV.4	- Preparación y características de la alimentación del sistema anaerobio	114

Tabla IV.5 -	Parámetros operativos de plantas que emplean la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	<i>118</i>
Tabla IV.6 -	Especificaciones del digestor y condiciones de operación de la planta piloto de la Universidad de Venecia, Italia	<i>119</i>
Tabla IV.7 -	Condiciones y parámetros de operación preliminares del sistema anaerobio	<i>119</i>
Tabla IV.8 -	Composición elemental típica de los residuos de comida	<i>123</i>
Tabla IV.9 -	Producción máxima teórica de metano en la descomposición anaerobia de los residuos	<i>124</i>
Tabla IV.10 -	Comparativa de las características de la alimentación y los lodos digeridos	<i>126</i>
Tabla IV.11 -	Síntesis de parámetros de operación del proceso anaerobio propuesto	<i>129</i>
Tabla IV.12 -	Particularidades del proceso propuesto para la remoción del H ₂ S	<i>132</i>
Tabla IV.13 -	Particularidades del proceso propuesto para la remoción del vapor de H ₂ O	<i>133</i>
Tabla IV.14 -	Opciones de tuberías para la conducción del biogás	<i>134</i>
Tabla IV.15 -	Descripción y atributos principales de las modalidades de almacenamiento de biogás	<i>140</i>
Tabla IV.16 -	Materiales utilizados para la fabricación de reservorios de biogás	<i>142</i>
Tabla IV.17 -	Propiedades físicas, químicas y combustibles del biogás	<i>147</i>
Tabla IV.18 -	Consumos aproximados de biogás en diversos equipos con distintas aplicaciones	<i>146</i>
Tabla IV.19 -	Atributos técnicos y operativos de la planta de biogás	<i>168</i>
Tabla IV.20 -	Desglose de la inversión inicial para la conformación de la planta de biogás	<i>169</i>
Tabla IV.21 -	Datos de entrada para la evaluación económica de la planta de biogás	<i>170</i>
Tabla IV.22 -	Indicadores de rentabilidad económica calculados para la planta de biogás	<i>171</i>
Tabla IV.23 -	Principales atributos técnicos, económicos y ambientales de la planta de biogás	<i>176</i>
Tabla IV.24 -	Resumen de valores normalizados de los indicadores de sustentabilidad energética	<i>183</i>
Tabla IV.25 -	Comparativa de parámetros y rendimiento de producción de biogás de la planta prototipo con tecnologías comerciales	<i>186</i>

El presente trabajo expone resultados sobre la planeación, el diseño y la instalación de una planta a nivel prototipo para la obtención de biogás mediante la degradación anaerobia de los residuos sólidos orgánicos que se generan en un restaurante ubicado en Ciudad Universitaria, *campus* central de la UNAM. Durante 2 meses se registraron las cantidades diarias de tales desechos, obteniendo un promedio de 40.46 kg/día, exhibiendo las siguientes características fisicoquímicas: 22.96% ST, 94.21% STV y 5.79% STF, pH ácido y densidad de 715.41 kg/m³. Se optó por la modalidad de digestión húmeda, para lo cual se reduce la concentración de sólidos de los residuos con la adición de agua en la proporción 1:1. De los 40.46 kg/día se obtienen 69.16 L/día de sustrato con 13.42% ST. El sistema anaerobio se diseñó considerando el criterio de la velocidad de carga orgánica a una temperatura de 20 °C. La velocidad de carga orgánica utilizada fue de 1.94 kgSTV/m³-día, que implica un volumen de digestión de 4.51 m³ y un TRH de 65 días. Se propuso un sistema de digestión de 2 etapas. El primer digestor es del tipo semicontinuo de mezcla completa (1.25 m³), y el segundo, semicontinuo convencional con recirculación externa (5.0 m³). Para los lodos digeridos se incluyeron dos estanques de sedimentación (1.20 m³). Se prevé alcanzar un porcentaje de remoción de materia orgánica de 63% en términos de STV. El volumen esperado de biogás se estimó empleando una tasa de producción específica de CH₄ de 0.39 m³CH₄/kgSTV_{adicionado}, y un contenido de éste de 56%. El resultado es de 6.10 m³ de biogás (3.41 m³CH₄) para los 40.46 kg/día de residuos. Con los 40.46 kg/día y la planta operando 260 días al año, la generación anual de biogás se anticipa alcance 1,586 m³/año, que se traducen en 31.7 GJ/año. El acondicionamiento del biogás se enfoca en la remoción H₂S y del vapor de agua. Para la eliminación del H₂S se propuso el método de adsorción seca en Fe₂O₃, y para el vapor de agua, trampas de condensación. Se consideró un reservorio a baja presión de 2.0 m³ junto con aditamentos complementarios. Se decidió aprovechar el biogás por la vía de combustión directa, aportando energía para la cocción de alimentos dentro del mismo restaurante. Se seleccionó un equipo de combustión del restaurante, indicando ajustes en la presión de alimentación y en los diámetros del inyector y de los puertos de combustión para que funcione con biogás. Los 6.10 m³ biogás/día permitirán la operación continua de los tres quemadores (1.5 kW_{c/u}) del equipo de combustión por un lapso apenas superior a 4.5 horas. La contribución del biogás a la energía para cocción de alimentos que consume el restaurante alcanza un 6%. El balance energético establece un saldo a favor en términos de la energía producida en forma de biogás, 31.7 GJ/año, y la consumida por la planta de biogás, 9.7 GJ/año. La inversión inicial para la planta de biogás fue \$129,063. Se prevén costos fijos de \$1,000 anuales junto a \$5,000 cada lustro y costos variables de \$4.06/m³ biogás. Los ingresos provienen de la disminución en el consumo de gas LP. Su cuantificación se hizo en base a un precio del gas LP de \$11.53 por kg. Partiendo de una TREMA de 6%, un horizonte de 20 años y un aumento en el precio del gas LP de 15% anual, la propuesta resulta económicamente rentable. El costo unitario nivelado del biogás es \$16.48/m³. La tasa de incremento anual del precio del gas LP, seguida del precio de éste mismo, son las dos variables que más influyen en la rentabilidad económica de la planta. Los componentes para la degradación anaerobia controlada de los residuos sólidos orgánicos se instalaron en la parte posterior del restaurante. Los equipos para la limpieza y el almacenamiento del biogás, así como los dispositivos de seguridad, se colocaron en la azotea del restaurante. El suministro de biogás al equipo de combustión es independiente al del gas LP, sugiriéndose emplear también un juego adicional de quemadores. Con respecto al impacto ambiental, se desvían de disposición final más 10.5 t de residuos sólidos orgánicos por año. Se impide que el CH₄ generado por la descomposición anaerobia de los desechos se deposite directamente en la atmósfera. A ello hay que añadir que el biogás reemplaza, al menos de manera parcial, a un energético de origen fósil, con ello se evita la producción y liberación de gases de efecto invernadero. Las emisiones evitadas de estos gases ascienden a 14.46 t de CO₂-eq anuales.

The present work shows the results obtained in the planning, designing and installing phases of a prototype plant for biogas production via anaerobic digestion of organic solid wastes generated in a restaurant located at Ciudad Universitaria, central *campus* of the UNAM. During 2 months daily quantities of such wastes were recorded, reporting a mean value of 40.46 kg/day with the following physicochemical characteristics: 22.96% TS, 94.21% TVS and 5.79% TFS, pH acid and density of 715.41 kg/m³. Wet anaerobic digestion was chosen therefore, solid concentration in wastes is reduced by adding water in 1:1 proportion. As a result, 69.16 L/day of substrate with 13.42% TS are produced using 40.46 kg/day of organic wastes. The organic loading rate criterion was used for designing the anaerobic system assuming a temperature of 20° C. An organic loading rate of 1.94 kgTVS/m³-day was utilized leading to a digesting volume of 4.51 m³ and a HRT of 65 days. A digestion system of two stages was proposed. The first digester is one of the type semicontinuous completely stirred (1.25 m³), the second is a semi-continuous conventional digester with external recirculation (5.0 m³). For managing of digested slurry two sedimentation tanks were included (1.20 m³). It is expected to achieve an organic matter removal of 63% in terms of TVS. Expected volume of biogas was estimated using a specific methane production rate of 0.39 m³CH₄/kgTVS_{added} along with 56% of methane concentration in biogas. Consequently, 6.10 m³ of biogas (3.41 m³ of CH₄) are produced through 40.46 kg/day of wastes. Assuming 40.46 kg/day of residues and the plant operating 260 days per year, annual biogas production is anticipated to reach 1,586 m³/year which means 31.7 GJ/year. Biogas preparation is focused on H₂S and water vapor removal. For H₂S removal it was proposed dry adsorption on Fe₂O₃ and for water vapor, water traps. A low-pressure biogas reservoir of 2.0 m³ and other devices were also considered. It was decided to use biogas for thermal energy provision via its direct combustion to supply energy for cooking in the restaurant. A gas combustion equipment of the restaurant was selected, pointing out adjustments related to feeding pressure and diameters of the injector and burning ports in order to make it works with biogas. The 6.10 m³_{biogas}/day will allow continuous operation of the three burners (1.5 kW; each one) of combustion equipment for around 4.5 hours. Biogas contribution to energy consumption for cooking in the restaurant accounts for 6% of the total. The energy balance gives positive results in terms of the energy that is produced in the form of biogas, 31.7 GJ/year, and the energy that is consumed by the biogas plant, 9.7 GJ/year. The initial investment required for the biogas plant was \$129,063. Fixed costs of \$1,000 per year and another of \$5,000 each five years and variable cost of \$4.06/m³_{biogas}, were anticipated. Incomes come out by diminishing the LP gas consumption and were quantified considering a LP gas price of \$11.53 per kg. With a minimum accepted rate of return of 6%, a lifespan of 20 years and a 15% of annual rate of increase in the price of LP gas, biogas plant is economically profitable. The levelized unit cost of biogas is \$16.48/m³. The annual growth rate of LP gas price and the price of LP gas both are the variables that most influence biogas plant economic profitability. Components to carry out controlled anaerobic digestion of the organic solid wastes were installed on the backside of the restaurant. Equipment for biogas cleaning and storage as well as safety devices were all installed on the roof of the restaurant. Biogas supply to gas combustion equipment uses a different pipe of that for LP gas provision; it is also proposed to utilize an additional set of burners. Regarding environmental impact it is important to remark that thank to the prototype biogas plant, annually more than 10.5 t of organic solid residues avoid final deposition. Additionally, CH₄ formed during anaerobic degradation of wastes does not to reach the Earth atmosphere. What is more, biogas substitutes, at least partially, a fossil fuel hence preventing the production and emission of greenhouse gases. Avoided emissions of such gases are expected to account for 14.45 t of CO₂-eq by year.

Elementos de sobra hay para aseverar que la humanidad encara múltiples y variadas problemáticas en distintos ámbitos. En el terreno ambiental, por ejemplo, se padece en la actualidad una crisis severa que se recrudece ante la renuencia o indiferencia de quienes representan los intereses que verdaderamente rigen al mundo, por encima de gobiernos y sociedades. Esta crisis se nutre de un sinnúmero de problemáticas que surgen y se magnifican en diferentes frentes. Una de estas problemáticas es la relacionada con la producción y manejo de la infinidad de desperdicios, en especial los de tipo sólido, que resultan del funcionamiento cotidiano de las sociedades modernas.

El problema asociado a la generación de residuos sólidos se resiente con particular gravedad en los asentamientos urbanos. El consumismo exacerbado de los habitantes de las ciudades, conduce inevitablemente al incremento constante del caudal diario de desechos sólidos. Para ejemplificar lo anterior baste decir que en el caso del Distrito Federal se pasó de una generación per cápita de 370 g de residuos sólidos por día en el año de 1950, a cerca de 1,400 g en años recientes (INE-SEMARNAT, 2001a). Esto es un incremento de casi cuatro veces en la generación de desechos por habitante en el transcurso de sólo seis décadas. La situación se torna más grave al considerar el hecho de que por años se ha privilegiado la opción de disposición final, sin distinción alguna de la naturaleza diversa de los desechos. Por diversos motivos, se pasa por alto que las características particulares de las distintas clases de desechos suponen un manejo y procesamiento diferenciados. Al verter sin restricción alguna toda esta masa de desperdicios en los sitios de disposición final, éstos se saturan en corto tiempo. Frente a una generación de residuos sólidos que va en aumento, ese patrón de confinamiento conducirá inevitablemente a la rápida saturación de los sitios de disposición final. Prueba de ello es lo sucedido con el relleno sanitario del Bordo Poniente, localizado en la zona federal del municipio de Nezahualcóyotl, estado de México. El Bordo Poniente, área reservada para el vertido de residuos sólidos desde finales de 1992, llegó a recibir diariamente alrededor de 13 mil toneladas de desechos, en su mayoría procedentes del Distrito Federal. En varias ocasiones se postergó su clausura definitiva, pero ésta fue ineludible ante el rebase de la capacidad límite del relleno que hacía temer serias repercusiones ambientales y sociales, a decir de las autoridades federales en la materia. Por ello, desde el 31 de diciembre de 2011 cesó terminantemente el envío de desperdicios al relleno.

La carencia de espacios bien acondicionados para la disposición segura de los residuos sólidos urbanos, amenaza con incrementar el vertido de estos desperdicios en tiraderos a cielo abierto y sitios clandestinos. En esas circunstancias, las afectaciones ambientales y a la salud pública vinculadas a los residuos sólidos se intensifican. Los impactos negativos producidos por la inadecuada disposición de los desechos sólidos, se aprecian en cuerpos de agua, suelos, calidad del aire y composición de la atmósfera: Los residuos de tipo orgánico son responsables de la emisión de metano (CH_4), un gas de efecto invernadero (GEI).

La presencia en la atmósfera de la Tierra de los GEI evita que toda la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, se escape en dirección al espacio exterior. Este fenómeno, conocido como efecto invernadero, mantiene la temperatura promedio del planeta, gracias a lo cual es posible el mantenimiento de la vida en la Tierra. No obstante, la actividad humana está propiciando que las concentraciones de GEI en la atmósfera vayan en aumento. En consecuencia, la temperatura promedio mundial asciende de manera sostenida alterándose el régimen climático del planeta. Las secuelas de esta problemática se padecen a escala global, con impactos severos en los ecosistemas naturales y en los sistemas humanos. A este respecto, conviene subrayar que son precisamente los GEI producto de actividades humanas los mayores responsables de este panorama. Los GEI antropógenicos a que se hace

referencia son principalmente el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y los halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro o bromo) (IPCC, 2007). Entre las actividades humanas que arrojan cantidades significativas de GEI a la atmósfera está la generación y disposición de residuos materiales. De acuerdo con las cifras más recientes, los GEI del rubro *Desechos y aguas de desecho* contribuyeron con el 2.8% de las emisiones antropógenas totales mundiales, que en 2004 sumaron 49.0 Gt de CO₂-eq (IPCC, 2007).

La quema de combustibles fósiles es la fuente más importante de emisiones antropógenas de GEI. El CO₂ generado por la quema de estos energéticos aportó el 56.6% de las emisiones totales de GEI asociadas a actividades humanas en 2004 (IPCC, 2007). Lo anterior es consecuencia inequívoca de la relevancia que los combustibles fósiles mantienen desde hace décadas en el aprovisionamiento de energía. A nivel mundial, el petróleo, el carbón y el gas natural juntos alcanzan una participación equivalente a más del 80% en la oferta total de energía primaria (IEA, 2011a). En el caso de México, esos tres energéticos contribuyen con más del 90% de la producción nacional de energía primaria (SENER, 2009). El sostenimiento de un sistema energético altamente dependiente de recursos de origen fósil es inviable por varias razones. Una de ellas consiste en que se trata de recursos de existencias limitadas, cuyos procesos de formación demoraron millones de años. Por tanto, su utilización conduce invariablemente a su agotamiento. De manera que de mantenerse o incrementarse el nivel actual de demanda de dichos energéticos, sus precios tenderán a elevarse restringiendo así el acceso a ellos por parte de la población (IEA, 2010a). A lo anterior se suman preocupaciones de índole ambiental. A la agudización del efecto invernadero se añaden la contaminación del aire, especialmente notoria en las ciudades, la acidificación de suelos, lagos y mares, los impactos sobre flora y fauna, entre otras tantas afectaciones (Viqueira, 2007).

Para aminorar el uso de combustibles fósiles y con ello las emisiones de GEI y de sustancias contaminantes, se hace hincapié en recurrir progresivamente a las fuentes renovables de energía. Este tipo de fuentes de energía se asocian a procesos o ciclos propios de la naturaleza, de ahí que se consideren recursos virtualmente inagotables. Si bien de momento las tecnologías para su aprovechamiento presentan, en promedio, eficiencias bajas y requerimientos altos de inversión, se prevé una mejora sustantiva en ambos rubros en el mediano y largo plazos (IEA, 2010b). Cabe apuntar que las fuentes renovables de energía representan la oportunidad de satisfacer las necesidades, cuando menos energéticas, de los cerca de 3 mil millones de personas que no tienen acceso a energéticos modernos a precios asequibles (UNIDO, 2011). Dentro de estas opciones de fuentes renovables de energía, se encuentra la biomasa que engloba a todas las variantes de materia orgánica no fósil procedente de organismos vegetales o animales.

La biomasa para fines energéticos comprende desde productos agrícolas y forestales cultivados específicamente para dicho fin, hasta las diversas clases de desechos no tóxicos con alto contenido orgánico. A esta última categoría pertenecen los materiales orgánicos biodegradables que forman parte de los residuos sólidos urbanos. Agrupados bajo el término de fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), esos materiales a menudo constituyen por lo menos el 50% de la masa total de los desechos sólidos urbanos. En 2009 en México, la FORSU representó poco más de 20 millones de toneladas de las casi 38.5 millones de toneladas producidas en todo el país (INEGI, 2010a). Esta inmensa cantidad de materia orgánica biodegradable que se desecha todos los días en hogares y comercios puede ser aprovechada para obtener energía. En este sentido, de los métodos disponibles para la obtención de energía a partir de la FORSU el más indicado, dadas las características fisicoquímicas de esta biomasa residual, es la digestión o degradación anaerobia. Se trata de un proceso bioquímico que se lleva a cabo en ausencia de aire y en el que intervienen microorganismos que desintegran los compuestos orgánicos biodegradables de la FORSU.

Los microorganismos que actúan en la fase final de la digestión son los que sintetizan el CH_4 como subproducto de su metabolismo. El CH_4 es un alcano de notable poder calorífico, que está presente igualmente en el gas natural de origen fósil. El CH_4 se mezcla con otros gases producidos a lo largo de la descomposición de la materia orgánica. Esta mezcla de gases se conoce como biogás y constituye el subproducto de valor energético de la digestión. Debido al nivel de concentración de CH_4 , 40 a 70% en volumen, el biogás tiene cualidades combustibles.

Conviene mencionar que la degradación anaerobia de materia orgánica es un fenómeno que ocurre de forma espontánea en la naturaleza, como lo demuestran las primeras observaciones de este fenómeno que datan del último cuarto del siglo XVIII. Por aquella época, el científico italiano Alejandro Volta advirtió la formación de un gas combustible en lagos, pantanos y aguas estancadas, que asoció a procesos de fermentación de materia orgánica. Fue en el año de 1859, en Bombay, India, cuando se construyó la primera instalación dedicada a la generación de biogás utilizando estiércol de ganado vacuno (Campos y col., 2005). Años después, en 1897, la ciudad inglesa de Exeter se benefició del biogás, emanado de una gran fosa séptica, al utilizarlo para alimentar su sistema de alumbrado público. Durante la primera mitad del siglo XX, la obtención de biogás por medio de la degradación anaerobia de materia orgánica de desecho, creció de manera sobresaliente. Frente al desabasto de combustibles padecido durante la Segunda Guerra Mundial, el biogás proveniente de biomasa residual tuvo un papel importante en el aprovisionamiento de energía.

Luego de un lapso en que el interés en las fuentes alternativas de energía decayera debido a los precios bajos de los combustibles fósiles, las crisis petroleras de la década de 1970 dieron un nuevo impulso a la producción de energía por fuentes renovables. En lo que respecta a la producción de biogás, a comienzos de la década de 1980 los países industrializados iniciaron la construcción de plantas modernas de gran capacidad. Una de estas plantas se instaló en Broni, Italia, con un digestor de 2,000 m^3 donde una mezcla de lodos de aguas residuales y FORSU servía como materia prima para generar biogás (Mata-Alvarez, 2002). Por su parte, los países en desarrollo, dadas sus limitaciones económicas, optaron por la producción de biogás pero a través de plantas sencillas a pequeña y mediana escala para beneficio de hogares o comunidades rurales. Países como China, India, Nepal y Vietnam, así como algunos del continente africano poseen una amplia capacidad de producción de biogás (Deublein y Steinhauser, 2008). Hay que puntualizar que en algunos de estos países, el biogás generado a partir de desperdicios orgánicos ha sido y continúa siendo de gran importancia en el aprovisionamiento de energía a ciertos estratos de sus poblaciones. Por ejemplo, en China se estima que 70% de la energía para uso doméstico en comunidades rurales es aportado por el biogás (Fernández, 2009). Éste se emplea para cubrir necesidades energéticas que incluyen cocción de alimentos, calentamiento de agua, calefacción e iluminación. India y Nepal son otros países donde la digestión de materia orgánica de desecho tiene una presencia notable. A semejanza de lo que ocurre en China, en India operan unidades de tamaño familiar o comunitario que emplean estiércol vacuno en algunos casos combinado FORSU para generar el biogás. En Nepal, la expansión de la producción y uso del biogás se deben en mucho al financiamiento y promoción de parte de programas gubernamentales (Smith y col., 2005).

De las experiencias anteriores se aprecia que la producción y utilización de biogás reporta además beneficios de carácter social. No sólo es el hecho de que a través del biogás es posible satisfacer necesidades energéticas básicas, sino la manera en que ello se consigue. Con el biogás se pueden sustituir combustibles como la leña o el estiércol seco cuya recolección es una tarea que consume tiempo y esfuerzo considerables. La operación de una unidad de producción de biogás también demanda cierto esfuerzo físico. Sin embargo, éste es menor en comparación con el efectuado en la recolección de los combustibles tradicionales de biomasa sólida (Loehr, 1978). Quizá más importante es el hecho de que el biogás tiene una

combustión muy limpia, con un nivel de emisiones de gases y partículas contaminantes por debajo de otros combustibles de uso doméstico (Smith y Uma, 2000; Smith y Zhang, 2000; Smith y col., 2005). No obstante, se debe señalar que en este aspecto son determinantes las condiciones en que se realiza la combustión y el tipo de tecnología usada. En el suministro de energía térmica para usos domésticos, el biogás también puede sustituir a otros combustibles como el queroseno, gas natural y gas LP. Aun cuando estos últimos son considerados energéticos modernos, no hay que olvidar que provienen de recursos fósiles no renovables y que tanto su producción como su consumo tienen efectos adversos sobre el ambiente.

Otro de los aspectos positivos de la degradación anaerobia de biomasa residual que tiene en conexión con la cuestión social, está relacionado con las cualidades y usos potenciales de su efluente. De consistencia lodosa, el efluente de la digestión puede ser empleado como fuente de nutrientes para mejorar la calidad y fertilidad de suelos. Provee de nutrientes a los cultivos con resultados finales equiparables a los obtenidos con otro tipo de sustancias orgánicas (Loehr, 1978). En China los lodos digeridos se aplican a los cultivos de frutas y granos, y en algunas ciudades de la India se usan como fertilizante (Stafford y col., 1980). Otra posibilidad es su utilización como complemento alimenticio para ganado. Gracias al contenido nutricional de los lodos digeridos, es plausible una reducción en los costos por concepto de alimentación tal como lo demuestra el caso de una granja porcina en las Filipinas (Díaz y Golueke, 1979).

En décadas pasadas, la incertidumbre en los precios de los energéticos fósiles fue el factor principal de impulso a las fuentes renovables energía. Hoy día son las legislaciones en materia ambiental y energética las que en mayor medida alientan la expansión de estas fuentes. En este sentido, la obtención de biogás mediante la degradación anaerobia de biomasa residual atiende ambos lineamientos. Por una parte, permite reducir la carga ambiental que representan los desperdicios orgánicos y, por otra, provee un gas combustible con el cual sustituir a los energéticos fósiles en múltiples tareas. El biogás se puede aprovechar para obtener diversas formas útiles de energía, entre ellas, térmica, luminosa, mecánica y eléctrica. En este tenor, la generación de energía térmica para usos finales domésticos por medio de la combustión directa del biogás, es una de las aplicaciones más frecuentes de este combustible (Khandelwal y Mahdi, 1986; Graves, 1993; Austin, 2003; Saxena, 2004). Los usos finales de la energía térmica procedente del biogás son fundamentalmente la cocción de alimentos, el calentamiento de agua y la calefacción de espacios interiores, aunque también puede ser usado en el transporte. Esto sucede en especial tratándose de unidades de producción de biogás situadas en regiones rurales. Sin embargo, la producción y utilización de biogás en el ámbito doméstico igualmente comienzan a verse en zonas semiurbanas (Austin, 2003).

En el entorno urbano el biogás puede reemplazar a combustibles como el gas LP, muy utilizado en el sector residencial. El gas LP en el caso de México aporta el 38% del total de la energía consumida por los hogares a nivel nacional (SENER, 2010a). La energía térmica que se obtiene de la combustión del gas LP se utiliza predominantemente en la cocción de alimentos y el calentamiento de agua (Calderón y Calderón, 2007). En lo que toca a la cocción de alimentos, se estima que ésta representa entre 40 y 50% del consumo de energía en un hogar, que si pertenece a una zona urbana, en un 96% de los casos se efectúa con gas LP (INE, 2010). En el sector comercial también se registra una demanda considerable de este combustible de origen fósil. En 2010, 51% de la energía consumida en ese sector fue aportada por el gas LP (SENER, 2010a), siendo los usos finales los mismos que en el caso de las viviendas, aunque a escala mayor. Todo ello conduce a que México registre el segundo consumo per cápita de gas LP más alto a nivel mundial, con cerca de 65 kg (SENER, 2010b). El inconveniente principal en relación al uso del gas LP radica en que se trata de un energético secundario que se obtiene del procesamiento de energéticos fósiles no renovables. A ello hay que añadir que la quema de gas LP arroja GEI: 3.1 kg de CO₂, 2.5x10⁻⁴ kg de CH₄ y 4.9x10⁻⁶ kg

de N_2O , por cada kg de gas LP consumido. Se justifica entonces la pertinencia de promover y poner en marcha alternativas para sustituir a los energéticos fósiles convencionales, en este caso el gas LP, en sus diferentes usos finales. Tal propósito podría conseguirse, por ejemplo, a través del aprovechamiento orientado a la obtención de energía térmica del biogás generado a partir de la degradación anaerobia de biomasa residual, como la FORSU.

Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en otros países, en México la producción de biogás a partir de biomasa residual en general y de FORSU en particular tiene un exiguo desarrollo. A pequeña y mediana escalas, son comunes los digestores tipo bolsa flexible de 3m^3 de capacidad en promedio, donde se utilizan residuos pecuarios para producir el biogás (Esquivel y col., 2002). A escala mayor, los sistemas de digestión en México se concentran en el sector pecuario, con digestores en el rango de los 4,000 a 16,000 m^3 instalados en granjas porcinas y establos lecheros de gran envergadura y altamente tecnificados (SAGARPA-FIRCO, 2007, FIRCO-SAGARPA, 2010). De acuerdo con FIRCO-SAGARPA (2010), en México se tienen registrados 721 sistemas de digestión para el aprovechamiento de residuos pecuarios. De esa cifra, más del 90% están instalados en unidades productivas porcinas en los estados del noroeste, centro occidente y sureste del país. El tipo de digestor más utilizado en el conocido como laguna anaerobia, utilizado en 95% de los casos. El objetivo principal en estos sistemas de digestión es la destrucción del CH_4 del biogás, a fin de conseguir reducciones certificadas de emisiones las cuales luego se comercializan en el mercado mundial. Aunque, en algunos casos el biogás se aprovecha para generar energía eléctrica que se consume al interior de la propias unidades productivas (SAGARPA-FIRCO, 2007).

Es claro que los subproductos pecuarios constituyen la materia prima dominante para la producción de biogás por degradación anaerobia, tanto en México como en otras partes del mundo. No obstante, otras variantes de biomasa residual reportan incrementos significativos en sus tasas de aprovechamiento para ese mismo fin. Una de esas variantes es la FORSU, cuya capacidad instalada de aprovechamiento a nivel mundial registra un crecimiento importante. De 1990 a 1995 la capacidad de tratamiento de FORSU creció a un ritmo de 30,000 t/año, y para el siguiente lustro lo hizo a 150,000 t/año, de manera que a comienzos del presente siglo la capacidad superaba ya 1,000,000 t/año (De Baere, 2000). La mayor parte de esa capacidad de tratamiento anaerobio de la FORSU corresponde a plantas de carácter comercial situadas en países desarrollados (Mata-Alvarez, 2002; Deublein y Steinhauser, 2008). Se trata de plantas altamente automatizadas con capacidad de procesamiento desde 3,000 hasta 100,000 t/año de FORSU. Los tipos de digestores usados varían según la consistencia de la FORSU, pero los diseños básicos más utilizados son los digestores de mezcla completa y los de flujo pistón, tanto horizontal como vertical. Asimismo, a nivel industrial predominan los sistemas de una sola etapa, es decir, en los que todo el proceso anaerobio se lleva a cabo en un solo digestor. Menor presencia tienen los sistemas de dos o más etapas, en los que las distintas fases del proceso suceden en digestores separados.

Debido a sus elevados requerimientos de capital y tecnología, ese tipo de plantas para la producción de biogás a partir de la FORSU de momento no están al alcance de países en desarrollo, donde además los temas ambientales no son prioritarios. De manera que estos países pueden optar por alguna de al menos tres alternativas posibles. La primera es no dar tratamiento ni aprovechar de forma alguna la FORSU, lo que implica el padecer las afectaciones ambientales y sociales que ello conlleva. La segunda consiste en recurrir a métodos que aun cuando no dan un tratamiento como tal a la FORSU, sí permiten la obtención de biogás y la eventual utilización de éste con fines energéticos. La tercera alternativa supone desarrollar sistemas de digestión para la FORSU que estén acordes a las circunstancias económica y social imperantes en cada país. En el caso particular de México, podría decirse que a la fecha hay inclinación por la primera y segunda alternativas. No hay que pasar por alto

que una cantidad considerable de FORSU se deposita en sitios no controlados, y otro tanto ni siquiera se recolecta. De acuerdo con estadísticas del 2009, casi 10% de los residuos sólidos urbanos generados, de los cuales más de la mitad corresponde a la FORSU, no fueron recolectados y cerca de 11 millones de toneladas se vertieron en sitios no controlados (INEGI, 2010a). Se está hablando de FORSU que no recibe tratamiento ni disposición adecuada y el biogás que produce al descomponerse reporta perjuicios en vez de beneficios.

Por otro lado, está la FORSU que se deposita en rellenos sanitarios que genera biogás con posibilidades de ser aprovechado energéticamente. A escala nacional, en 2009 ingresaron a rellenos sanitarios cerca de 58% de los residuos sólidos urbanos, lo que supone 11.6 millones de toneladas de FORSU (INEGI, 2010a). La FORSU que se deposita en un relleno sanitario se degrada y produce biogás, si bien ello sucede de manera ineficiente. La tasa de recuperación y el contenido energético del biogás de rellenos sanitarios son en general bajos. Con un sistema de extracción de biogás bien diseñado, construido y operado, la tasa de recuperación no suele sobrepasar el 75% del total de biogás producido en el relleno (Gutiérrez y Labastida, 2005). En cambio, en la digestión controlada el 100% del biogás generado es recuperable. En relación al valor energético del biogás, el generado en rellenos sanitarios muestra un contenido de CH₄ inferior hasta en un 30% al obtenido en la digestión controlada (Mata-Alvarez y col., 1990; SGC, 2005). A lo anterior hay que añadir que tanto el volumen de producción como la composición del biogás emanado de un relleno sanitario, son variables a lo largo de su periodo de vida. El biogás con cualidades energéticas comienza a obtenerse de forma estable al cabo de 2 años de que los residuos fueran confinados (Gutiérrez y Labastida, 2005). Por lo que toca a la digestión controlada, el biogás con propiedades combustibles comienza a sintetizarse entre la segunda y sexta semana de arrancado el sistema anaerobio (Arias, 2008). Además, el nivel de producción y la composición del biogás se mantienen sin grandes cambios, siempre y cuando la operación y el mantenimiento sean los apropiados.

Si bien, pese a todo lo anterior, el biogás surgido de los rellenos sanitarios puede ser aprovechado con propósitos energéticos (SEISA, 2007; Arvizu, 2008), las más de las veces el biogás se quema sin otra intención que la destruir el CH₄ que contiene. Aun con acciones como esa, en lo que respecta a México las emisiones de CH₄ procedentes de la materia orgánica de desecho son de magnitud considerable. Según datos del 2006, las emisiones contabilizadas en el sector *Desechos* significaron 14.1% (99,627.5 Gt de CO₂-eq) del total de GEI antropógenos generados en el país (SEMARNAT-INE, 2009). El volumen de emisiones de este sector es el segundo en importancia sólo detrás de las actividades relacionadas con la energía. Cabe resaltar que 51% de las emisiones del sector *Desechos* están relacionadas con la disposición de residuos sólidos en suelo.

Para un adecuado control de la contaminación ligada a la FORSU y un mejor aprovechamiento de ésta como materia prima para la obtención de biogás, es necesario implementar sistemas para su degradación anaerobia controlada. De esta manera es posible generar biogás con alto contenido de CH₄, lo que incrementa su valor energético. Además, la totalidad del biogás producido puede ser recuperado y así maximizar los beneficios económicos, ambientales y sociales que resultan de la digestión controlada de la FORSU. Por último, conviene recordar que la FORSU constituye poco más de la mitad de la masa total de residuos sólidos urbanos que cotidianamente se generan en México. Esto da una idea del tamaño del recurso, y de la magnitud de eventuales impactos adversos sobre el entorno y la salud pública derivados de su incorrecto manejo y disposición. Así pues, tomando en consideración todo lo previamente mencionado, se tienen elementos para afirmar que el aprovechamiento de la FORSU como materia prima para la obtención de biogás combustible por medio de un sistema para su degradación anaerobia controlada, es un tema que merece ser abordado. Y es precisamente en torno a ello que se establece el objetivo del presente trabajo.

El *Objetivo General* del presente trabajo consiste en planear, diseñar e instalar una planta a nivel prototipo para llevar a cabo la degradación anaerobia controlada de la fracción orgánica de los residuos sólidos generados en un restaurante ubicado en el campus Ciudad Universitaria de la UNAM, para de esta manera obtener biogás combustible y con él producir energía térmica útil para consumo dentro del propio restaurante.

Para tal efecto, se consideran los *Objetivos Específicos* que se enuncian a continuación:

-Seleccionar el restaurante que ofrece condiciones adecuadas tanto para el aprovechamiento de sus residuos sólidos orgánicos por la vía mencionada, como para la instalación de la planta.

-Identificar al interior del restaurante los usos finales de la energía que involucran el aprovisionamiento de calor útil y donde el biogás podría utilizarse como combustible alternativo; asimismo, estimar el consumo de energía por ese concepto.

-Determinar el patrón y el volumen de generación de los residuos sólidos orgánicos del restaurante seleccionado, susceptibles de someterse al proceso de degradación anaerobia.

-Caracterizar los residuos sólidos orgánicos, poniendo atención especial en aquellas propiedades fisicoquímicas relevantes para el proceso de degradación anaerobia.

-Precisar, de haberlos, los requisitos de pre-tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del restaurante con objeto de favorecer su proceso de degradación anaerobia y la subsecuente generación de biogás.

-Establecer valores preliminares para los principales parámetros operación del sistema de degradación anaerobia controlada de los residuos orgánicos en base a las condiciones y modo de operación propuestos.

-Definir los atributos técnicos básicos del sistema de degradación anaerobia controlada de los residuos orgánicos, entre ellos los referentes al pre-tratamiento de los residuos, al tipo, capacidad y número de digestores necesarios, así como a aquellos equipos auxiliares que se consideren esenciales.

-Establecer la configuración que se evalúe más conveniente de los distintos componentes que integran la planta, e igualmente la secuencia para su correcta operación.

-Estimar el volumen esperado de producción de biogás, así como su nivel de concentración de metano (CH_4) para de esta forma obtener su equivalente energético y con él fijar provisionalmente el alcance de su contribución en el uso final que sea elegido.

-Calcular indicadores de rentabilidad económica y efectuar análisis de sensibilidad para algunos de esos indicadores.

-Instalar los componentes de la planta conforme a los lineamientos que se desprendan de las etapas de planeación y diseño.

Esta página se dejó en
blanco intencionalmente

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

A lo largo de las últimas décadas se ha suscitado un crecimiento, en número y extensión, de las zonas urbanas en distintas partes del orbe. Se trata de zonas que son sede de una diversidad de consorcios, locales e internacionales, de los distintos sectores de la económica actual. En su interior emergen mercados laborales ávidos de mano de obra de toda índole, a lo que se añade una oferta amplia de bienes y servicios que contribuye a elevar la calidad de vida de sus habitantes. Los centros urbanos entonces podrían catalogarse como imanes demográficos. Hacia éstos, convergen los flujos migratorios procedentes fundamentalmente de comunidades rurales empobrecidas. El incremento constante en el número de habitantes viene a agudizar el conjunto de problemáticas que padecen las grandes urbes, en especial de aquellas que carecen de una auténtica planeación.

Si bien la aportación económica de los centros urbanos es crucial para el crecimiento de cualquier nación, el deterioro medioambiental y social, principalmente, derivados del aumento y elevada concentración de sus poblaciones, han alcanzado, desde hace ya algún tiempo, niveles alarmantes. En este contexto, resulta indudable que una de las mayores problemáticas que enfrentan las zonas urbanas se encuentra ligada a la generación y acumulación de grandes volúmenes de residuos materiales producto de las actividades rutinarias que en ellas acontecen. Si bien los desechos materiales en cualquier forma y estado físico ponen en riesgo a los ecosistemas, incluidos los seres humanos, se ha puesto especial atención en los residuos sólidos, comúnmente denominados residuos sólidos urbanos. Ello obedece no sólo a las consideraciones anteriores, sino también a las exigencias en infraestructura y recursos económicos que supone su recolección, transporte, procesamiento y disposición final. En este sentido, se estima que, en promedio, más de un tercio del financiamiento público que los países destinan al abatimiento y control de la contaminación se canaliza al manejo y tratamiento de los residuos urbanos (OCDE, 2010).

I.1 - Residuos sólidos urbanos

Los residuos urbanos, también conocidos como residuos municipales, comprenden los desechos materiales no peligrosos generados en los sectores residencial y comercial. Aunque también pueden sumarse los provenientes de actividades industriales y agrícolas. Ello depende, en todo caso, de las prácticas y regulaciones existentes en cada localidad (UNEP,

2009). El calificativo de municipales dado a estos residuos se debe al hecho de que son precisamente las autoridades municipales las que en primera instancia son responsables de su recolección, transporte y confinamiento. Sin embargo, en ocasiones su ámbito de competencia se limita a los residuos domésticos, de modo que los producidos en otros sectores son administrados por los propios generadores, quienes se hacen cargo de su transporte hasta el lugar de disposición final, pagando la cuota correspondiente para verter allí sus desechos.

Partiendo de los conceptos anteriores, resulta fácil deducir que los residuos sólidos urbanos (RSU) consisten en una mezcla heterogénea de desechos producidos en las áreas urbanas. Los RSU se componen predominantemente de los desechos generados en casas habitación como consecuencia de la eliminación de envases, embalajes, empaques y otros materiales remanentes de los utilizados en las actividades cotidianas. También se incluyen en esta categoría aquellos residuos provenientes de comercios y pequeños establecimientos, edificios públicos, centros educativos, oficinas y los que resultan de la limpieza y mantenimiento de parques, jardines, vialidades y otros espacios públicos, cuya recolección y procesamiento son llevados a cabo, de manera directa o a través de terceros, por las autoridades locales (INEGI, 2010; OCDE, 2010).

Los desechos industriales de alta toxicidad, así como los que proceden de las redes de drenaje, de la construcción y la demolición, usualmente no se consideran dentro de la categoría de RSU. Cabe señalar que los residuos domésticos contienen sus propios desechos peligrosos, como por ejemplo contenedores impregnados con pinturas y fluidos automotrices, baterías, tubos de lámparas fluorescentes, entre muchos otros. Asimismo, con el propósito de garantizar cierto nivel de higiene y seguridad durante la recolección de los desechos, es preferible que los RSU no contengan rastros fecales ni orina. Lo mismo aplica para los desechos patológicos, los procedentes de mataderos y otros de naturaleza similar. Para que ello suceda, las legislaciones aplicables en la materia deben penalizar el incumplimiento de tales disposiciones (UNEP, 2009).

El ritmo de generación, pero sobre todo la composición de los RSU están en función de variables de tipo económico, social, geográfico y estacional (Gidarakos y col., 2006; UNEP, 2009). En los RSU se encuentran una infinidad de materiales de todo tipo, que son susceptibles de ser agrupados en distintas categorías o fracciones, desde las más generales hasta las más minuciosas, según los fines que se persigan. Algunas de las fracciones en que pueden segregarse los desechos presentes en los RSU, se muestran en la Tabla I.1. No obstante, dada su simplicidad y utilidad, a menudo se opta por hacer la distinción en los RSU de únicamente dos componentes principales; la fracción inorgánica y la fracción orgánica.

En la fracción inorgánica se incluyen a todos aquellos desechos elaborados con materiales cuya desintegración y posterior asimilación por vías naturales demoran, si acaso, largo tiempo en consumarse. Está compuesta, pues, en mayor medida de materiales que resultan idóneos para los procesos de reciclaje ya que además, en principio, son fáciles de separar y suelen alcanzar un valor económico tal que favorece el establecimiento de mercados para su comercialización. Ejemplos de estos materiales son el aluminio y otros metales, el vidrio, algunos plásticos, el papel y el cartón.¹ También forman parte de los residuos inorgánicos los provenientes de productos formados a partir de la combinación de dos o más materiales, los cuales, a diferencia de los primeros, difícilmente pueden ser incorporados a un proceso de reciclaje, debido a la complejidad que representa el llevar a cabo la separación de los materiales constituyentes (Herrera, 2004). Otra subcategoría importante dentro de la

¹ Si bien es cierto que los residuos de papel y cartón son de naturaleza orgánica, resulta conveniente manejarlos con los residuos inorgánicos a fin de promover y facilitar su reciclaje (Herrera, 2004).

fracción inorgánica de los RSU es la que agrupa a los materiales denominados inertes. Se trata sobre todo de piedras, tierra y residuos derivados de la construcción y demolición. Asimismo, otros desechos que suelen hallarse en la fracción inorgánica de los RSU son los referidos como misceláneos. Aquí se agrupan aquellos desechos cuyo manejo implica cierta dosis de riesgo dada la naturaleza de las sustancias que los conforman (Alcántara y col., 2004). Ejemplos de residuos misceláneos son los pañales, toallas sanitarias, papel de baño, medicamentos, pinturas, químicos, latas presurizadas, piezas y componentes electrónicos.

Tabla I.1 - Fracciones identificables en los residuos sólidos urbanos
(Gómez y col., 2008)

Fracciones	Componentes
Orgánica	<i>Comida, madera, residuos de jardín</i>
Papel	<i>Papel de oficina, documentos diversos, envases de leche y jugo, periódicos, revistas</i>
Cartón	<i>Cartón corrugado, cajas, contenedores de huevo</i>
Plásticos	<i>Película de polietileno, plásticos pequeños</i>
Contenedores de plástico	<i>PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS</i>
Metales	<i>Ferrosos y no ferrosos</i>
Latas de aluminio	<i>Contenedores de bebidas, otros tipos de aluminio</i>
Vidrio transparente	<i>Contenedores de alimentos sólidos y/o líquidos</i>
Vidrio de color	<i>Contenedores de bebidas y alimentos</i>
Residuos finos	<i>Materiales de pequeñas dimensiones</i>
Fibras vegetales	<i>Materiales utilizados en aparatos de aire acondicionado</i>
Fibras sintéticas	<i>Materiales utilizados para la limpieza</i>
Baterías	<i>Baterías de diversos tamaños</i>
Misceláneos	<i>Artículos sanitarios, pequeños juguetes, zapatos, algodón, textiles, cabello, electrónicos</i>

Por otra parte, la fracción orgánica de los RSU abarca los residuos que pueden ser degradados con facilidad hasta obtener compuestos o sustancias esenciales. Estas sustancias se reintegran a los ciclos biogeoquímicos que permiten la circulación de aquellos elementos vitales para los procesos que ocurren en la naturaleza (Gutiérrez y col., 1997). Dicha degradación es efectuada por microorganismos conocidos como desintegradores, a los que pertenecen desde seres unicelulares, como bacterias, hasta pluricelulares, por ejemplo lombrices. Esta es la razón por la cual los residuos orgánicos son catalogados como materia biodegradable.

Típicamente, la fracción orgánica de los RSU engloba a los residuos de comida (pan, tortilla, cortezas de frutas y verduras, cascarón de huevo, café) y restos de jardín (pasto, ramas, flores, hojas). Todos ellos son susceptibles de ser desintegrados por acción biológica, pero la velocidad con la que sucede dicho proceso es variable (UNEP, 2009). Residuos como los restos de comida se descomponen con rapidez, lo que hace necesaria la implementación de medidas para evitar inconvenientes tales como la emisión de olores desagradables y la afluencia de fauna nociva. Otros desechos, como los constituidos por madera, exhiben una

degradación comparativamente más lenta a consecuencia de su estructura y composición química. Sin embargo, lo que hay que resaltar es el hecho de que las cantidades de ambas fracciones de los RSU han venido aumentando de manera pronunciada en las décadas recientes en el mundo entero. Aunque el comportamiento es distinto según las especificidades económicas, sociales y culturales de cada región o país, como se discutirá a continuación.

I.2 - Generación de residuos sólidos urbanos

I.2.1 - Panorama mundial

Como consecuencia del desarrollo y crecimiento económico que aumentan la desenfrenada urbanización e industrialización alrededor de todo el planeta, la generación de RSU se incrementa con notoria rapidez, no sólo en términos de volumen sino también en la variedad de materiales presentes en su composición. Así, se estima que el periodo 2003 - 2006, la producción mundial de RSU creció a un ritmo anual de 7.0%, dando como resultado al final de dicho lapso una generación total de 2,020 millones de toneladas de RSU, cantidad que se incrementaría hasta en un 37.3% en el transcurso del siguiente lustro (UNEP, 2009).

La cantidad de RSU que se genera en determinado país está relacionada, fundamentalmente, con el grado de urbanización, los tipos y patrones del consumo de productos, el nivel de ingreso y los estilos de vida predominantes (OCDE, 2010). Puede aseverarse, por tanto, que existe un fuerte nexo de los ritmos de crecimiento económico y demográfico y la etapa de desarrollo industrial, con la tasa de generación de los RSU. Para demostrar este hecho basta observar la información presentada en la Tabla I.2 en donde se muestra la evolución histórica, para el periodo comprendido de 1980 a 2007, de la generación de RSU en países seleccionados. Los primeros siete países, contando de arriba hacia abajo, conforman el grupo de las siete naciones más industrializadas del mundo, el denominado G7; se incluyen además países con economías boyantes, como China e India.

Aun cuando las cifras correspondientes a algunos de estos países evidencian un descenso a últimas fechas en la generación total de RSU, tales son los casos de Alemania y Japón, en general, se aprecia una tendencia ascendente en la generación de RSU a nivel mundial. En lo tocante a las naciones más industrializadas, esa tendencia se ha debilitado en años recientes, siendo además de magnitud variable para cada país. En Japón, por ejemplo, la cantidad total de RSU pasó de 43,940 kt en 1980 a 54,830 kt en el año 2000, lo que representa un incremento de sólo 24.8% en 20 años². En contraste, en el mismo lapso, la generación de RSU en EE.UU. creció 57.6%, y en Italia aumentó más del doble.

Por otra parte, en los países que no forman parte del G7 también se observa un crecimiento progresivo en la generación de RSU. Sin embargo, para este grupo de países conviene hacer algunas distinciones. Por un lado están aquellos con economías relativamente prósperas y consolidadas que permiten que sus habitantes disfruten de un nivel alto de bienestar. Se trata fundamentalmente de países de Europa Central y Occidental. Por otro, están los países inmersos en transiciones políticas, económicas y sociales que los conducirán, en teoría, a un mejor nivel de vida. Estas naciones son las que se ha convenido en llamar países en desarrollo.

Las cifras pertenecientes a, por ejemplo, la Federación Rusa y China muestran un crecimiento pronunciado de la generación total de RSU en el periodo comprendido de 1990 a 2000 con

² El término **kt** refiere **kilotoneladas**. El prefijo *kilo* [k] es usado en el Sistema Internacional de Unidades (SI) para indicar que la unidad a la que éste antecede se multiplica por un factor de 10³. La *tonelada* (t) es una unidad de masa de uso aceptado en el SI cuyo valor equivale a 1,000 kg. Por tanto, una *kt* representa 1,000 t, o lo que es lo mismo, 1,000,000 kg.

incrementos de 85% y 75%, respectivamente. Lo anterior puede ser muestra de una fuerte correlación positiva entre la generación de RSU y la expansión económica, que se expresa en términos del aumento en el nivel de ingresos y los cambios en los patrones de consumo. En países con inferiores índices de crecimiento económico, como México, la generación total de RSU también ha crecido, pero lo ha hecho en una proporción menor si se le contrasta con las cifras correspondientes a otros territorios con economías más efervescentes.

Tabla I.2 - Generación de residuos sólidos urbanos en países seleccionados
(OCDE, 2010)

País/Año	Cantidad total generada Miles de toneladas						Intensidad de generación kg/cápita/año
	1980	1985	1990	1995	2000	2007	2007
Canadá	-	-	8,925	7,030	11,280	12,980	400
Francia	-	-	26,220	28,250	31,230	34,310	540
Alemania	-	-	49,860	50,895	52,810	47,890	580
Italia	14,040	15,000	20,000	25,780	28,960	32,550	550
Japón	43,940	42,095	50,260	52,225	54,830	52,035	410
Reino Unido	-	-	27,100	28,900	33,955	34,780	570
EE.UU.	137,570	149,190	186,170	193,870	216,865	230,555	760
Bélgica	2,760	3,055	3,440	4,585	4,860	5,210	490
Portugal	1,980	2,350	3,000	3,855	4,530	5,005	470
Turquía	12,000	18,000	22,315	27,235	30,620	30,000	430
México	-	-	21,060	30,510	30,730	36,865	350
Unión Europea	-	-	-	226,530	252,480	258,200	520
OCDE	377,250	405,345	488,960	527,575	589,845	622,685	560
Brasil	-	-	-	-	58,000	-	-
Federación Rusa	22,000	24,800	28,000	50,000	51,850	63,075	445
India	-	-	-	-	108,000	-	-
China	-	-	67,670	106,710	118,190	154,145	115
Sudáfrica	-	-	-	-	-	20,000	420

Un elemento que no puede omitirse del análisis es el comportamiento demográfico. Como ya se dijo, el crecimiento y concentración de la población inciden de manera franca en los volúmenes de generación de RSU, siendo factores detonantes de las crisis ambientales que padecen las grandes urbes del mundo. Ahora bien, vista la problemática desde la perspectiva ya no local sino nacional, e incorporando la variable demográfica, se desprenden otras

consideraciones que conviene traer a discusión, así sea de manera superficial en virtud de las restricciones a que se sujeta el presente trabajo.

Al observar los valores del indicador *Intensidad de generación*, expuestos en la última columna de la Tabla I.2 y de forma gráfica en la Figura I.1, se aprecia que existen países que pese a no registrar una excesiva generación total de RSU su *Intensidad de generación* está muy por encima de la correspondiente a países con cantidades totales de generación mucho mayores. Bélgica, por ejemplo, en 2007 generó 5,210 kt de RSU y tuvo una producción per cápita de 490 kg. China, el país más poblado del planeta, generó en ese mismo año casi 30 veces más RSU que Bélgica, pero su producción per cápita fue de sólo 115 kg, la quinta parte de la registrada en la nación europea. De aquí se infiere la relevancia que en la evaluación de la problemática asociada a la generación de RSU adquieren cuestiones como los patrones de consumo y los hábitos o estilos de vida que caracterizan a las distintas sociedades.

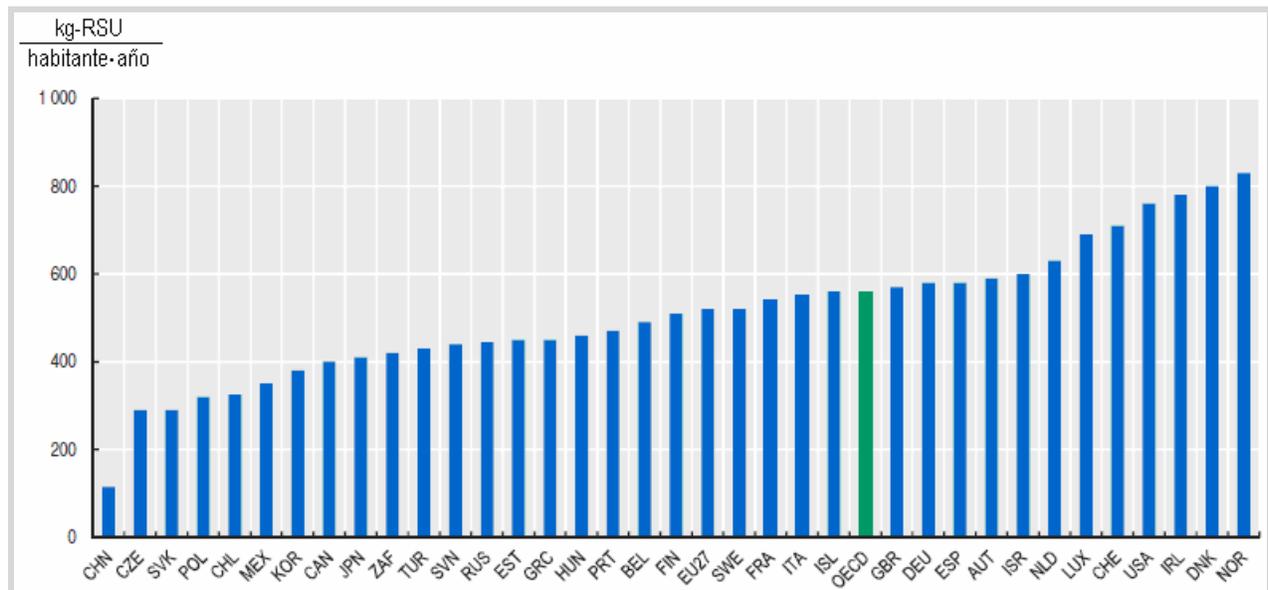


Figura I.1 - Generación per cápita anual de residuos sólidos urbanos en países seleccionados
(OCDE, 2010)

Como complemento a los datos anteriores y con objeto de hacer más claro el vínculo que se establece entre la tasa de generación de RSU y el nivel de ingresos promedio que perciben los individuos, se presentan la Tabla I.3. La Tabla I.3 reúne cifras de intensidad de generación de RSU, de ingreso nacional bruto por habitante y del valor correspondiente al Índice de Desarrollo Humano para un grupo representativo de países. Este conjunto de datos servirá para evaluar la intensidad de la relación entre parámetros surgidos de los ámbitos del crecimiento económico y del desarrollo de cada nación, con el nivel de generación de RSU.

Los países están dispuestos en orden ascendente de acuerdo a su ingreso nacional bruto per cápita, en dólares estadounidenses del 2008 y ajustado según la paridad del poder adquisitivo (PPA)³, con la intención de facilitar la detección de la relación antes esbozada. La observación cuidadosa de las cifras permite descubrir que, en efecto, a medida que aumenta el nivel de

³ De acuerdo con Lafrance y Schembri [2002], la Paridad del Poder Adquisitivo (en inglés *Power Purchase Parity, PPP*), es un concepto que registra las variaciones en los precios y en el poder adquisitivo del ingreso, de ahí que sea de utilidad para comparar los estándares de vida en dos o más países. La PPA pretende reflejar las diferencias en los precios, originadas por las variaciones en los costos de insumos formalmente no comercializables como la mano de obra y la tierra, de los bienes y servicios que se ofrecen en dos países distintos, hecho que es ignorado cuando se utilizan simplemente las tasas de cambio nominales. Una tasa de cambio ajustada según la PPA se obtiene del cociente entre los precios de una canasta representativa de productos y servicios de calidades similares, expresados en las monedas correspondientes a cada nación.

ingresos, la generación de RSU también tiende a incrementarse, siendo muy ilustrativos los casos de los países situados en los extremos, China y Noruega, los cuales conservan sus respectivas posiciones en ambos rubros. Pese a que existe cierta dispersión en los datos compilados, se distingue una correlación positiva entre la generación de RSU y el nivel de ingresos a escalas nacional, tal como se observa en la Figura I.2.

Tabla I.3 - Generación de residuos sólidos urbanos e ingreso nacional bruto en países seleccionados

(Elaboración a partir de OCDE, 2010; UNDP, 2010)

País		Generación de residuos urbanos kg per cápita-año (2007)	Ingreso Nacional Bruto per cápita USD 2008 PPA	Índice de Desarrollo Humano 2010
China	CHN	115	7,258.00	0.663
Sudáfrica	ZAF	420	9,812.00	0.597
Turquía	TUR	430	13,359.00	0.679
Chile	CHL	325	13,561.00	0.783
México	MEX	350	13,971.00	0.75
Federación Rusa	RUS	445	15,258.00	0.719
Estonia	EST	450	17,168.00	0.812
Hungría	HUN	460	17,472.00	0.805
Polonia	POL	320	17,803.00	0.795
Eslovaquia	SVK	290	21,658.00	0.818
Portugal	PRT	470	22,105.00	0.795
República Checa	CZE	290	22,678.00	0.841
Islandia	ISL	560	22,917.00	0.869
Eslovenia	SVN	440	25,857.00	0.828
Grecia	GRC	450	27,580.00	0.855
Israel	ISR	600	27,831.00	0.872
Corea del Sur	KOR	380	29,518.00	0.877
Italia	ITA	550	29,619.00	0.854
España	ESP	580	29,661.00	0.863
Irlanda	IRL	780	33,078.00	0.895
Finlandia	FIN	510	33,872.00	0.871
Francia	FRA	540	34,341.00	0.872
Japón	JPN	410	34,692.00	0.884
Bélgica	BEL	490	34,873.00	0.867
Reino Unido	GBR	570	35,087.00	0.849
Alemania	DEU	580	35,308.00	0.885
Dinamarca	DNK	800	36,404.00	0.866
Suecia	SWE	520	36,936.00	0.885
Austria	AUT	590	37,056.00	0.851
Canadá	CAN	400	38,668.00	0.888
Suiza	CHE	710	39,849.00	0.874
Holanda	NLD	630	40,658.00	0.89
EE.UU.	USA	760	47,094.00	0.902
Luxemburgo	LUX	690	51,109.00	0.852
Noruega	NOR	830	58,810.00	0.938

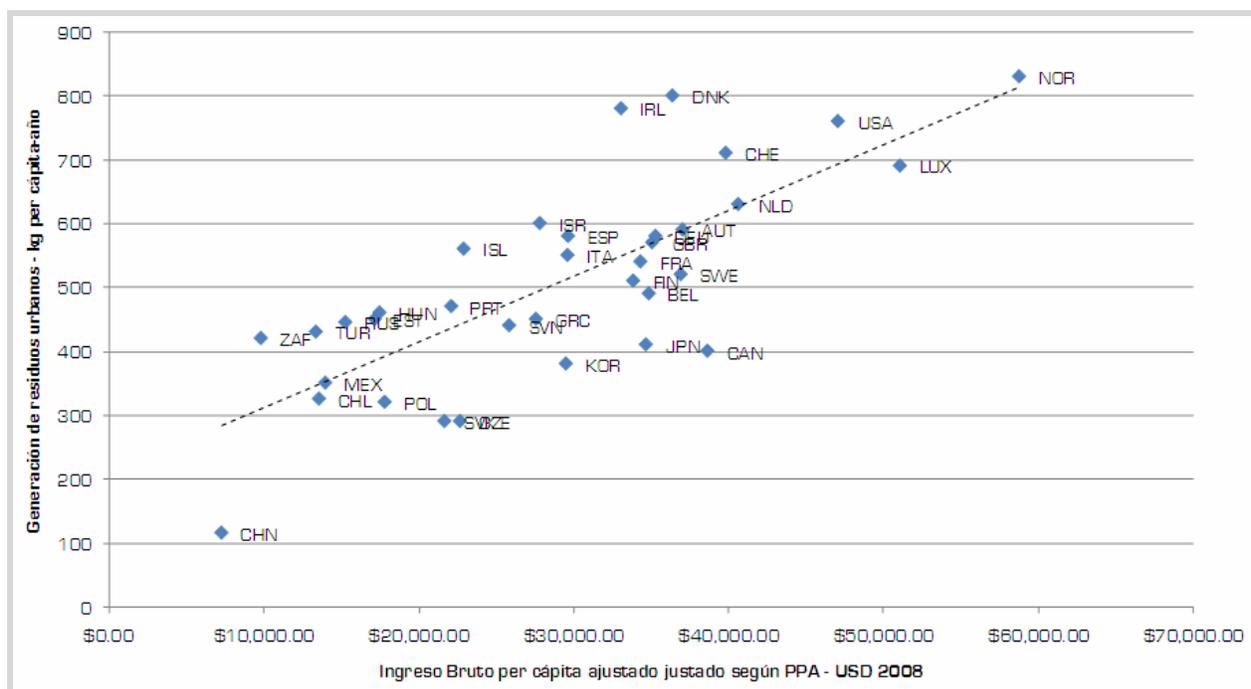


Figura 1.2 - Generación de residuos sólidos urbanos e ingreso per cápita en países seleccionados
(Elaboración a partir de OCDE, 2010; UNDP, 2010)

La Figura 1.2, que al mismo tiempo constituye un diagrama de dispersión, devela una tendencia lineal creciente en la relación de la generación de RSU y el monto del ingreso per cápita, haciendo posible por esa razón la obtención del coeficiente de correlación lineal entre ambas variables.⁴ Dicho coeficiente resulta de +0.76, que si bien dista de la unidad, es un valor alto que refleja una significativa correlación lineal positiva entre la generación de RSU y el nivel de ingreso por habitante. Ello quiere decir, simplificando el hecho, que a medida que asciende el nivel de ingresos, la generación de RSU también lo hace, aunque no en la misma proporción puesto que su coeficiente de correlación lineal difiere de la unidad.

La Tabla 1.3 también presenta las cifras correspondientes al Índice de Desarrollo Humano (IDH), un indicador de bienestar mucho más integral en cuya construcción intervienen otros elementos además del nivel ingresos.⁵ Utilizando los valores del IDH es posible avocarse a calcular el coeficiente de correlación lineal entre éste y la generación de RSU por habitante. El coeficiente, en este caso, resulta de +0.59, un valor inferior al obtenido al relacionar la generación de RSU y el nivel de ingreso per cápita. Sin embargo, su magnitud no deja de ser significativa y demuestra la relación cercana, aunque un tanto débil, entre el estadio de desarrollo y la producción de RSU en un país dado. En ambos casos, sin embargo, sería

⁴ El coeficiente de correlación lineal o coeficiente lineal de Pearson (r_{xy}), es un índice empleado para determinar hasta qué punto o qué tan intensa es la relación lineal entre dos variables (x , y). Resulta del cociente de la covarianza de ambas variables entre el producto de sus respectivas desviaciones estándar. Su valor absoluto oscila entre 0 y 1. Cuando es próximo a 1 indica una alta correlación lineal entre las variables. La intensidad de la relación disminuye progresivamente a medida que r_{xy} se acerca a 0, valor para el cual la correlación lineal es nula. Si r_{xy} es positivo, x e y se dicen correlacionadas positivamente, es decir, al aumentar x , y también se incrementa. Por el contrario, si el coeficiente de correlación es negativo, se dice que la correlación es inversa, al incrementarse x , disminuye y . Es preciso mencionar que aun cuando dos variables posean un r_{xy} muy próximo a la unidad, no debe asumirse de manera inmediata que una es causa de la otra, es decir, un coeficiente de correlación alto no supone causalidad.

⁵ Desarrollado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP), el Índice de Desarrollo Humano (IDH) registra la situación y avances de los países en torno de dimensiones básicas del desarrollo humano, a saber: Salud, educación y estándares de vida. El IDH se construye ponderando las aportaciones de indicadores normalizados para las tres dimensiones antes mencionadas: Expectativa de vida al nacer, promedio de años de escolaridad, expectativa de años de escolaridad e ingreso nacional bruto per cápita. El IDH toma valores entre 0 y 1, a medida que se aproxima a la unidad, revela un mayor nivel de desarrollo humano.

conveniente efectuar el análisis ampliando el acervo de datos a fin de trabajar con una muestra mucho más representativa, labor que amerita ser desarrollada en un trabajo distinto al aquí presentado.

Por otro parte, cabe apuntar que las diferencias con respecto a los RSU generados alrededor del mundo no son únicamente de carácter cuantitativo. La composición de los residuos es influenciada de modo análogo por elementos de tipo social y económico, aunados a los geográficos y estacionales. De esta forma, las características los RSU producidos en países altamente industrializados difieren de aquellos generados en naciones en vías de desarrollo, en los cuales hay una presencia más significativa de la fracción orgánica en el total de los desechos. A fin de abundar en este punto, la Tabla I.4 reúne cifras en torno a la composición de los RSU para diversas ciudades del mundo. Las cifras revelan que, en efecto, en países en desarrollo la porción orgánica en los RSU supera a la contabilizada en las naciones desarrolladas. Mientras que en los primeros la fracción orgánica representa en promedio más del 50%, habiendo casos en que llega incluso al 75%, en los segundos, el porcentaje apenas ronda el 20%, observándose, en cambio, una presencia significativa de residuos de papel y vidrio.

Tabla I.4 - Composición de los residuos sólidos urbanos en ciudades seleccionadas

Lugar	Orgánicos	Papel	Metal	Vidrio	Plásticos, caucho, cuero	Textiles	Cerámicos, polvo, piedras	Referencia
Porcentaje en peso húmedo								
Bangalore, India	75.2	1.5	0.1	0.2	0.9	3.1	19.0	Nath, 1993
Asunción, Paraguay	60.8	12.2	2.3	4.6	4.4	2.5	13.2	Díaz y Golueke, 1985
Ciudad de México, México	59.8 ^A	11.9	1.1	3.3	3.5	0.4	20.0	CalRecovery, 1992
Manila, Filipinas	45.5	14.5	4.9	2.7	8.6	1.3	27.5	Díaz y Golueke, 1985
Condado de Bexar, Texas; EE.UU.	43.8 ^B	34.0	4.3	5.5	7.5	2.0	2.9	CalRecovery, 1993
Sunnyvale, California; EE.UU.	39.4 ^B	40.8	3.5	4.4	9.6	1.0	1.3	CalRecovery, 1993
Australia	23.6	39.1	6.6	10.2	9.9	-	9.0	Morwood, 1994
Viena, Austria	23.3	33.6	3.7	10.4	7.0	3.1	18.9	Scharff y Vogel, 1994
Seúl, Corea del Sur	22.3	16.2	4.1	10.6	9.6	3.8	33.4	JICA, 1985
París, Francia	16.3	40.9	3.2	9.4	8.4	4.4	17.4	Scharff y Vogel, 1994

(A): Incluye cantidades mínimas de madera, hierbas de forraje y paja

(B): Incluye residuos de jardín

Lo anterior puede explicarse a través de la diversidad de hábitos en relación al descarte de los residuos que se practican en diferentes partes del mundo, así como a la existencia y efectividad de estrategias que son instrumentadas por los respectivos gobiernos locales para

la gestión de tales desperdicios. En este sentido, la práctica común de triturar los restos de comida, incorporándolos a las aguas residuales domésticas, así como obedecer permanentemente las disposiciones que obligan a la separación de origen de los residuos sólidos urbanos, son ejemplos representativos de los factores antes mencionados.

Diferencias semejantes en cuanto a volumen y composición que se observan entre los RSU generados en distintos puntos del planeta, es presumible que persistan al efectuar un examen similar de los RSU producidos en un país en específico. Esto debido a la heterogeneidad social y económica, que en mayor o menor medida, está presente al interior de sus fronteras, tal como ocurren al hacer la comparativa entre países. A fin de apoyar esta afirmación, en las líneas siguientes se ofrece información que busca dar una descripción general de lo acontecido en relación con la generación de RSU en México, poniendo particular atención en las cuestiones de carácter social y económico que mejor ayuden a entender su comportamiento mostrado en la historia reciente.

1.2.2 - Panorama nacional

La generación de RSU en la República Mexicana está fuertemente influenciada por variables tales como los ritmos de crecimiento demográfico e industrial del país. En ella también se ven reflejados los cambios en los hábitos de consumo de la población y el mejoramiento aparente de sus niveles de bienestar, que se conectan a su vez con el abandono paulatino y desaparición de los poblados rurales. La conjunción de esas y otras variables ha propiciado que la generación anual de RSU a nivel nacional pasara de alrededor de 3,285 kt en la década de 1950, a más de 30,733 kt en el año 2000 (INE-SEMARNAT, 2001). Ello se traduce en un incremento de la producción de RSU de casi 10 veces en el transcurso de medio siglo. En el desarrollo de la primera década del siglo XXI, la producción de RSU en México continuó creciendo (Figura I.3), a una tasa promedio anual de 2.48%, para alcanzar en 2009 un total de 38,325 kt, esto es, 105,000 t de RSU diarias.

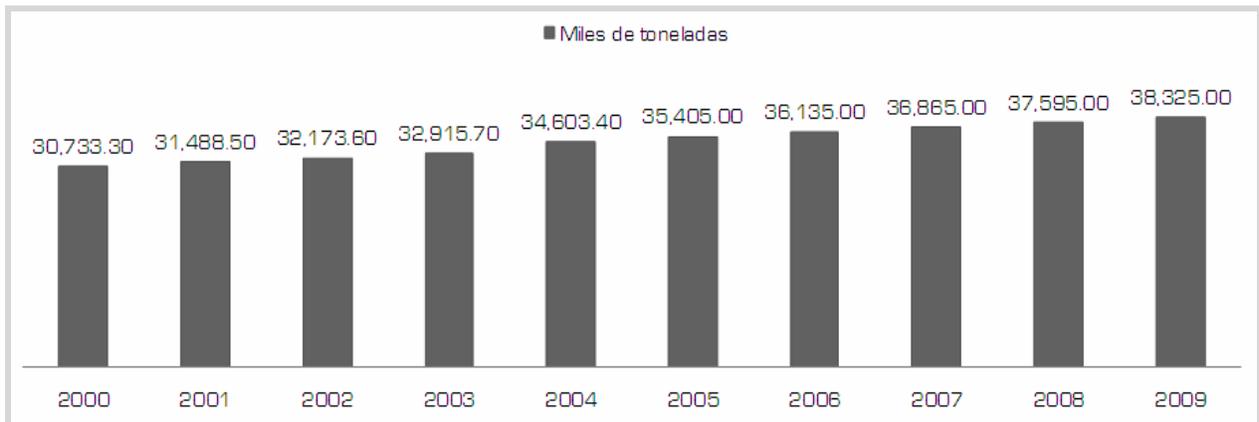


Figura I.3 - Evolución de la generación de residuos sólidos urbanos en México
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a)

Es importante subrayar que la generación de RSU no es uniforme en todo el territorio nacional. Consecuencia de las marcadas diferencias socioeconómicas que subsisten en México, existen ciertas regiones geográficas o entidades específicas que, debido a su nivel de urbanización y dinamismo económico, presentan tasas de producción de RSU superiores a las registradas en el resto del país. A este respecto, conviene dar un vistazo a la información recabada en la Tabla I.5, que muestra la generación de RSU en distintas zonas geográficas del país. Es patente un crecimiento generalizado de la producción de RSU y también que las regiones donde se localizan los centros urbanos de mayor importancia, que concentran la

mayor parte de la actividad económica nacional y de la población, exhiben una generación de RSU por habitante que supera sin dificultades a las registradas en regiones históricamente de menor desarrollo y crecimiento económico.

Tabla I.5 - Generaciones per cápita diaria y anual de residuos sólidos urbanos por zona geográfica
[Elaboración a partir de INEGI, 2010a]

Zona/ Año	Generación per cápita diaria, kg per cápita-día									
	<i>Generación anual, miles de toneladas</i>									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Sur ^A	0.657	0.665	0.671	0.677	0.690	0.697	0.706	0.731	0.740	0.750
	<i>2,986</i>	<i>3,074</i>	<i>3,157</i>	<i>3,238</i>	<i>3,449</i>	<i>3,533</i>	<i>3,623</i>	<i>3,701</i>	<i>3,792</i>	<i>3,865</i>
Norte ^B	0.834	0.846	0.854	0.864	0.879	0.774	0.783	0.817	0.850	0.860
	<i>5,569</i>	<i>5,695</i>	<i>5,803</i>	<i>5,923</i>	<i>6,327</i>	<i>3,915</i>	<i>3,985</i>	<i>4,050</i>	<i>3,927</i>	<i>4,008</i>
Centro ^C	0.830	0.841	0.849	0.857	0.868	0.882	0.892	0.928	0.940	0.950
	<i>15,354</i>	<i>15,789</i>	<i>16,179</i>	<i>16,582</i>	<i>17,359</i>	<i>17,801</i>	<i>18,168</i>	<i>18,549</i>	<i>18,902</i>	<i>19,268</i>
Frontera norte ^D	0.928	0.941	0.951	0.962	0.974	1.048	1.058	1.098	1.070	1.080
	<i>2,471</i>	<i>2,580</i>	<i>2,683</i>	<i>2,793</i>	<i>2,966</i>	<i>5,594</i>	<i>5,760</i>	<i>5,915</i>	<i>6,229</i>	<i>6,401</i>
Distrito Federal	1.387	1.383	1.379	1.384	1.400	1.414	1.429	1.443	1.470	1.480
	<i>4,351</i>	<i>4,351</i>	<i>4,351</i>	<i>4,380</i>	<i>4,500</i>	<i>4,563</i>	<i>4,599</i>	<i>4,650</i>	<i>4,745</i>	<i>4,782</i>
Total Nacional	0.865	0.874	0.881	0.888	0.900	0.911	0.921	0.955	0.970	0.980
	<i>30,733</i>	<i>31,488</i>	<i>32,174</i>	<i>32,916</i>	<i>34,602</i>	<i>35,405</i>	<i>36,135</i>	<i>36,865</i>	<i>37,595</i>	<i>38,325</i>

[A): Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán

[B): Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nayarit, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas

[C): Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Veracruz

[D): Incluye los municipios de Baja California, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas, que están dentro de la franja de 100 km, al sur del límite internacional con EE.UU.

La generación per cápita diaria de RSU en el Distrito Federal, sin duda el máximo referente urbano del país, es prácticamente el doble de la correspondiente a la zona Sur, que comprende, entre otros, a los estados de Chiapas, Guerrero y Oaxaca, entidades que padecen un rezago más acentuado, en diversos ámbitos, en comparación con otras localidades del país.⁶ No obstante, en esta zona, la Sur, la generación de RSU creció de 2000 a 2009 a un ritmo promedio anual de 2.91%, valor por encima del 2.48% que se tuvo a nivel nacional. Este suceso puede deberse a transformaciones en los estilos de vida de las comunidades, en especial las del ámbito rural, que pueden responder, a su vez, a cuestiones como el vaivén migratorio y el crecimiento económico que lenta y pausadamente va arribando a esta región de México.

⁶ El Consejo Nacional de Evaluación de la Política Social de México (CONEVAL) elabora el Índice de Rezago Social. Se trata de un índice que incorpora distintas dimensiones que caracterizan a la pobreza y que representa una medida relativa de la misma, es decir, da cuenta de la posición de los individuos respecto de otros. El índice sintetiza la información de doce indicadores utilizados en la medición del rezago social, abordando temas como educación, salud y características de la vivienda (CONEVAL, 2007). A través de la desagregación de la información, es posible conocer el grado de rezago a niveles municipal y estatal. Así, los indicadores calculados con base en datos obtenidos del Segundo Censo de Población y Vivienda 2005, señalan que el rezago social es mayor en estados como Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Puebla, y menor en las entidades de Nuevo León, Distrito Federal, Coahuila y Aguascalientes.

Llama la atención lo que sucede en la zona conformada por la franja de municipios que colindan con los EE.UU. Se trata de una región que debido a su proximidad con esa nación, ha experimentado un rápido pero desorganizado proceso de urbanización motivado por el intenso tránsito de personas y mercancías en ambas direcciones de la frontera. Tales situaciones confluyen para que la generación total de RSU en esta área haya crecido, entre los años 2000 a 2009, a un ritmo promedio de 11.16% anual. Asimismo, la generación diaria per cápita de RSU en estos municipios es la segunda más alta del país y aumentó en dicho lapso a una tasa media anual de 1.7%.

En las zonas Centro y Norte del país, que incluyen entidades como Jalisco, Guanajuato, Estado de México, Baja California y Nuevo León, también se ubican centros urbanos de extensión y complejidad considerables. Ahí, la generación diaria de RSU por habitante muestra de igual manera una tendencia creciente. De 2000 a 2009 el incremento promedio anual en este rubro para la zona Norte alcanza un valor de 0.34%. En tanto, para la zona Centro, cuya generación per cápita en 2009 fue la más cercana a la media nacional, la tasa de crecimiento fue de 1.51% anual. Por su parte, la generación per cápita diaria nacional experimentó, en las mismas fechas, un aumento promedio anual de 1.40%, pasando de 0.865 kg/habitante/día en 2000, a 0.980 kg/habitante/día al finalizar el 2009.

La mayor proporción de los RSU que se generan en México proviene de los centros urbanos más densamente poblados y con intensa actividad económica e industrial. A este respecto conviene observar la Figura I.4 que muestra, para el periodo 2000 - 2009, las contribuciones relativas de distintos asentamientos clasificados de acuerdo a su extensión territorial y el tamaño de la población que acogen.⁷ Se advierte que las zonas metropolitanas aportan de manera regular más del 40% de los RSU que se generan a escala nacional, monto al que si se le adiciona el porcentaje con el cual contribuyen las ciudades medias, la cifra se eleva a cerca del 80%.

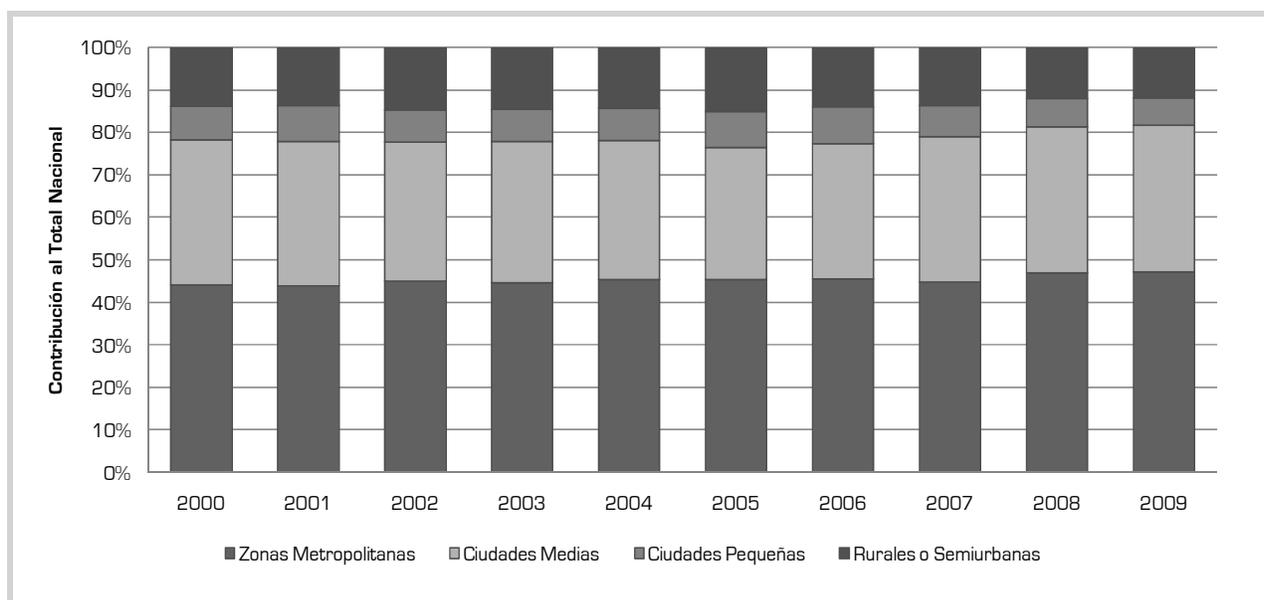


Figura I.4 - Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a)

⁷ Zonas Metropolitanas: Demarcaciones integradas por más de un municipio con una población mayor a 1,000,000 habitantes. Se trata de Tijuana, Ciudad Juárez, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, León, Guadalajara, Monterrey y Puebla. Ciudades Medias: Todas aquellas que formaron parte del Programa 100 ciudades por su importancia están incluidas en el plan estratégico de los gobiernos de los estados. Ciudades Pequeñas: Aquellas mayores a 15,000 habitantes y no incluidas en las denominadas 100 ciudades. Rurales o Semiurbanas: Aquellas cuya población es menor a 15,000 habitantes.

Para el año 2009, la generación de RSU únicamente en las 7 zonas metropolitanas del país representó cerca de la mitad del total nacional, lo cual pone de manifiesto la superioridad en términos del volumen de generación de RSU de los núcleos urbanos del país. En el extremo opuesto, las ciudades pequeñas y las rurales o semiurbanas contribuyeron, en conjunto, con alrededor del 20% de los RSU generados en México en ese mismo año. Se aprecia también que, pese a haber mínimas variaciones, las contribuciones de los diferentes tipos de localidades se mantuvieron prácticamente constantes en el transcurso de la primera década del presente siglo. En algunas zonas, en particular las grandes metrópolis, se detecta un tenue crecimiento en la producción de residuos, el cual deriva de reacomodos en las cifras correspondientes a las otras clases de localidades, evidenciando el ensanchamiento de los centros urbanos como resultado del abandono y desaparición de comunidades rurales.

De manera análoga a lo presentado en la Figura I.2, la Figura I.5 (a y b) expone de la relación entre la generación de RSU y el tamaño de las economías estatales, medido a través de sus respectivos PIB⁸, para cada demarcación del país. De igual modo, se detecta un comportamiento lineal entre ambas variables, el cual resulta todavía más conspicuo en comparación con el observado en los registros por naciones toda vez que hay una menor dispersión en el cúmulo de datos. Entonces, conforme crece el PIB de las entidades, su producción de RSU también aumenta, de tal suerte que los estados con los PIB más altos generan mayor cantidad de RSU. Ello no sorprende debido a que concentran en sus núcleos urbanos mucha de la actividad económica, en especial en los sectores secundario y terciario.⁹

El comportamiento de la generación de RSU en México está igualmente influenciado por el tamaño y razón de crecimiento de su población. A este respecto, la Figura I.6 muestra las tendencias históricas en el número de habitantes y en la generación anual de RSU en el periodo comprendido del año 1995 al 2010.¹⁰ Se manifiesta la anticipada cercanía entre ambas variables, más aún si se considera el hecho de que su coeficiente de correlación lineal asciende a +0.94. Los anteriores hallazgos, por axiomáticos que pudieran parecer, cobran importancia en vista de la proyección del perfil demográfico de México que augura un incremento continuado de la población por lo menos durante los próximos 40 años (ONU, 2011). Asimismo, inquieta el hecho de que persista la superioridad en el ritmo de crecimiento en la generación de RSU con respecto al del aumento poblacional, tal como se sucedió de 1995 a 2010, lapso en el cual la población aumentó anualmente a una tasa media de 1.47% mientras que la producción total de RSU lo hizo a 1.66%.

El aspecto cualitativo de los RSU generados en México se muestra en la Figura I.7, y con mayor detalle en la Tabla I.6. Ambas muestran los cambios históricos en la participación porcentual de los diferentes tipos de materiales dentro del total de los RSU generados en el país durante el periodo que abarca del año 2000 al 2009. De la información reunida se desprende el hecho de que hay ciertos residuos, como los textiles, vidrios y metales, cuya presencia en el caudal nacional de RSU se mantuvo prácticamente constante en el lapso referido, constituyendo, en conjunto, entre el 10–11% del total de los RSU. La cantidad de cartón y productos del papel registrar algunos cambios, sin embargo su magnitud es tal que no alteran de forma notoria su participación en el valor total nacional, misma que se encuentra muy cerca del 14%.

⁸ Producto Interno Bruto; valor total de la producción de bienes y servicios en un periodo y lugar determinados, con independencia de la propiedad de los activos productivos.

⁹ El Sector Secundario engloba a las actividades industriales tales como minería, manufacturas, construcción y suministro de agua, gas y electricidad. Por otro lado, en el Sector Terciario se incluyen al comercio, turismo, transporte, medios de comunicación, servicios financieros, de salud, culturales, entre otros.

¹⁰ Se trata de cifras estimadas a partir de las tasas medias de crecimiento anual poblacional consultadas en INEGI (2011).

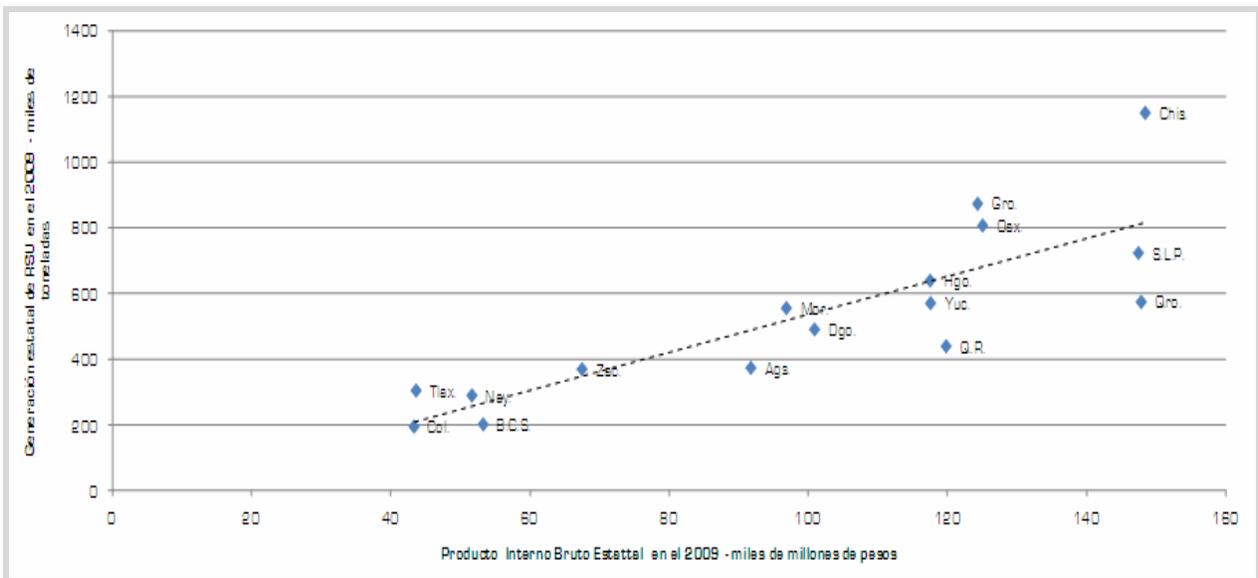


Figura I.5 (a) - Generación de residuos sólidos urbanos y PIB por entidad federativa en México
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a y 2010b)

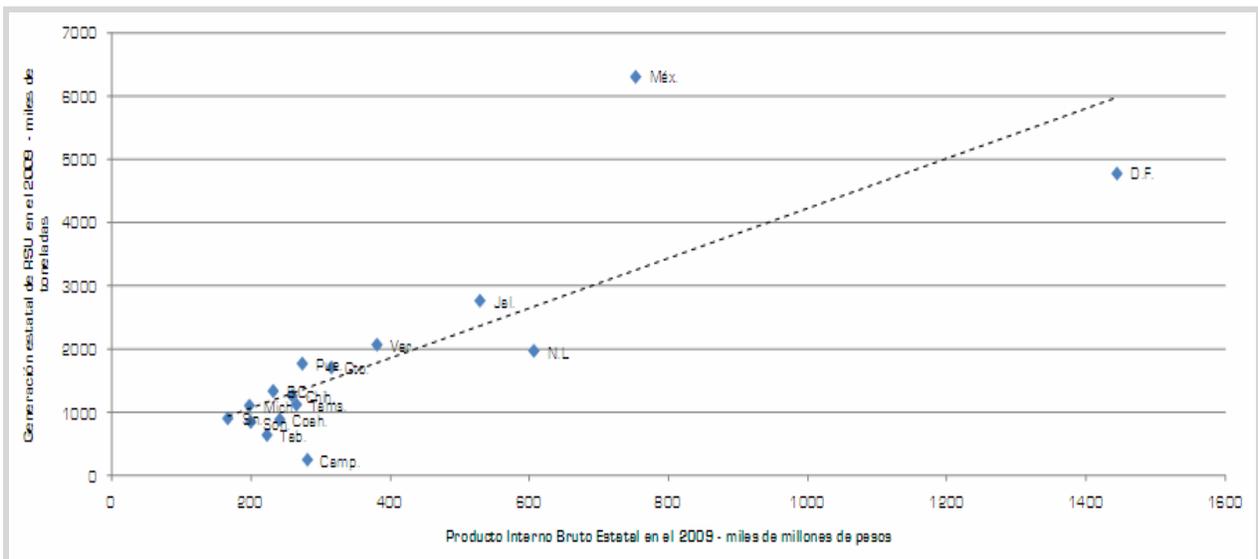


Figura I.5 (b) - Generación de residuos sólidos urbanos y PIB por entidad federativa en México
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a y 2010b)

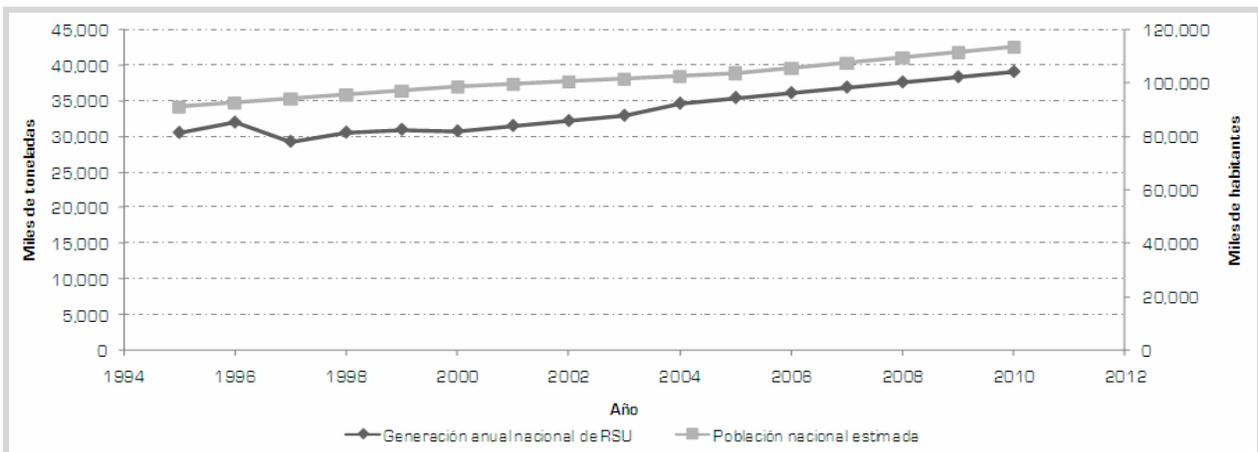


Figura I.6 - Evoluciones demográfica y de la generación total de residuos sólidos urbanos en México
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a y 2011)

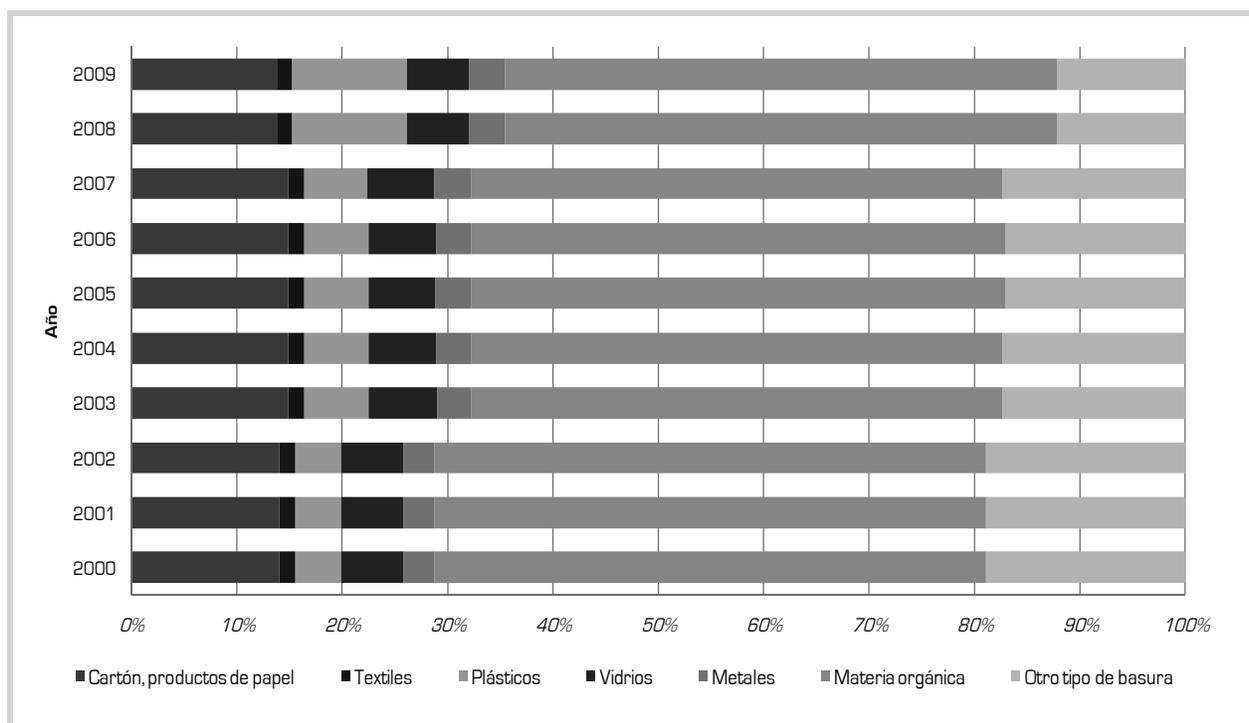


Figura I.7- Composición de los residuos sólidos urbanos generados en México
 (Elaboración a partir de INEGI, 2010a)

Por otro lado, en lo referente a los residuos plásticos se observa un crecimiento por etapas muy significativo. De 2000 a 2002, la proporción de estos materiales representaba poco más del 4% del total anual de RSU. Durante 2003 y hasta 2007, su porcentaje de participación creció por encima del 6%. Para 2008 y 2009, su presencia se elevó hasta alcanzar 10.89% del total de RSU.¹¹ Este importante aumento pudiera deberse a cambios en las metodologías de cuantificación y caracterización de los RSU o un mayor alcance de los servicios de recolección. Aunque, también es cierto que este comportamiento es congruente con los cambios en los hábitos de consumo y la saturación del mercado por parte de artículos con exceso de empaques y embalajes plásticos. Sin embargo, la ostensible disminución en la proporción de la categoría *Otro tipo de basura*, donde se agrupan a desechos como residuos finos, hules, pañales desechables, entre otros, refuerza la idea de que el aumento en la presencia de plásticos obedece más a modificaciones en los criterios de clasificación.

Con respecto a la materia orgánica, conformada por restos de comida, residuos de jardín y materiales de composición similar, conviene destacar que su aportación a la generación nacional de RSU se ubicó por arriba del 50%, registrando una media de 51.48% para los diez años considerados. Este porcentaje se mantuvo bastante estable en el transcurso del periodo de estudio. El alto contenido de materia orgánica en los RSU pone de relieve la importancia, y también la urgencia, que tienen el diseño, la evaluación y la implementación de estrategias integrales que propicien mejores prácticas de recolección, procesamiento y disposición de los residuos sólidos, en especial, de su componente orgánica. Todo ello como parte de un programa de alcance amplio que tenga como una de sus metas centrales la recuperación efectiva de la mayor cantidad posible de materiales presentes en los RSU. Esto ayudará a reducir las cargas ambientales, y también económicas, que impone su gestión así como las afectaciones a la salud y calidad de vida de los habitantes del país.

¹¹ Los porcentajes dados son con base al peso de los residuos, ya que en términos de volumen la participación plásticos asciende hasta a un 40%.

Tabla I. 6.- Cambios en la composición de los residuos sólidos urbanos generados en México

(Elaboración a partir de INEGI, 2010a)

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Total, miles de toneladas	30,733.26	31,488.48	32,173.61	32,915.70	34,603.40	35,405.00	36,085.00	36,865.00	37,595.00	38,325.00
Papel, cartón, productos de papel	4,324.13	4,430.44	4,526.83	4,904.50	5,160.00	5,275.00	5,388.00	5,489.30	5,199.40	5,300.40
	<i>14.07%</i>	<i>14.07%</i>	<i>14.07%</i>	<i>14.90%</i>	<i>14.91%</i>	<i>14.90%</i>	<i>14.93%</i>	<i>14.89%</i>	<i>13.83%</i>	<i>13.83%</i>
Textiles	457.92	469.18	479.39	497	520.1	530	542	552	537.6	548
	<i>1.49%</i>	<i>1.49%</i>	<i>1.49%</i>	<i>1.51%</i>	<i>1.50%</i>	<i>1.50%</i>	<i>1.50%</i>	<i>1.50%</i>	<i>1.43%</i>	<i>1.43%</i>
Plásticos	1,346.11	1,379.20	1,409.20	2,014.40	2,115.80	2,161.80	2,208.00	2,223.00	4,094.10	4,173.60
	<i>4.38%</i>	<i>4.38%</i>	<i>4.38%</i>	<i>6.12%</i>	<i>6.11%</i>	<i>6.11%</i>	<i>6.12%</i>	<i>6.03%</i>	<i>10.89%</i>	<i>10.89%</i>
Vidrios	1,813.25	1,857.82	1,898.24	2,156.00	2,210.00	2,262.00	2,309.00	2,341.00	2,210.60	2,253.50
	<i>5.90%</i>	<i>5.90%</i>	<i>5.90%</i>	<i>6.55%</i>	<i>6.39%</i>	<i>6.39%</i>	<i>6.40%</i>	<i>6.35%</i>	<i>5.88%</i>	<i>5.88%</i>
Metales; de los cuales:	891.26	913.17	933.03	1,046.70	1,160.00	1,186.10	1,210.00	1,298.00	1,293.20	1,318.30
	<i>2.90%</i>	<i>2.90%</i>	<i>2.90%</i>	<i>3.18%</i>	<i>3.35%</i>	<i>3.35%</i>	<i>3.35%</i>	<i>3.52%</i>	<i>3.44%</i>	<i>3.44%</i>
Aluminio	<i>491.73</i>	<i>503.82</i>	<i>514.78</i>	<i>586.15</i>	<i>606</i>	<i>620</i>	<i>633</i>	<i>650</i>	<i>650.4</i>	<i>663</i>
	<i>55.17%</i>	<i>55.17%</i>	<i>55.17%</i>	<i>56.00%</i>	<i>52.24%</i>	<i>52.27%</i>	<i>52.31%</i>	<i>50.08%</i>	<i>50.29%</i>	<i>50.29%</i>
Ferrosos	<i>247.4</i>	<i>253.48</i>	<i>259</i>	<i>282.61</i>	<i>329</i>	<i>336.1</i>	<i>343</i>	<i>410</i>	<i>407.5</i>	<i>415.4</i>
	<i>27.76%</i>	<i>27.76%</i>	<i>27.76%</i>	<i>27.00%</i>	<i>28.36%</i>	<i>28.34%</i>	<i>28.35%</i>	<i>31.59%</i>	<i>31.51%</i>	<i>31.51%</i>
Otros no ferrosos (Incluye cobre, plomo, estaño y níquel)	<i>152.13</i>	<i>155.87</i>	<i>159.26</i>	<i>177.94</i>	<i>225</i>	<i>230</i>	<i>234</i>	<i>238</i>	<i>235.3</i>	<i>239.9</i>
	<i>17.07%</i>	<i>17.07%</i>	<i>17.07%</i>	<i>17.00%</i>	<i>19.40%</i>	<i>19.39%</i>	<i>19.34%</i>	<i>18.34%</i>	<i>18.20%</i>	<i>18.20%</i>
Basura de comida, jardines y materiales orgánicos similares	16,104.09	16,500.00	16,858.97	16,592.80	17,440.80	17,968.00	18,335.00	18,576.00	19,707.30	20,090.00
	<i>52.40%</i>	<i>52.40%</i>	<i>52.40%</i>	<i>50.41%</i>	<i>50.40%</i>	<i>50.75%</i>	<i>50.81%</i>	<i>50.39%</i>	<i>52.42%</i>	<i>52.42%</i>
Otro tipo de basura	5,796.24	5,938.74	6,067.94	5,704.30	5,995.80	6,022.00	6,143.00	6,385.70	4,552.80	4,641.20
	<i>18.86%</i>	<i>18.86%</i>	<i>18.86%</i>	<i>17.33%</i>	<i>17.33%</i>	<i>17.01%</i>	<i>17.02%</i>	<i>17.32%</i>	<i>12.11%</i>	<i>12.11%</i>

Nota: Cifras en cursivas aluden a la contribución que cada categoría hace al monto total nacional de residuos sólidos urbanos.

I.3 - Afectaciones ambientales asociadas a los residuos sólidos urbanos

Factores como el crecimiento económico sostenido, la imparable expansión de las zonas urbanas y asentamientos periféricos, los cambios en los patrones de consumo y estilos de vida de la población, han desencadenado problemáticas en distintos ámbitos. Particularmente inquietantes son las padecidas en el ámbito ambiental. Una de estas problemáticas alude al rápido incremento de la generación y los cambios en la composición de los RSU. El deterioro ambiental vinculado al manejo inapropiado de los RSU se manifiesta con singular énfasis en las afectaciones a los cuerpos de agua, al suelo y a la calidad del aire y composición de la atmósfera.

I.3.1- Efectos sobre los cuerpos de agua

La contaminación¹² de las fuentes de agua proviene fundamentalmente de la inadecuada disposición de las aguas residuales y los desechos sólidos. En México, las principales fuentes de contaminación del agua tienen su origen en la basura que se arroja a los sistemas de alcantarillado y a ríos y lagos, a las descargas de los centros urbanos y las industrias, y a las áreas agrícolas, principales responsables de la contaminación difusa en el país (Arreguín y col., 2010). El agua arrastra consigo una amplia variedad de contaminantes que emanan de los procesos propios de los sectores productivos y de las actividades cotidianas de los hogares. El agua es mezclada con metales, agentes químicos, detergentes, insecticidas, jabones, grasas, materia orgánica, microorganismos, heces fecales, todos ellos altamente nocivos para el equilibrio ecológico y la salud humana. De esta manera, el agua se convierte en un medio transmisor de padecimientos infecciosos de alta morbilidad atribuibles su contaminación química y biológica.

Al estar expuestos, los cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos y presas) son receptores de una enorme cantidad de desechos líquidos y sólidos. De ahí que sean proclives a exhibir problemas graves de contaminación. Esta es una situación alarmante debido a que de estas reservas hídricas se obtiene un porcentaje considerable del total de agua para consumo humano (Jiménez y col., 2010).¹³ La polución de los cuerpos de agua subterránea o acuíferos, por otro lado, involucra la presencia de sustancias contaminantes como el nitrógeno, en todas sus variantes, detergentes, fósforo, coliformes fecales, material orgánico y metales pesados. Las descargas contaminantes junto con la sobreexplotación, degradan significativamente la calidad del agua de acuíferos (Jiménez y col., 2010). Los contaminantes del agua provienen, entre otras, de fuentes difusas como los lixiviados originados por aglomeración de los RSU en sitios no aptos o acondicionados insuficientemente para su vertido.

Los lixiviados se refieren a los líquidos resultantes del contacto de los RSU con agua, ya sea pluvial, superficial o subterránea, y su peligrosidad radica en que pueden arrastrar sustancias tóxicas contaminantes y mezclarse con aguas superficiales o bien infiltrarse hasta alcanzar mantos freáticos cercanos. Asimismo, la basura que muy frecuentemente se acumula en las alcantarillas de las calles provoca azolvamiento, impidiendo así el tránsito de las aguas residuales y pluviales lo cual deviene en inundaciones que son escenarios idóneos para la incubación de patógenos causantes de múltiples enfermedades en los sectores más vulnerables de la población.

¹² Se entiende por contaminación a la presencia en el ambiente de uno o más formas de materia o energía que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna u otro elemento natural, altera o modifica su composición y condición original (Gutiérrez y col., 1997).

¹³ En México, el aporte de estas fuentes asciende al 30% del total, el otro 70% es obtenido de los cuerpos de agua subterráneos (Jiménez y col., 2010).

1.3.2- Efectos sobre el suelo

Los suelos constituyen un elemento crucial para el sustento de los ecosistemas naturales y, por ende, de la humanidad, dado que es el insumo principal para la obtención de los alimentos que consume. Pese a ello, el ser humano inflige numerosas y perniciosas agresiones a los suelos, entre ellas, la utilización de superficies cada vez mayores para el asentamiento de basureros o rellenos sanitarios donde se vierten sin cesar miles de toneladas de desechos. Así, sobre los suelos recae buena parte de las cargas ambientales ligadas a los RSU, como lo es el deterioro por las innumerables sustancias tóxicas desprendidas de los residuos (Gutiérrez y col., 1997). Aunado al devastador impacto visual que conlleva el amontonamiento desmedido de residuos sólidos, su principal afectación a los suelos consiste en la interferencia que ejerce para la realización de los ciclos biogeoquímicos. Esto tiene consecuencias graves dado que dichos ciclos se encargan, con ayuda de la energía solar, del movimiento continuo de elementos y compuestos esenciales para la vida en la Tierra (Gutiérrez y col., 1997; García y Elías, 2005). Las cadenas tróficas, donde participan productores, consumidores y reductores, son esenciales para la circulación de elementos entre la atmósfera, hidrósfera y litósfera.

Los ciclos del agua, oxígeno, nitrógeno, carbono, fósforo y azufre son entorpecidos por la presencia RSU sobre la corteza terrestre. La infinidad de protozoarios, bacterias, hongos e insectos que albergan los suelos, desempeñan funciones imprescindibles en sus distintas capas ayudando con ello a la liberación de carbono, fósforo, nitrógeno, potasio, azufre y magnesio que son aprovechados por organismos superiores. Tratándose de dichos ciclos en donde intervienen microorganismos, el actuar de éstos se ve sensiblemente afectado por la modificación de las condiciones fisicoquímicas de su entorno inmediato, de la cual la diversidad de compuestos existentes en los RSU es una de las principales responsables (Gutiérrez y col., 1997). Con la filtración de lixiviados los suelos se contaminan con metales como estaño y plomo. Además, la proliferación de tiraderos de basura implica que cada vez mayores extensiones de suelo sean cubiertas con gruesas capas de desechos que demorarán en descomponerse hasta millones de años.¹⁴ Son porciones de suelo que quedan inutilizables para otros fines; esto ilustra una más de las formas en que la producción excesiva y el manejo inadecuado de los RSU trastocan el equilibrio ecológico del planeta.

La acumulación de RSU sobre los suelos puede alterar la vida de plantas y animales y constituye una seria amenaza para la salud de los individuos. Esto último se debe a que atrae con facilidad fauna nociva, de distinto género y especie, que es portadora de diversos agentes infecciosos. Especies nocivas, como ratas y moscas, se multiplican en cantidades colosales en tiempos relativamente cortos en sitios donde se aglomeran sin control los RSU. La insalubridad de estos sitios da pie a la proliferación de hongos, bacterias y otros patógenos que pueden desencadenar cuadros infecciosos que, sin la atención médica oportuna y apropiada, pueden ser mortales (Gutiérrez y col., 1997). Las moscas, por ejemplo, se alimentan de materia orgánica en descomposición y son portadoras de gérmenes que causan enfermedades dérmicas, gastrointestinales y respiratorias.¹⁵

1.3.3 - Efectos sobre la calidad del aire y la composición de la atmósfera

Las miles de toneladas de RSU diariamente generadas alrededor del mundo son responsables de un porcentaje considerable de las partículas sólidas que flotan en el ambiente, y que

¹⁴ Esto ocurre con la mayoría de los plásticos como el PVC, los acrílicos, las resinas *epoxy*, el poliestireno, el nylon, el poliéster y el polietileno

¹⁵ Dérmicas, desde irritaciones leves en la piel hasta complicaciones más serias como la tiña corporal; son provocadas por hongos que se adquieren al entrar a lugares donde la acumulación de residuos es permanente. Gastrointestinales, causadas por bacterias e insectos, deterioran la salud del estómago y los intestinos; destacan la amibiasis, cólera, diarrea y tifoidea. Respiratorias, infecciones como laringitis y faringitis.

constituyen uno de los principales contaminantes del aire (Gutiérrez y col., 1997). Asimismo, los microorganismos que se reproducen a consecuencia de la descomposición de los RSU, al ser transportados por el viento, pueden ser inhalados directamente mediante la respiración o depositarse en alimentos, reservorios de agua o cualquier otra superficie que facilite su diseminación y con ello su capacidad infecciosa en tracto digestivo, vías respiratorias y piel de los seres humanos.

La componente orgánica de los RSU, además de favorecer la transmisión de enfermedades y producir olores desagradables, genera gases durante su proceso de descomposición los cuales afectan las propiedades de la atmósfera terrestre. Se trata de gases que participan en la acentuación de problemáticas de escala planetaria como lo es el calentamiento global, al que se le atribuyen los cambios significativos en el sistema climático de la Tierra que se han experimentado en las décadas recientes. El origen del calentamiento global se halla en el fenómeno atmosférico conocido como efecto invernadero, el cual se manifiesta a través de la retención de calor de un modo semejante, y de ahí su nombre, a como ocurre en un invernadero convencional. La explicación de dicho fenómeno es la siguiente: Parte de la radiación de onda corta proveniente del sol es reflejada por la atmósfera de la Tierra, el resto, la mayor parte, logra penetrarla y hacer contacto con la superficie terrestre, donde es absorbida. Luego, la misma superficie re-irradia esa energía con una longitud de onda diferente, esto es, como radiación infrarroja. Una porción de esta radiación saliente logra atravesar la atmósfera, mientras que el otro tanto es absorbido y re-emitado en todas direcciones por las moléculas de los denominados gases de efecto invernadero (GEI), calentando de nueva cuenta las capas bajas de la atmósfera y la superficie del planeta.

A medida que se incrementan las concentraciones de GEI, más radiación infrarroja es absorbida y enviada de vuelta a la Tierra, suscitando así el denominado efecto invernadero intensificado. El aumento en la concentración de los GEI modifica la composición de la atmósfera mundial desatando cambios en el clima de prolongada duración. Aun cuando se señale a la variabilidad natural del clima como la causante de esta alteración, lo cierto es que las actividades humanas, directa e indirectamente, contribuyen en gran medida a maximizarla.¹⁶ El aumento del promedio mundial de las temperaturas del aire y del océano, la fusión generalizada de nieves y hielos, y el crecimiento del promedio mundial del nivel del mar son evidencias inequívocas del calentamiento del planeta (IPCC, 2007). Asimismo, se tienen registradas alteraciones en las tendencias de la precipitación, en la frecuencia e intensidad de algunos fenómenos meteorológicos extremos, así como otros efectos sobre los sistemas físicos y biológicos (IPCC, 2007).

Las primeras reacciones de la comunidad internacional frente al ascenso de la temperatura del planeta producto del crecimiento de las emisiones antropogénicas de GEI, se dieron a principios de los años noventa del siglo pasado. En 1992, en el marco de la Cumbre sobre la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, 186 naciones firmaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC). Sin embargo, la efectividad de las medidas surgidas de la CMCC fue muy limitada dado que no fijaba obligaciones puntuales en términos de reducción de emisiones de GEI. Por tal razón, en 1997 se incorporaron a la CMCC compromisos jurídicamente vinculantes mediante la creación y adopción del Protocolo de Kyoto, que entró en vigor hasta febrero de 2005, y donde se estipula para un grupo específico de países, la disminución de las emisiones de GEI por actividades humanas en un

¹⁶ Para el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el cambio climático denota una alteración identificable en el estado del clima la cual persiste durante un periodo prolongado; dicha alteración puede deberse tanto a la variabilidad natural como a las actividades humanas. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), por otro lado, considera que es todo cambio en el clima atribuible directa o indirectamente a las acciones humana.

5%, como mínimo, por debajo de los niveles de 1990 a lograr en el transcurso del periodo de compromiso, que abarca de 2008 a 2012.

Se tienen identificados diversos gases que aumentan la opacidad infrarroja de la atmósfera¹⁷, empero, son los GEI emanados de las actividades humanas los principales responsables del trastorno climático, a saber: Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoruro de azufre (SF₆) y halocarbonos.¹⁸ La producción de algunos de estos gases se intensificó desde el comienzo de la Revolución Industrial, a consecuencia de la quema de combustibles fósiles, el empleo de fertilizantes nitrogenados y la deforestación a gran escala. El Protocolo de Kyoto persigue la reducción de seis GEI antropógenos, los cuales se presentan en la Tabla I.7. El concepto *Potencial de Calentamiento Mundial* (PCM) hace referencia a las diferencias en cuanto a influencia térmica que poseen los GEI en función de sus propiedades radiativas y periodos de permanencia en la atmósfera; es, pues, es un indicador de la fuerza o intensidad de los GEI. Los PCM de los GEI se precisan para un horizonte temporal dado y están expresados en relación al PMC del CO₂, cuyo valor es la unidad.

En ese contexto, la degradación anaerobia de materia orgánica, como la presente en los RSU, produce, entre otros gases, CH₄ y CO₂, dos de los principales GEI de larga permanencia que inducen el cambio abrupto del sistema climático de la Tierra. El CH₄ se produce de manera natural por la descomposición de materia orgánica en sitios como manglares y pantanos. Sin embargo, la acumulación de grandes cantidades de RSU en tiraderos a cielo abierto o en rellenos sanitarios se convierte también en fuente emisora de ese gas. Esto como resultado de condiciones que suscitan la transformación de la fracción orgánica fermentable de los RSU en biogás, una mezcla de gases compuesta predominantemente por CH₄ y CO₂. De acuerdo con el Informe de Síntesis 2007 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, las emisiones procedentes del sector *Desechos y aguas de desecho*, contribuyeron con el 2.8% del total mundial de los GEI antropógenos emitidos durante 2004 (IPCC, 2007).¹⁹

Ahora bien, es oportuno precisar que las emisiones de CO₂ que provienen de materia orgánica no fósil, lo que se conoce comúnmente como biomasa, no suponen un aumento permanente en la concentración de este gas en la atmósfera. Esto es porque se asume que el CO₂ resultante de las transformaciones de la biomasa por cualquier vía, es parte del volumen constante de carbono que se encuentra en continua circulación entre los elementos del ambiente. De manera que ese tipo de transformaciones de la biomasa sean consideradas como procesos neutrales en términos de emisiones de CO₂ (Mäser y col., 2006; Juárez, 2009). Por el contrario, las emisiones de CH₄ originadas por la descomposición anaerobia de materia orgánica no cuentan con algún proceso natural que se encargue de su reintegración al ecosistema, como sí ocurre con el CO₂ gracias a la fotosíntesis. Por consiguiente, este CH₄ contribuye a agudizar el fenómeno del calentamiento global, y lo hace con un potencial de calentamiento 21 veces superior al del CO₂. En este sentido, con relación a los RSU y como parte de las medidas de mitigación de las emisiones de GEI, se sugiere la captación del biogás

¹⁷ Aun cuando el vapor de agua actúa de modo semejante a un GEI, éste no se incluye en el inventario de sustancias responsables del efecto invernadero ya que su concentración depende del clima (García y Elías, 2005), por lo cual su permanencia en la atmósfera tiende a ser muy variable. Otro gas que actúa como GEI es el ozono (O₃) troposférico, para el cual a la fecha no se tienen objetivos específicos de reducción.

¹⁸ Grupo de gases que contienen flúor, cloro y/o bromo. Destacan los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y los clorofluorocarbonos (CFC). Estos últimos además propician la destrucción del ozono (O₃) estratosférico. Cabe mencionar que por medio de las regulaciones impuestas por el Protocolo de Montreal, un acuerdo internacional orientado a preservar la capa de ozono, se estableció la eliminación gradual de los CFC para finales del siglo XX, por lo cual no aparecen en los inventarios de GEI.

¹⁹ La contribución está expresada en términos de CO₂ equivalente (CO₂-eq), que se define como el nivel de emisión de CO₂ que generaría el mismo efecto de calentamiento que una cantidad dada de otros GEI de larga permanencia o de una combinación de GEI. Las emisiones de CO₂-eq se obtienen del producto entre la cantidad de GEI emitida y su potencial de calentamiento mundial para un horizonte temporal dado.

emanado de rellenos sanitarios, el compostaje de desechos orgánicos, el reciclado y reducción al mínimo de desechos, todo ello en el marco de una mejora en las reglamentaciones en materia de manejo de los residuos sólidos (IPCC, 2007).

Tabla I.7 - Fuentes y principales atributos de los gases de efecto invernadero antropógenos
(Elaboración a partir de IPCC, 1995, 2001 y 2007; García y Elías, 2007)

Gas de efecto invernadero	Orígenes Fuentes antropógenas	Vida media	Potencial de calentamiento mundial*
Dióxido de carbono CO₂	-Quema de combustibles fósiles -Procesos industriales -Cambios de uso de suelo Deforestación	Variable	1
Metano CH₄	-Emisiones fugitivas en la extracción, transporte y procesamiento del gas natural -Descomposición anaerobia de materia orgánica presente en residuos urbanos, agrícolas y pecuarios	12±3 años	21
Óxido nitroso N₂O	-Agricultura: aplicación de fertilizantes nitrogenados, gestión del estiércol -Tratamiento de aguas residuales -Quema de combustibles fósiles -Procesos industriales químicos	120 años	310
Hexafluoruro de azufre SF₆	-Se utiliza profusamente en la industria pesada para el aislamiento de equipos de alta tensión y como auxiliar en la fabricación de sistemas de refrigeración de cables y de semiconductores	3,200 años	23,900
Hidrofluorocarbonos HFC	-Son producidos comercialmente en sustitución de los CFC's -Se emplean en refrigeración y en fabricación de semiconductores	Depende del compuesto; desde 1.5 años (HFC-152a) hasta 264 años (HFC-23)	Depende del compuesto; desde 140 (HFC-152a) hasta 11,700 (HFC-23)
Perfluorocarbonos PFC	-Subproducto de la fundición de aluminio y del enriquecimiento de uranio -Sustituyen a los CFC's en la fabricación de semiconductores	Varía según el compuesto	Varía según el compuesto

* Aplica para un horizonte temporal de 100 años

I.4- Manejo integral de los residuos sólidos urbanos

Las transformaciones industriales, económicas, demográficas, sociales y culturales experimentadas en los últimos 200 años han mejorado en ciertos aspectos la calidad de vida de un sector amplio de la población mundial. No obstante, también han desembocado en severas problemáticas en distintos rubros. En lo ambiental, por ejemplo, el consumo desmedido de satisfactores y el volumen y forma en que éstos son producidos, transportados y comercializados, han provocado un crecimiento permanente de la generación de RSU en todo el orbe. A los elevados costos ambientales, descritos con anterioridad, se añaden los costos económicos y sociales aparejados al manejo de los RSU. La opción más simple y rápida ha sido su confinamiento en inmensos, y en muchas ocasiones precariamente acondicionados, vertederos o rellenos sanitarios. A esta forma de lidiar con los residuos se oponen cada día más voces, surgidas de diversos sectores, quienes abogan por la instrumentación de una óptima gestión de los residuos en la que se fomenten acciones como el reciclaje y la minimización de la generación.

El concepto de manejo de los residuos alude a las diferentes fases del ciclo de vida de estos materiales, desde que se generan hasta que se recolectan, almacenan, transportan, tratan y disponen en algún sitio (INE-SEMARNAT, 2001a). Para que el manejo de los RSU se efectúe de manera integral y sustentable se requieren de métodos de recolección y procesamiento que conlleven beneficios ambientales, optimización económica y aceptación social dentro de un esquema de manejo práctico para cualquier región y en concordancia con las necesidades y contextos locales y los ordenamientos de las políticas ambientales en la materia (INE-SEMARNAT, 2001a).

Las estrategias son complementarias, y van desde el reuso y el reciclaje, los tratamientos aerobio y anaerobio, la incineración con recuperación de energía, hasta, en última instancia, la disposición final en rellenos sanitarios (Figura I.8). Su implementación efectiva permitiría dar cumplimiento al objetivo central del manejo integral de los residuos sólidos. Este concepto de manejo integral de los residuos sólidos se refiere a hallar los mecanismos económica y ambientalmente más apropiados para separar y aprovechar los componentes de los desechos que posean algún valor. Con ello se logra desviar una cantidad importante de residuos del relleno sanitario, a la par de evitar o aminorar, tanto como sea posible, los impactos adversos sobre el entorno natural (INE-SEMARNAT, 2001a y b).

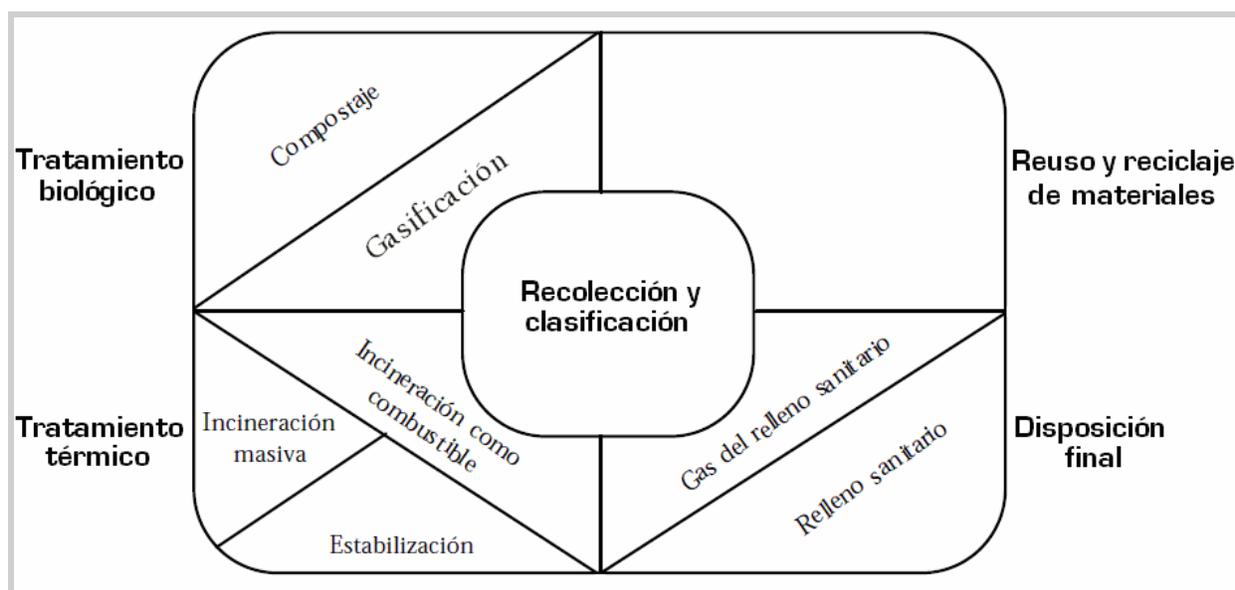


Figura I.8 - Estrategias para el manejo integral y sustentable de los residuos sólidos
(INE-SEMARNAT, 2001a)

A través de una evaluación de las bondades, limitantes y potenciales impactos de las distintas opciones para el manejo de los desechos, es posible ordenarlas jerárquicamente con la finalidad de contar así con un marco de referencia sobre el cual sustentar las decisiones en torno del manejo de los residuos sólidos. La jerarquía del manejo de los RSU que ha prevalecido durante por lo menos el último cuarto de siglo, pone en primer término la reducción en la fuente, seguida del reuso, el reciclaje, el tratamiento, y la disposición en sitios sanitarios controlados como última opción (Figura I.9). Sin embargo, es importante mencionar que dicha jerarquía no debe ser vista como un esquema rígido y único. Se trata más bien como un catálogo de alternativas disponibles para el manejo de los RSU. La preferencia por alguna de estas alternativas y su eventual implementación, dependerán de los elementos que configuran las circunstancias particulares de las localidades en donde se pretenden poner en práctica (INE-SEMARNAT, 2001).



Figura I.9 - Jerarquía del manejo de los residuos sólidos urbanos
(Careaga, 1993)

1.4.1 - Reducción en la fuente

Evitar la generación de RSU constituye indudablemente un aporte sustancial en la búsqueda del establecimiento de un esquema de gestión o manejo integral de este tipo de residuos.²⁰ La reducción en la fuente considera aspectos cuantitativos y cualitativos, lo que equivale a disminuir la toxicidad de los residuos; pero su trascendencia va más allá. La reducción en la fuente contribuye a acrecentar la conciencia pública en torno de las implicaciones inherentes al manejo de los residuos. Las iniciativas de reducción de RSU deben concebirse desde un enfoque amplio que remita al ciclo de vida de los productos o materiales, a fin de no trasladar únicamente la problemática de un lugar a otro. Asimismo, exigen una evaluación y modificación de los patrones de consumo predominantes en la población. Bien diseñadas y ejecutadas, las medidas de reducción en la fuente son de las más efectivas para disminuir el volumen de desechos y los costos asociados a su manipulación e impactos ambientales (INE-SEMARNAT, 2001b).

Las estrategias de reducción de residuos pueden instaurarse en distintos momentos o fases del ciclo de vida de los productos, a saber:

- a) **Reducción en la fabricación:** Diseñar y elaborar los productos empleando la menor cantidad posible de materiales con objeto de minimizar la generación de residuos cuando sean utilizados por los consumidores. Asimismo, simplificar el embalaje de los productos y usar materiales para éste de menor impacto ambiental.
- b) **Reducción en la fuente generadora:** Realizar las compras con criterios ecológicos y optar por la reutilización de productos y materiales.

1.4.2- Reutilización y reciclaje

Se entiende por reutilización o reuso el acto de aprovechar al máximo los artículos, buscándoles nuevas y diversas aplicaciones antes de desecharlos. El reciclaje, por otro lado, consiste en el reprocesamiento de los residuos de interés comercial para la fabricación de nuevos productos. El reciclaje se limita entonces a aquellos desechos materiales que tienen un valor de mercado que alienta su acopio. Las ventajas vinculadas al reciclaje son más atractivas

²⁰ En sentido estricto, la reducción o minimización de la generación en la fuente antecede al manejo de los residuos sólidos y no es parte de él, ya que incide en el volumen generado y en la naturaleza misma de los desechos (INE-SEMARNAT, 2001a).

cuando los residuos se componen de materiales valorizables limpios y disponibles en cantidades significativas, como ocurre en el ámbito comercial e industrial (INE-SEMARNAT, 2001b). Los residuos generados en casas habitación se componen de pequeñas cantidades de distintos materiales mezclados, y por lo general contaminados, dificultando su eventual reciclaje.

En ciertos casos, sin embargo, el reciclaje puede llegar a tener algunos aspectos negativos que suelen ser ignorados debido a la inclinación a sobrevalorar su aporte al manejo integral de los residuos (INE-SEMARNAT, 2001a). El reciclaje tiene el potencial para contribuir a la conservación de los recursos e impedir que materiales útiles contenidos en los residuos se envíen a disposición final. No obstante, el reciclaje es un proceso complejo que consume recursos y energía durante la selección, limpieza, transporte y reprocesado de los materiales reciclables, y además también genera desechos. La excesiva confianza depositada en el reciclaje ha impulsado el surgimiento de estrictas legislaciones que, en algunos casos, no redundan en beneficios ambientales ni económicos.²¹ La contribución ambiental de reciclar está supeditada al tipo de material y a las tasas de aprovechamiento, sin olvidar que elevadas tasas de reciclaje no conducen necesariamente a mejoras ambientales sustantivas (INE-SEMARNAT, 2001a).

Los residuos materiales que alcanzan cierto valor económico hacen atractivo su reciclamiento, dando origen a los mercados más pujantes del reciclado. Entre estos materiales se encuentran: Papel, metales ferrosos, aluminio, vidrio y plásticos (polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (PEAD), policloruro de vinilo (PVC) flexible y polipropileno (PP)).

1.4.3- Tratamiento

El conjunto de residuos descartados en plantas de clasificación o etapas previas del manejo de RSU suele llamarse rechazo. Se trata de un material heterogéneo difícil de administrar a menos que se envíe directamente a disposición final en rellenos sanitarios. En este sentido, el tratamiento es una etapa intermedia que convierte a los residuos en otros de más fácil proceso. Se debe entender por tratamiento a las transformaciones de tipo físico, químico o biológico mediante las cuales se espera conseguir beneficios sanitarios y económicos al minimizar o eliminar parte de los efectos nocivos de los residuos sobre el medio ambiente y la salud pública (INE-SEMARNAT, 2001a). Se distinguen tres variantes principales en el tratamiento de los residuos: el mecánico, el térmico y el biológico.

1.4.3.1- Tratamiento mecánico

El tratamiento mecánico es una vía relativamente sencilla e inmediata para resolver, en particular, la problemática asociada a la falta de espacios donde confinar los RSU. Los compactadores y trituradores son instalaciones donde se efectúa el tratamiento mecánico de los RSU (Figura I.10). En un inicio, la maquinaria para estos propósitos era muy costosa dado que se manufacturaba sólo en algunos países y tenía gastos de operación y mantenimiento sumamente elevados. Estas circunstancias contribuyeron a limitar su utilización (Gutiérrez y col., 1997). Con el transcurso del tiempo, las tecnologías para el tratamiento mecánico de los residuos se volvieron más accesibles, en parte por las fuerzas del mercado, y otro tanto por la mejora y simplificación de los diseños.

²¹ En INE-SEMARNAT (2001a) se reseña un caso acontecido en Alemania. Ahí, el reciclado forzoso de empaques de plástico ha resultado en costos aproximados de 500 dólares por tonelada de plástico reciclado. Ello representa 200 dólares más que el costo del material virgen, mismo que no es compensado por beneficios ambientales.



Figura I.10 - Esquema simplificado del tratamiento mecánico de los residuos sólidos urbanos
(Elaboración a partir de INE-SEMARNAT, 2001b)

El tratamiento mecánico permite que, por ejemplo, los desechos sólidos que en condiciones normales llenarían un contenedor de 200 litros, sean convertidos en un tabique o *block* de tan sólo 60x15x20 cm (18 dm³). Ello implica menos de la décima parte del volumen regular de los residuos sólidos. Por consiguiente se reducen los costo debidos a su acarreo, en un porcentaje cercano al 58% (Gutiérrez y col., 1997). Con esta medida, un camión que normalmente transportaría entre 4 y 5 t de residuos tal cual se generan, mediante la compactación, podría trasladar una carga de por lo menos el doble de la habitual.

1.4.3.2- Tratamiento térmico

Abarca una variada gama de procesos en los cuales los residuos se someten a la acción del calor. Algunos son de tipo exotérmico y otros endotérmicos, que dan como resultado productos de conversión en estado gaseoso, líquido y sólido (INE-SEMARNAT, 2001b; García y col., 2005). Los objetivos centrales de dichos procedimientos son la estabilización del residuo y la disminución final de su peso y volumen, para este último, la reducción puede ser hasta de un 90% (INE-SEMARNAT, 2001b). Con esto se consigue un aligeramiento de la carga heredada a las etapas posteriores del manejo de los residuos, como sucede con la disposición final, al extender la vida operativa de los rellenos sanitarios. De manera complementaria, en los métodos exotérmicos, es factible la recuperación y aprovechamiento de la energía excedente.

Las opciones de tratamiento térmico se clasifican de acuerdo al rango de temperaturas de operación (García y col., 2005):

- a) Procesos de baja temperatura** (menor a 300° C). Su propósito es el secado o desinfección del residuo; asimismo, se incluyen algunos procesos de oxidación (combustión) en fase húmeda.
- b) Procesos de media temperatura** (entre 400 y 1,400° C). Permiten la reducción de peso y volumen de los residuos sólidos; pertenecen a este grupo los procesos convencionales de gasificación, incineración y pirólisis (termólisis).
- c) Procesos de alta temperatura** (entre 1,000 y 3,000° C; 20,000° C en el caso de la tecnología de plasma). Su finalidad es la inclusión del residuo en una estructura cerámica o vitrificada. Otras variantes son la co-incineración y el plasma térmico.

Puesto que se trata de técnicas comúnmente empleadas en el ámbito del manejo de los residuos sólidos, enseguida se abordan, de manera muy superficial, los procesos convencionales de tratamiento térmico de media temperatura.

a) Incineración

La incineración se define como un proceso exotérmico que se vale de la oxidación química de los residuos sólidos en presencia de abundante aire u oxígeno (Figura I.11). Los productos finales incluyen gases calientes de combustión formados mayoritariamente por nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua, así como rechazos no combustibles y materia inerte. El costo de la incineración de los RSU es de 10 a 15 veces más alto que la disposición en rellenos sanitarios (INE-SEMARNAT, 2001b). Sin embargo, los sistemas modernos de incineración de residuos sólidos ofrecen la posibilidad de recuperar energía a través del intercambio del calor que portan los gases de combustión, con lo cual se alcanza a cubrir una porción de los gastos de operación y mantenimiento de las instalaciones.

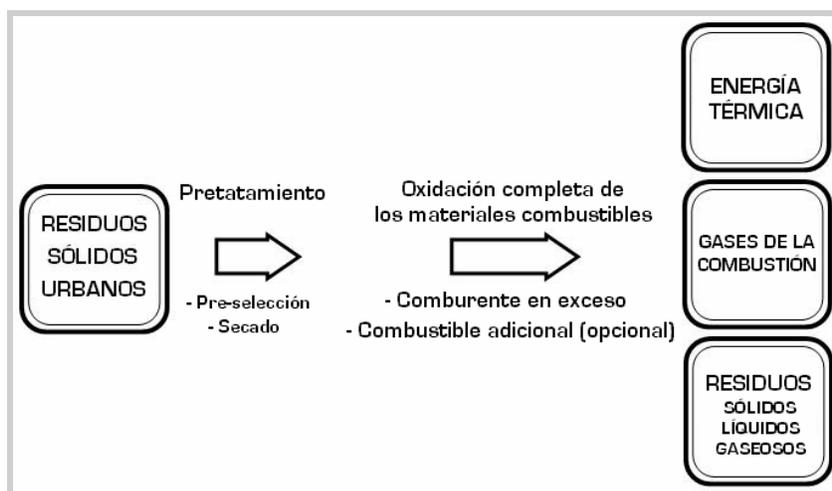


Figura I.11 - Esquema simplificado del proceso de incineración de los residuos sólidos urbanos
 [Elaboración a partir de INE-SEMARNAT, 2001b]

No obstante, las afectaciones ambientales se erigen como los principales impedimentos al despliegue masivo de los sistemas de incineración de RSU. La producción y liberación de compuestos como dioxinas, furanos y otros contaminantes, son los principales motivos de rechazo a la incineración de RSU en todo el mundo (Tangri, 2005).²² Esto sucede aun cuando se evite la presencia de compuestos peligrosos en los residuos a incinerar, y pese a la operación de equipos costos y sofisticados para el control de emisiones. A ello se añaden las consideraciones de diseño y desempeño global en función de la existencia o no de la unidad de recuperación de energía (INE-SEMARNAT, 2001b). Se debe tener en cuenta que los procesos de tratamiento térmico generan residuos líquidos y sólidos que exigen una disposición adecuada, en razón de su composición, peligrosidad y normatividad vigente (INE-SEMARNAT, 2001b). Algunas clases de cenizas producto de la incineración de RSU pueden ser usadas como agregados en la fabricación de materiales de construcción. Aunque la mayoría de ellas requieren un tratamiento posterior, ya sea mediante vitrificación, solidificación o extracción química, en virtud de su elevada concentración de metales y sales.

Las peculiaridades anteriores conducen a que, típicamente, los proyectos de incineración de RSU sean una alternativa costosa y de lenta implementación, incluso bajo el supuesto de que

²² Las dioxinas y furanos son los contaminantes más conocidos asociados a los incineradores. Altamente tóxicos, ambos se catalogan como compuestos orgánicos persistentes y causan una gran variedad de problemas en la salud: Cáncer, daños al sistema inmunológico, así como problemas reproductivos y en el desarrollo. Las dioxinas y furanos se biomagnifican, lo que significa que transitan a lo largo de la cadena trófica, concentrándose en los productos a base de carne y lácteos y, finalmente, en los humanos. Los incineradores de RSU también son una fuente importante de contaminación con mercurio, poderosa neurotoxina que deteriora las funciones motoras, sensoriales y cognitivas. Los incineradores de RSU son igualmente una fuente significativa de otros metales pesados como plomo, cadmio, arsénico, cromo y berilio. Otros contaminantes emitidos por los incineradores incluyen: Variantes de hidrocarburos halogenados, gases ácidos, efluentes particulados y GEI. Hay que decir que a caracterización de las emisiones contaminantes de los incineradores se halla aún incompleta, y muchos compuestos no identificados están presentes en las emisiones al aire y en las cenizas (Tangri, 2005).

no tropiece con barreras durante su desarrollo (INE-SEMARNAT, 2001b). Otros inconvenientes asociados a la incineración pueden surgir del hecho de que su construcción a menudo involucra algún tipo de contrato llave en mano o de servicio total.²³

La integración de la incineración, y en general de cualquier opción de tratamiento térmico, a los esquemas de manejo de los RSU es probable que despierte más controversias y oposición social que cualquier otro de los métodos para el tratamiento de los RSU (INE-SEMARNAT, 2001b). Por una parte, debido a los riesgos ambientales y a la salud humana que se les adjudican a los contaminantes producidos, y por otra, al surgir la percepción de que el tratamiento térmico de los desechos desalienta los esfuerzos orientados al reciclamiento de los materiales.

b) Gasificación

La gasificación, en tanto, es apta para los residuos con un alto contenido de carbono. Esta modalidad de tratamiento térmico consiste en someter a los RSU a un proceso de oxidación parcial a temperatura elevada, entre 600 y 1,000° C. Para tal efecto, se necesita una aportación externa de calor. Al término de la gasificación se obtiene una mezcla de gases de descomposición dotada de un poder calorífico (PC) moderado, junto con un residuo sólido que igualmente puede ser combustible (Figura I.12).

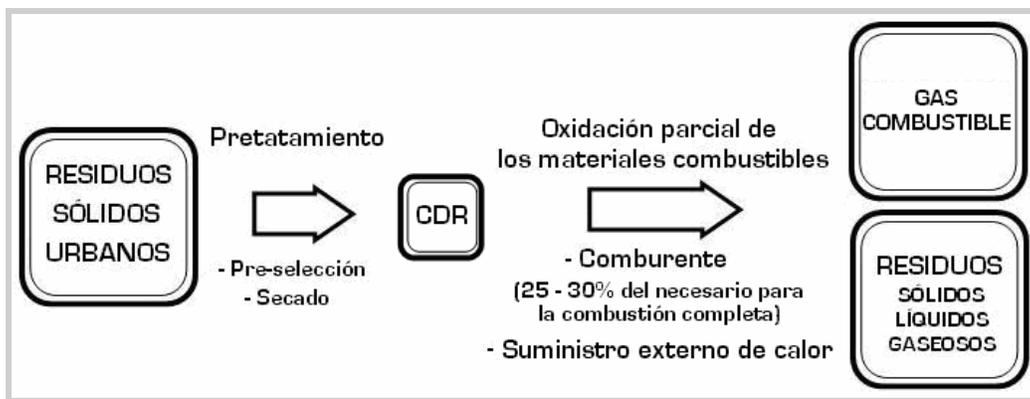


Figura I.12 - Esquema simplificado de la gasificación de los residuos sólidos urbanos (Elaboración a partir de INE-SEMARNAT, 2001b)

La mezcla de gases está compuesta de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), vapor de agua, nitrógeno (N₂) y pequeñas cantidades de hidrocarburos que al enfriar conforman una fase de condensados. Las proporciones de cada uno de ellos y, por ende, el poder calorífico de la mezcla resultante, está en función de las condiciones de operación y del agente oxidante (comburente) utilizado. Así, cuando se utiliza aire el gas producido posee un PC equiparable al 25% del correspondiente al gas natural; si se elige oxígeno o aire enriquecido, el PC se incrementa, en razón de la ausencia de N₂, acercándose al 40% del PC inferior (PCI) del gas natural.²⁴

²³ Un *Contrato Llave en mano* implica que un solo contratista asume la total responsabilidad del diseño y de la construcción del proyecto. Una modalidad de contrato que va más allá es el *Contrato de servicio total*, en el cual el contratista diseña, construye y opera las instalaciones en cuestión durante un número pactado de años. La experiencia que se tiene en muchas áreas con este tipo de contratos, en especial con los *Llave en mano*, no es muy positiva. Constantemente hay retrasos en la construcción y entrega de las obras, el diseño y calidad de las mismas suelen ser en general deficientes, contabilizan cobros excesivos y a la larga impactan de manera negativa a la industria y mano de obra calificada nacionales. Una exposición más amplia en torno de estos y otros inconvenientes ligados a los proyectos *Llave en mano*, en particular dentro del sector energético nacional, puede encontrarse en Saxe-Fernández (2009).

²⁴ Al hablar del poder calorífico (PC) cantidad de energía térmica por unidad de masa o volumen de un combustible, suele hacerse la distinción entre PC inferior y PC superior. En términos simples, el PCI considera las pérdidas de calor asociadas al

A fin de obtener mejores rendimientos, la gasificación de los RSU precisa el retiro previo de buena parte de la fracción fermentable así como de materiales inertes, principalmente vidrio y metales (Elías y Velo, 2005). Es de esta manera como se obtiene el denominado Combustible Derivado del Rechazo (CDR, que por sus siglas en inglés es RDF, *Refuse Derived Fuel*), una mezcla de materiales combustibles con un poder calorífico considerable.

Además de permitir la reducción del volumen de los residuos, el interés en la gasificación radica en la posibilidad de aprovechar residuos de naturaleza heterogénea para producir un gas combustible susceptible de ser depurado, acondicionado y luego quemado en condiciones óptimas y así generar energía. No obstante, la gasificación tiene potenciales efectos adversos sobre el ambiente. Entre éstos la producción de lixiviados en el punto de recepción y almacenamiento de los residuos, la generación de aguas residuales en la etapa de depuración de gases, y la producción de escorias y cenizas con alta concentración de metales pesados y otros compuestos tóxicos (García y col., 2005).

En principio, la gasificación es un proceso más versátil y flexible que la incineración, sobre la cual tiene la ventaja de que sus condiciones de operación no dan lugar a la formación de dioxinas o furanos. Sin embargo, con frecuencia se aduce la falta de disponibilidad de datos duros que respalden con solidez esa afirmación, es indicativo de que en realidad se liberan emisiones similares a las registradas en la incineración convencional (JC, 2008; GP, 2010).

c) Pirólisis

La tercera alternativa para el tratamiento térmico de los residuos es la pirólisis. Aquí, los desechos se degradan termoquímicamente en una atmósfera con escasa o nula presencia de oxígeno (Figura I.13). La pirólisis es un proceso endotérmico que se desarrolla a temperaturas de entre 400 y 800° C, generándose una mezcla gaseosa en la cual destacan el CO₂, CO, H₂ y CH₄. Adicionalmente, se producen remanentes líquidos y sólidos en porcentajes variables dependiendo de la naturaleza de los residuos, de la temperatura y la eventual existencia de trazas de oxígeno en la cámara pirolítica. Los datos expuestos en la Tabla I.8 indican que a medida que la temperatura de operación es más elevada, la proporción de gases y su PC también ascienden. Conviene mencionar que al igual que ocurre con la gasificación, los gases arrojados por la pirólisis de RSU requieren ser depurados si se pretende generar energía con su combustión.

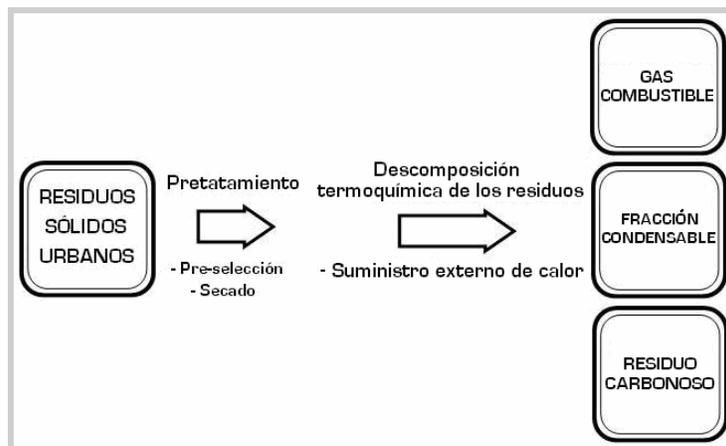


Figura I.13 - Esquema simplificado de la pirólisis de residuos sólidos urbanos
(Elaboración a partir de INE-SEMARNAT, 2001b)

vapor de agua formado en la combustión. Por otro lado, el PCS es el calor que se obtiene cuando el contenido de humedad del combustible ha sido retirado previamente.

Tabla I.8 - Porcentajes de los subproductos de la pirólisis en función de la temperatura de operación (UPC, 2000)

Temperatura, ° C	Gases, %	Líquidos, %	Sólidos, %	PCI*, MJ/kg
500	12.3	61.1	24.7	1.39
650	18.6	59.2	21.8	2.63
800	23.7	59.7	17.2	3.33
900	24.4	58.7	17.7	3.05

*PCI: Poder calorífico inferior del gas generado.

Además de otros impactos negativos, muy similares a los ligados a las dos opciones anteriores para el tratamiento térmico de los RSU, el de mayor importancia en el caso de la pirólisis tiene que ver con su residuo carbonoso conocido como coque o *char*. En la pirólisis de determinados residuos, el *char* remanente puede llegar a representar inclusive el 60% en términos de masa con respecto al material entrante. A ello se añade el hecho de que el *char* actúa como sumidero de metales, por lo que su post-tratamiento se torna conflictivo (García y col., 2005). Los efluentes líquidos que arrastran consigo alquitrán o una mezcla aceitosa de ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos, son también objeto de procesamiento adicional, gracias al cual es factible obtener una variedad de aceite combustible sintético (INE-SEMARNAT, 2001b).

La complejidad de los sistemas pirolíticos se manifiesta en un cuantioso monto de inversión y dificultades para garantizar una alimentación uniforme a partir del caudal conformado por los RSU. Estos parecen ser los motivos principales por los cuales el éxito de la pirólisis como técnica para el tratamiento de residuos ha quedado lejos del deseado por sus promotores (INE-SEMARNAT, 2001b).

1.4.3.3 - Tratamiento biológico

El tratamiento biológico está enfocado a la fracción orgánica “húmeda” de los RSU. Como ya se dijo, esta fracción está compuesta por los desechos provenientes de la preparación y consumo de alimentos y de aquellos que surgen de la limpieza y poda de áreas verdes y jardines. El volumen y composición de la fracción orgánica, según se mencionó en apartados anteriores, varía notoriamente entre zonas geográficas y estaciones del año. Mientras que en buena parte de los países industrializados esa fracción representa entre 20 y 30% del total de los RSU, en los países en desarrollo por lo común supera el 50%. Por tal motivo, el desvío oportuno de los residuos orgánicos presentes en los RSU es benéfico en el sentido de que conduce a una reducción sustancial del volumen de residuos que requieren manejo. Asimismo, se mejora la estabilización de los materiales orgánicos y se pueden obtener múltiples productos útiles o habilitar procesos de recuperación de energía. Las principales técnicas para el tratamiento biológico de los RSU son las de tipo aerobio y anaerobio. Otras opciones son la lombricultura y la crianza de cerdos, esta última es una alternativa que ha sido poco investigada e implementada (Campos y col., 2005).

a) Sistema aerobio

Uno de los métodos básicos para tratar la fracción orgánica de los RSU es el método aerobio, el cual se lleva a cabo en presencia de aire u oxígeno. Sin duda, la técnica más representativa de esta vertiente del tratamiento biológico de los RSU es el compostaje (Figura I.14). El compostaje es la descomposición de la materia orgánica efectuada por microorganismos aerobios bajo condiciones controladas que coadyuvan a incrementar la temperatura en rangos tales que se acelera la desintegración de la materia orgánica y se garantiza la destrucción de buena parte de los patógenos. También se vigilan los niveles de oxigenación y de humedad con la finalidad de reducir el potencial de generación de olores desagradables. En el transcurso del

proceso, la materia orgánica es transformada a un material semejante al humus²⁵ (compost) que reporta extraordinarios beneficios para el suelo, entre los que se destacan su aporte al crecimiento saludable de las plantas y su capacidad de retención de agua (INE-SEMARNAT, 2001b).

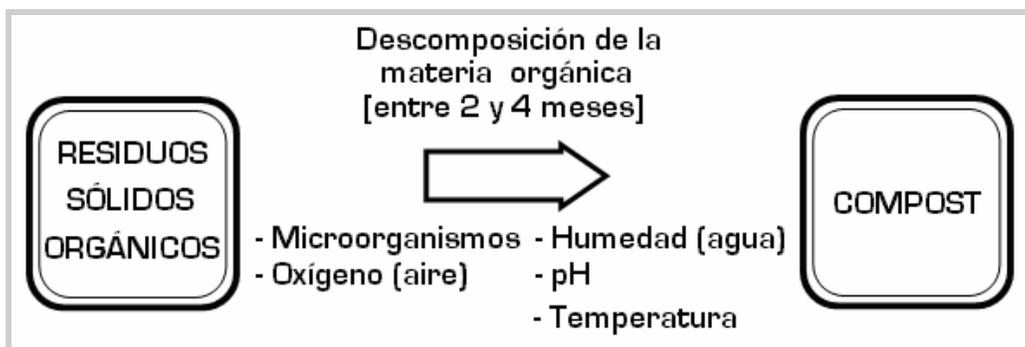


Figura I.14 - Esquema simplificado del proceso de compostaje de residuos orgánicos
(Elaborado a partir de INE-SEMARNAT, 2001b)

Los réditos derivados de la introducción del compostaje en un sistema de manejo integral de los RSU están supeditados en gran medida a la calidad del compost producido y la disponibilidad de mercados para su colocación (INE-SEMARNAT, 2001a). Por lo general, el compost de alta calidad, elaborado a partir de fracciones seleccionadas de los RSU, tiene vastas aplicaciones, es fácilmente comercializable y alcanza un buen precio en el mercado. Por el contrario, el compost de baja calidad, hecho a partir de residuos mezclados, tiene usos, si acaso, muy limitados.

De acuerdo al volumen del residuo orgánico a tratar se elige el método de preparación más apropiado, pudiendo ser manual, para pequeñas cantidades, o mecánico, cuando se precisa procesar grandes cantidades de materia orgánica en corto tiempo. A fin de elaborar una composta de calidad aceptable, es indispensable disponer de una combinación de compuestos de alta y baja relación carbono/nitrógeno (C/N), definida ésta por las características y propiedades de la materia prima de origen animal o vegetal (Tabla I.9). Conviene apuntar que los residuos con una baja relación C/N, en general, se descomponen más rápido que los de alta relación C/N. Para la preparación del compost, la mezcla adecuada de residuos debe poseer una relación C/N inicial de entre 25 y 50, aunado a un porcentaje de humedad del 50% (INE-SEMARNAT, 2001b). Dado que se trata de un tratamiento aerobio, el material bajo proceso requiere una aireación apropiada y suficiente mediante la cual se suministre el oxígeno que demandan los microorganismos partícipes de la degradación.

Tabla I.9 - Relación C/N de algunos componentes orgánicos presentes en los residuos sólidos urbanos (OMS, 1997)

Alta relación C/N	<i>Cáscara de papa, cáscara de plátano, hojas secas de árboles, residuos de caña de azúcar, papel, paja, ramas, residuos de algodón, fibras de coco, cáscara de cacahuete</i>
Baja relación C/N	<i>Plantas frescas, vísceras de pescado, sangre deshidratada, vísceras de pollo, residuos de leche o productos lácteos, residuos de cerveza, vísceras de res, alga marina</i>

²⁵ Materia orgánica resultante de la descomposición de sustancias animales y vegetales llevada a cabo por las bacterias del suelo. El humus está compuesto por 60% de carbono, 6% de nitrógeno y cantidades traza de fósforo y azufre. Según el origen de la materia orgánica, el tipo de organismos que intervienen en su descomposición y el grado de incorporación en el suelo mineral, se distinguen diversas clases de humus, todas ellas muy apreciadas en la agricultura debido a que aumentan la fertilidad de la tierra y la capacidad de ésta para retener agua (Daintith, 1982).

b) Sistema anaerobio

La otra vertiente más socorrida del tratamiento biológico es la de naturaleza anaerobia (Figura I.15). La degradación anaerobia de los residuos orgánicos es una tecnología que requiere de una infraestructura y un conocimiento técnico relativamente especializados, esto en comparación con el tratamiento aerobio, aunque ofrece ventajas sumamente atrayentes. Una de ellas consiste en que, aplicado a residuos orgánicos de alta carga, manifiesta un balance energético positivo, y por consiguiente es un proceso productor neto de energía gracias a la obtención del que es sin duda el más importante de sus subproductos, el biogás, una mezcla gaseosa combustible que tiene al metano como su principal constituyente (Campos y col., 2005).

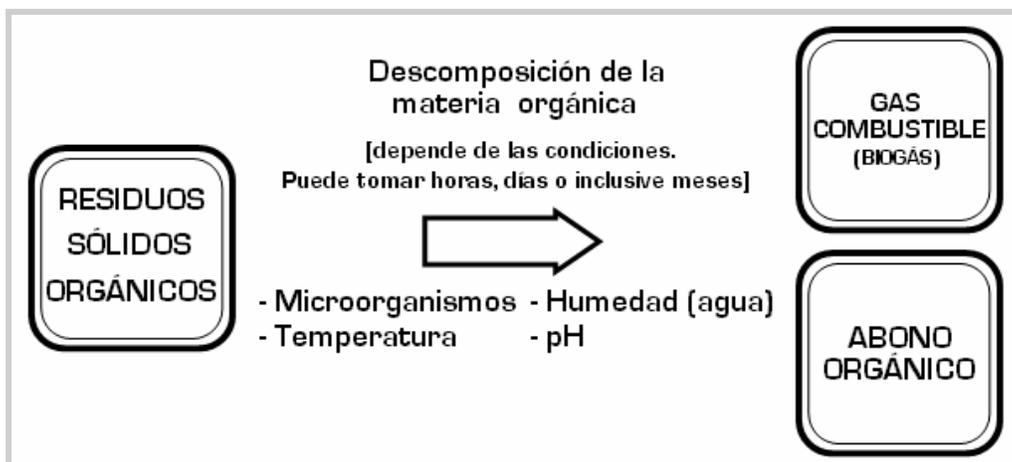


Figura I.15 - Esquema simplificado del proceso de degradación anaerobia de residuos orgánicos
(Elaboración a partir de INE-SEMARNAT, 2001b)

En el terreno ambiental, el tratamiento anaerobio controlado de la fracción orgánica de los RSU contribuye a mitigar las emisiones de GEI y de otros gases asociados a su proceso natural de descomposición (Tabla I.10). Asimismo, también ha mostrado ser un método eficiente para el control de olores desagradables (Wilkie, 1998). Con relación a los aspectos sanitarios, la destrucción de patógenos mediante descomposición anaerobia está subordinada a la temperatura de digestión, siendo más efectiva a medida que aumenta la temperatura.

Tabla I.10 - Comparativa de emisiones de compuestos volátiles de los tratamientos aerobio y anaerobio
(Elaboración a partir de De Baere, 1999)

Compuesto	Tratamiento aerobio	Tratamiento anaerobio	Relación aerobio/anaerobio
	g/t de residuo	g/t de residuo	g/t de residuo
Alcoholes	283.60	0.033	8,593.90
Cetonas	150.40	0.466	322.70
Terpenos	82.40	2.200	37.50
Ésteres	52.70	0.003	17,566.70
Orgánicos sulfurados	9.30	0.202	46.00
Aldehídos	7.50	0.086	87.20
Éteres	2.60	0.027	96.30
Total COV*	588.50	3.017	195.10
Amoniaco	158.90	97.600	1.60
Total	747.40	100.617	7.40

*COV: Compuestos orgánicos volátiles

El tratamiento anaerobio de los residuos sólidos orgánicos comenzó a implementarse desde los años ochenta del siglo pasado. Desde entonces, la mayor expansión de esta tecnología se registra en unidades a nivel doméstico, particularmente en países del continente asiático. Aunque también están los sistemas a pequeña y mediana escala que atienden a comunidades o ciudades de tamaño reducido, los cuales van en aumento (Masera y col., 2006). En Europa, por ejemplo, la aplicación del tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos a escala industrial es relativamente reciente, si bien ha mostrado un ritmo sobresaliente de expansión que se manifiesta en el notorio crecimiento en infraestructura y capacidad de procesamiento (Campos y col., 2005).

El tratamiento anaerobio de la porción orgánica de los RSU, permite alcanzar objetivos como los siguientes (Campos y col., 2005): a) Sustantiva reducción del volumen de los residuos sólidos que pasan a la fase de disposición final; b) Conservación de la concentración de nutrientes de interés en la fertilización de suelos; c) Control o reducción de malos olores y en general disminución de emanaciones gaseosas; d) Control o eliminación de agentes patógenos (higienización); y, e) Conversión de materia orgánica en energía a través de la utilización del CH₄, un gas combustible presente en un alto porcentaje en la mezcla de gases fruto de la digestión.

La producción de energía mediante el biogás emanado de la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los RSU puede sustituir el uso de combustibles fósiles, y por tanto reducir la emisión de GEI debidas a la quema de esos energéticos y, de manera paralela, las atribuibles a la descomposición del propio desecho. Además, se trata de un proceso conservativo para los nutrientes útiles en el reacondicionamiento de suelos, permite entonces su reciclado y, por añadidura, la disminución de los consumos material y energético ligados a su producción. De ahí que el tratamiento anaerobio de los RSU presenta un doble efecto benéfico, en términos ambientales y económicos, de capital importancia estratégica (Campos y col., 2005).

1.4.3.4 - Disposición final

La disposición final constituye la etapa última del manejo integral de los RSU. Al sitio de disposición final deberán ingresar únicamente los materiales que no tienen otras posibilidades de ser aprovechados ya sea mediante el reuso, el reciclaje o alguno de los tratamientos antes mencionados. Las razones por las que debe restringirse la entrada de RSU a los sitios de disposición final, son varias. Entre ellas está la de aminorar los impactos negativos en el medio natural, cuidar la salud de los individuos y preservar los espacios para otros fines de forma racional.

Pese a que se tiene la noción de los potenciales daños ambientales y riesgos para la salud humana, en ciertos países todavía es muy común que se realice el vertido de los RSU en los denominados tiraderos a cielo abierto (INE-SEMARNAT, 2001b). Ahí, los residuos son depositados de forma inadecuada e incontrolada directamente sobre el terreno, lo que deriva en la contaminación del aire, los cuerpos de agua y el suelo, aunado a problemas de salud y marginación social. La técnica del relleno sanitario, en contraste, es una alternativa que, de ser apropiadamente planeado, diseñado, construido y operado, garantiza el confinamiento de los RSU sin suscitar inconvenientes mayores. Los aspectos cuantitativos y cualitativos del caudal de residuos que arriban al relleno, son definidos por las técnicas de manejo precedentes en del esquema de administración de los RSU. La concepción y operabilidad de los rellenos sanitarios han progresado en años recientes y se mantienen en perfeccionamiento, siendo hoy día la opción de disposición final de residuos que supone los más bajos costos, aun tratándose de los más sofisticados (INE-SEMARNAT, 2001a).

Es posible dotar de valor agregado a los residuos que ingresan a un relleno sanitario mediante la captación y posterior uso del biogás generado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica que pudiese estar presente. A través de sistemas de extracción, es plausible recolectar el biogás y emplearlo como combustible, solo o en combinación con gas natural, para producir energía eléctrica. Por medio de la evacuación y posterior aprovechamiento del biogás emanado de los rellenos sanitarios, se reduce la probabilidad de que ocurran explosiones a causa de la acumulación de CH₄, a la par de mitigar las emisiones de este gas de efecto invernadero (INE-SEMARNAT, 2001a).

El proceso de emprender la creación de un relleno sanitario en un sitio en específico involucra las siguientes etapas fundamentales (INE-SEMARNAT, 2001b):

a) Planeación: Engloba la definición de aspectos generales relativos a la selección del lugar, diseño, construcción, operación, mantenimiento, clausura y uso posterior del terreno una vez concluida su vida útil, que va de los 10 a los 30 años.

b) Selección del sitio: Se realiza en apego a la normatividad vigente en la materia en las esferas nacional y local.

c) Diseño: Consiste en fijar la configuración y requerimientos en función de la estimación del volumen de residuos sólidos que se depositarán en el transcurso de la vida del relleno. Para esto, se cuenta con tres métodos para el diseño del relleno sanitario: Método de trinchera, método de área y método combinado.

d) Preparación del sitio: Se lleva a cabo la limpieza y desmonte del sitio, preparación del suelo de soporte; asimismo, se trazan y ejecutan caminos de acceso, de circulación interna y para el drenaje pluvial y de los lixiviados.

e) Construcción: Reviste gran importancia dada la duración de la obra y el permanente mantenimiento que demanda.

f) Operación y clausura: Las actividades en el relleno deben estar organizadas y supervisadas para lograr las metas presupuestadas. Una vez clausurado, es preciso monitorear y dar el mantenimiento necesario a fin de que el terreno sea aprovechado en beneficio de la comunidad, como frecuentemente se contempla desde la concepción del proyecto.

Las ventajas en términos operativos y económicos que ofrecen los rellenos sanitarios suelen ser opacadas por inconvenientes tales como la posible contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la generación de olores desagradables, la incubación de fauna nociva, ocupación de extensas porciones de terreno y repulsa social (García y Elías, 2005). Si a lo anterior se le añade el hecho de que existe la percepción de que los rellenos sanitarios hacen desistir de los esfuerzos por reducir y reciclar los desechos materiales, se comprende pues que resulte sumamente complicado emplazar los rellenos sanitarios. No obstante, en el futuro próximo, los rellenos sanitarios continuaran siendo parte esencial de los esquemas de manejo de los RSU (INE-SEMARNAT, 2001).

1.4.4- Panorama internacional del manejo de los residuos sólidos urbanos

A diferencia de lo que sucede en la mayoría de los países en desarrollo, las naciones más industrializadas suelen atender con mucha más seriedad lo relativo a cuestiones ambientales, en donde obviamente, el tema concerniente a los residuos posee una importancia

preponderante. La gestión de los residuos de todo tipo, incluidos los RSU, está regulada desde la óptica ambiental por entidades especializadas en los ámbitos nacional y municipal. Sobre la base de legislaciones ambientales paulatinamente más estrictas y profundas, es que esos países van adoptando tanto tarifas o impuestos de carácter ambiental, como normas sobre productos y prácticas operativas cuyo propósito es el fomento de la reducción en la fuente, la reutilización y el reciclaje, así como la implementación de distintos métodos más sofisticados para el tratamiento de los RSU. La Figura I.16 presenta información a ese respecto referida a países seleccionados.

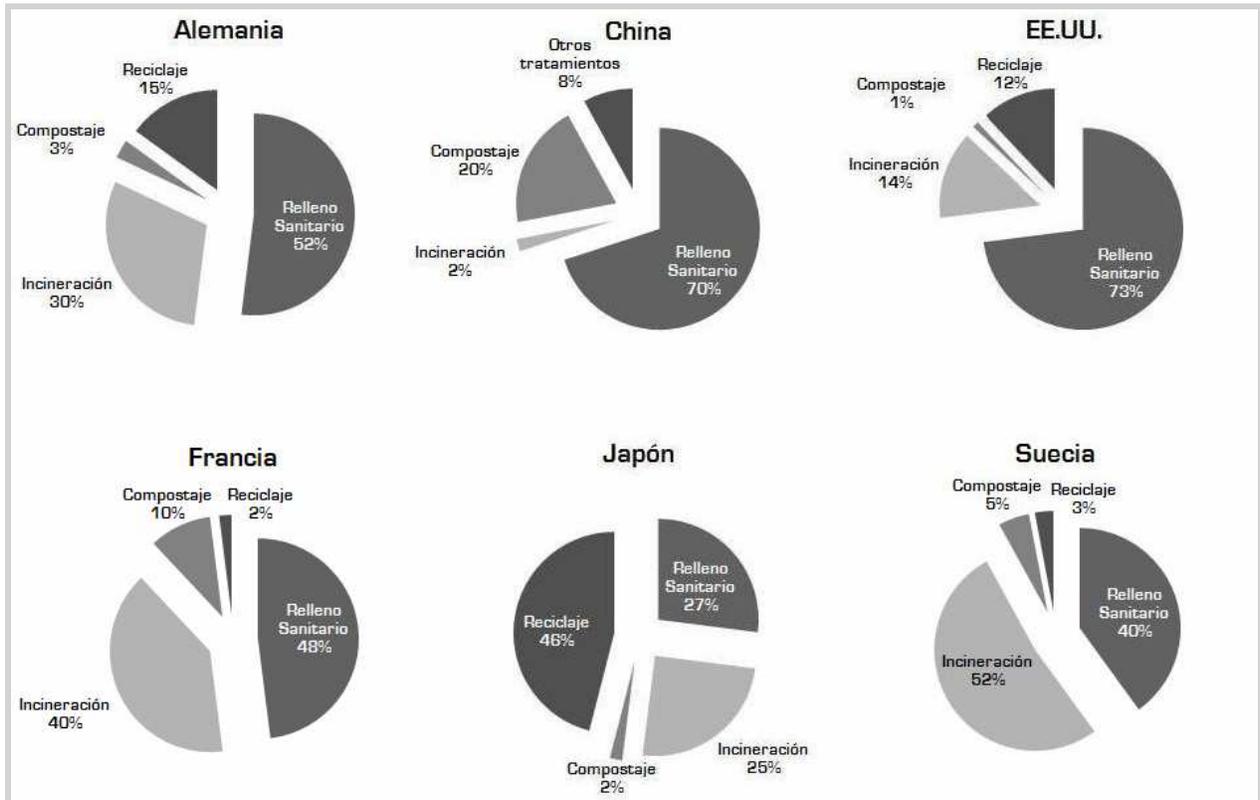


Figura I.16 - Estructura de los esquemas de manejo integral de los residuos sólidos urbanos en países seleccionados

(Elaboración a partir de Sancho y Cervera y Rosiles, 1999; Kefa, 2003)

Pese a que las cifras de la Figura I.16 proceden de los años 1999 y 2003, las estructuras de los sistemas de manejo de los RSU, salvo contadas excepciones, no se han modificado a la fecha de manera ostensible. Puede verse que la incineración de los RSU es una de las opciones de tratamiento más utilizadas en los países desarrollados, quienes poseen los medios tecnológicos y financieros para ponerla en práctica. En este sentido, la Tabla I.11 muestra los porcentajes de residuos sólidos urbanos incinerados en países representativos, donde se aprecia con nitidez la preferencia por esa tecnología de parte de las naciones más prósperas. En cambio, la gasificación y la pirólisis aplicada al tratamiento de los RSU no han logrado el mismo nivel de desarrollo que la incineración. La gran mayoría de las plantas instaladas que recurren a esos procesos son de tipo demostrativo (Elías, 2005). Es importante precisar que las opciones de tratamiento térmico de los RSU, en especial la incineración, enfrentan una férrea y creciente oposición social que está dando como resultado la extinción de buena parte de los proyectos planeados en distintos países (Tangri, 2005).

En la Figura I.16 también se observan las destacadas participaciones que tanto el reciclaje como el tratamiento aerobio llegan a tener en los sistemas de manejo de los RSU de algunos

países. El tratamiento anaerobio de los RSU, por lo regular, ocurre a su llegada a la fase de disposición final en los rellenos sanitarios, los cuales reciben un volumen importante de residuos, inclusive en los países desarrollados, donde llegan a depositarse alrededor de 50% del total de sus RSU generados. No obstante, en muchas de estas naciones, sobre todo europeas, recientemente se ha legislado en torno de la expansión de los rellenos sanitarios, augurando su total desaparición en los años venideros gracias al otorgamiento de mayores incentivos para el tratamiento y reciclamiento de los RSU (Arvizu, 2002).

Tabla I.11 - Porcentaje de residuos sólidos urbanos incinerados en países seleccionados
(Bertolini, 2003)

País	%RSU incinerado	País	%RSU incinerado	País	%RSU incinerado
Suiza	80	Francia	40	Reino Unido	6
Luxemburgo	80	Holanda	40	España	6
Dinamarca	65	Alemania	25	Japón	75
Suecia	60	Noruega	25	EE.UU.	15
Bélgica	60	Italia	17	Canadá	6
Promedio mundial de RSU incinerados a nivel mundial: menos del 5.0%					

En países con mayores rezagos, el manejo de los RSU, y en general de todos sus desechos, se lleva a cabo de una manera más rudimentaria, incompleta y potencialmente riesgosa para el ambiente y la salud de sus habitantes. En los países latinoamericanos las actividades de reciclaje han tenido un crecimiento sobresaliente, proveyendo de materias primas para la pequeña industria y el artesanado. Sin embargo, el reciclaje de los RSU se inscribe en un contexto de profundas disparidades económicas y sociales. De manera que el reciclaje es una actividad que se convierte en el medio de subsistencia de la población con mayores carencias, que realizan dicha labor en condiciones que ponen en riesgo su integridad física.

1.4.5 - Panorama nacional del manejo de los residuos sólidos urbanos

Respecto del manejo de los RSU en México, la Figura I.17 ofrece algunos datos que permiten esbozar una primera impresión en este asunto. Es de destacar que incluso desde la etapa de recolección comienzan a manifestarse las deficiencias y descuidos que a la fecha caracterizan la gestión de los RSU en todo el país. Cerca del 10% de los RSU generados en 2009 no fueron recolectados por los servicios públicos de aseo, los cuales muy probablemente fueron vertidos de manera inapropiada en tiraderos clandestinos.

Por lo que toca a la recuperación de materiales potencialmente reciclables, de acuerdo con las cifras recopiladas, tan sólo el 11% de éstos evadieron la disposición final; el resto, 89%, no fue rescatado. Sin embargo, cabe aclarar que las cifras corresponden a la recuperación de RSU reciclables efectuada en los sitios de disposición final, esto es, en rellenos sanitarios. Si se agregara lo recuperado de diversas formas en las fuentes de generación, los contenedores y vehículos de recolección, el porcentaje sin duda sería mayor.

En cuanto a la disposición final de los RSU, en 2009, un 70% se llevó a cabo en sitios controlados, la mayoría en rellenos sanitarios. Aunque también se depositaron en sitios clasificados como rellenos de tierra controlados, los cuales no disponen de la infraestructura habitual de los rellenos sanitarios, pero cuentan con los implementos para realizar la compactación y cobertura diaria de los residuos. El 30% restante de la disposición final de los

RSU se efectuó en sitios no controlados, o sea, en tiraderos clandestinos o lotes baldíos. Aun cuando la cantidad de RSU dispuestos en sitios no controlados se ha estabilizado en los últimos años, su contribución a la capacidad nacional de disposición final de RSU no ha dejado de tener una participación destacada, de más de 10 millones de toneladas anuales, como se deduce de un rápido examen de la Figura I.18.

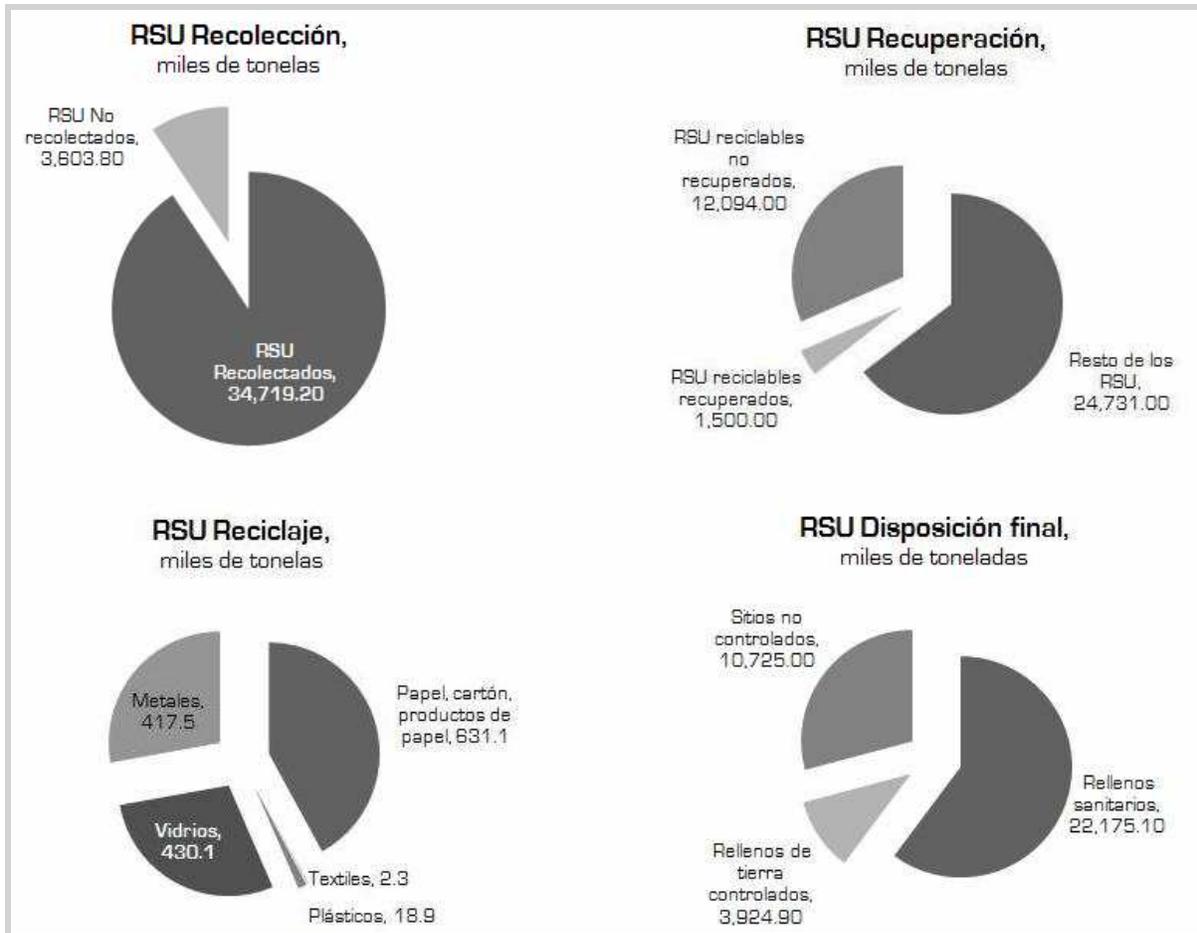


Figura I.17- Panorama del manejo de los residuos sólidos urbanos en México en el 2009
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a)

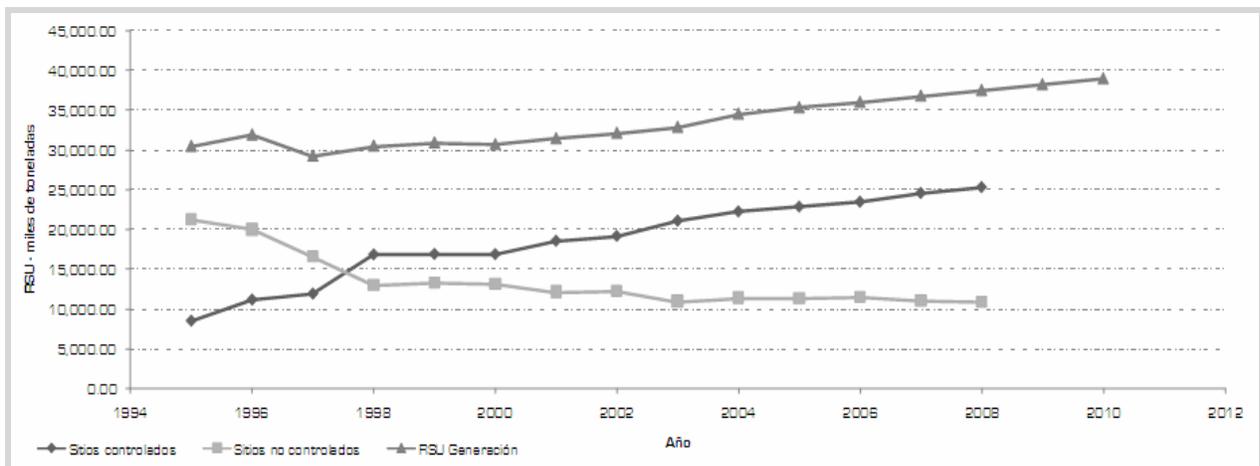


Figura I.18 - Evolución de la capacidad de disposición y de la generación de residuos sólidos urbanos en México
(Elaboración a partir de INEGI, 2010a)

A raíz de que se envía a disposición final más del 90% de los RSU que se generan anualmente en el país, la vida operativa de los rellenos sanitarios se ha acortado de manera notable. Si a esto se le añade la ausencia de espacios para ubicar nuevos emplazamientos, producto del rechazo social y temores políticos, surge entonces la apremiante necesidad de implementar un nuevo tipo de acciones para un verdadero manejo integral y sustentable de los RSU en el país.

La angustia provocada ante el anuncio de la clausura del relleno sanitario Bordo Poniente, principal receptor de los RSU producidos en el Distrito Federal (D.F.) y municipios circunvecinos del Estado de México, programada para el 31 de diciembre del 2011, puso de manifiesto la alarmante vulnerabilidad del principal núcleo urbano del país frente a la problemática de la gestión de sus residuos. No obstante, esta situación parece haber dotado de mayor fuerza a medidas como las de reducción y segregación de los RSU emprendidas por las autoridades locales. Prueba de ello es el actual proyecto impulsado por el Gobierno del D.F. y respaldado por los trabajadores de limpieza de la demarcación.

El objetivo central de ese proyecto es la disminución del caudal de RSU que es enviado a disposición final, consolidando para tal efecto el hábito de la separación de origen de los residuos. Ello en principio facilitaría la recuperación de materiales reciclables presentes en la fracción inorgánica de los RSU: Plásticos, vidrios y metales, principalmente. De igual forma, los residuos de tipo orgánico, que como ya se mencionó constituyen cerca del 50% de los RSU, quedarían disponibles para ser tratados, en un inicio, mediante métodos aerobios para la elaboración de composta en la planta situada en el mismo Bordo Poniente, o en alguna otra de los cinco complejos delegaciones: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta y Xochimilco; los cuales en conjunto produjeron en 2009 poco más de 8,000 t de compost (SMA, 2009).

Ciertamente, el compostaje de la fracción orgánica de los RSU puede considerarse una práctica simple y sin grandes complicaciones tecnológicas. Sin embargo, en ella intervienen multitud de factores que determinan el éxito del tratamiento que se determina a través de la estabilidad y contenido de nutrientes del compost obtenido. Es menester apuntar que el compostaje no constituye un proceso que permita el aprovechamiento energético directo de los RSU. La energía química en ellos presente se emplea íntegramente para el sostenimiento de los microorganismos que llevan a cabo la descomposición (Campos y col., 2005). Además, en función de las particularidades de la materia de entrada, durante la fase de operación se pueden registrar diversos inconvenientes tales como olores desagradables, lixiviados y emisiones de compuestos orgánicos volátiles y otras sustancias (García y col., 2005).

Las técnicas anaerobias, por otro lado, representan una interesante alternativa que bien podría ser incorporada al tratamiento de la fracción orgánica de los RSU. Al igual que el compostaje, el tratamiento anaerobio posibilita la reducción de volumen y la conservación de nutrientes de utilidad agronómica. Pero al mismo tiempo, y esta es quizá la más atrayente de sus características, posibilita la conversión de materia orgánica no fósil en energía mediante el empleo del biogás que se genera a lo largo del proceso de descomposición de los compuestos orgánicos.²⁶ De esta forma, constituye una opción más dentro de las fuentes renovables de energía de bajo impacto ambiental disponibles en la actualidad y que es preciso comenzar a desplegar en distintos sectores y para diferentes propósitos.

²⁶ Se hace necesaria la distinción entre materia orgánica fósil y no fósil. A la primera corresponden tanto el carbón como el petróleo y el gas natural, las principales fuentes energéticas primarias en la actualidad. Se trata de recursos que tienen su origen último en materia orgánica vegetal y animal que debió transitar por un prolongado periodo de transformación a ciertas presiones y temperaturas que le confirió las propiedades físicas y químicas que los caracterizan. Por esta razón se les conoce como combustibles fósiles. La biomasa no fósil, en cambio, se refiere a la materia de origen orgánico que proviene de plantas y animales vivos o recientemente muertos.

Esta página se dejó en
blanco intencionalmente

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS I: CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES RENOVABLES. EL CASO PARTICULAR DE LA BIOENERGÍA

Sin duda, la energía, en sus diversas formas, se ha convertido en un insumo imprescindible para el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos modernos. La preponderancia actual de la energía comenzó a gestarse en buena medida con la honda reestructuración del aparato productivo mundial que se gestó a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, en el marco de la Revolución Industrial y de los subsecuentes procesos de industrialización experimentados en todo el orbe en distintos momentos y con intensidad variable²⁷. En efecto, el tránsito de una economía cuyo sostén principal era la actividad agrícola tradicional, a otra que reposa en la producción de bienes a gran escala con la mediación de un sinnúmero de herramientas, maquinaria y procesos progresivamente más complejos, implica, entre otras cosas, un incremento sustancial de las exigencias energéticas.

La conjunción de factores emanados de las incesantes transformaciones mundiales en los rubros demográfico, económico, político, cultural, científico y tecnológico, ha propiciado el crecimiento sostenido en el consumo de energía que se registra por igual en todos los ámbitos de las sociedades actuales. Esta tendencia, vigente a la fecha, se seguirá observando en años futuros, según lo revelan numerosas predicciones en la materia. Dicho pronóstico parte de las expectativas de crecimiento económico fundamentalmente de los países en desarrollo, en particular de naciones como Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica, cuyas economías se expanden a una velocidad sorprendente. De igual modo, no hay que olvidar que los países desarrollados también demandarán más energía, toda vez que el sostenimiento y eventual mejora de sus niveles de bienestar económico y social, junto con el apego a sus desmesurados estilos de vida, colaborarán para que se presente dicho fenómeno.

²⁷ En algunas ocasiones, el término Revolución Industrial se emplea para aludir exclusivamente a los cambios sociales y en los sistemas productivos acontecidos en Inglaterra desde finales del siglo XVIII. Las transformaciones semejantes sucedidas en otros países en momentos posteriores, suelen ser catalogadas como parte de la industrialización o desarrollo industrial de dichos países. De este modo, por ejemplo, en Francia, Bélgica, Alemania y EE.UU. dichos procesos comenzaron a mediados del siglo XIX, se extendieron posteriormente a Suecia y Japón, mientras que en Rusia y en Canadá, éstos sucedieron a principios del siglo XX. En algunos países de Latinoamérica, Asia y parte de África, su desarrollo industrial se inició hasta entrado el siglo XX.

II.1 - Panoramas energéticos mundial y nacional

Previo al comienzo y consolidación de los procesos de industrialización, los principales recursos energéticos eran las distintas variedades de la biomasa, materia orgánica no fósil procedente de organismos biológicos vivos o recientemente muertos. Destacaba entonces la utilización de productos forestales como la leña, a la par de residuos agrícolas y animales, con los cuales se cubrían los requerimientos energéticos mundiales de aquellas épocas, bastante modestos en contraste con los actuales. En la medida en que estos requerimientos fueron aumentando y el conocimiento e innovación tecnológica así lo permitieron, el carbón entró a escena, y comenzó a desplazar a ritmo acelerado a la biomasa tradicional. De tal forma que entrado el siglo XX, el carbón fungía ya como la fuente primordial de energía.

Años después, durante la década de 1920, el petróleo irrumpió en el panorama energético mundial. Sus características singulares que le confieren un manejo relativamente fácil, una alta densidad de energía, entre otras particularidades²⁸, propiciaron su veloz ascenso para constituirse desde entonces en la principal fuente de energía primaria a nivel mundial. En el caso de México, por ejemplo, el petróleo alcanzaría, en el año de 1925, una participación de cerca del 90% en la oferta de energía primaria en el mercado nacional (Viqueira, 2007). Ese porcentaje fue disminuyendo gradualmente, pero el petróleo mantuvo una participación preponderante en el suministro energético de México a lo largo de todo el siglo XX. Dominio que continúa ostentando en lo que va del presente siglo.

La notoria concentración de los depósitos naturales de crudo en ciertas porciones del mundo, en específico en la región de Medio Oriente, vino a constituirse en un asunto sumamente delicado con graves implicaciones para la seguridad energética.²⁹ Especialmente notorio fue en el caso de las economías dominantes cuya dependencia de energéticos foráneos venía en aumento. Esto quedó de manifiesto con las crisis petroleras padecidas en los años de 1973 y 1981, las que se encargaron de mostrar con elocuencia los inconvenientes del protagonismo del petróleo en los sistemas económico-energéticos.³⁰

Frente a la incertidumbre en la oferta y la crónica volatilidad en los precios del crudo, las naciones industrializadas, donde se resintieron con mayor agudeza los efectos de las crisis petroleras, impulsaron la formulación de una auténtica planeación energética de gran alcance, en la cual las nociones de conservación, eficiencia, innovación y diversificación tuvieron importancia capital. De esta manera, se impusieron medidas cuya finalidad era lograr la racionalización del uso de la energía, la disminución del consumo energético específico en equipos e instalaciones y, sobre todo, la búsqueda y explotación de nuevas fuentes de energía, en particular las endémicas de cada país. Estas medidas en principio implementadas por los

²⁸ A este respecto, Delgado (2009) añade que las características particulares del petróleo, en comparación con otros energéticos, favorecen, además, una mayor regulación y concentración o monopolización tanto de su producción como de su distribución y almacenamiento, elementos que se insertan perfectamente en la lógica de control de los recursos naturales construida por las grandes corporaciones y las naciones a ellas vinculadas, consideraciones que explican asimismo el aumento exponencial en el consumo del petróleo.

²⁹ En esencia, la seguridad energética se refiere a garantizar la disponibilidad y el aprovisionamiento oportuno y suficiente de energía para la cobertura de las necesidades de todo un país o una región.

³⁰ En ambos casos, se trata de fechas en las cuales se registraron alzas significativas en los precios internacionales del crudo que causaron estragos en las economías de los países importadores netos del hidrocarburo. La crisis petrolera de 1973, originada por una confrontación bélica entre Israel y un bloque de países árabes encabezado por Egipto y Siria, fue resultado directo del embargo acordado por la entonces recientemente constituida Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) fijando un recorte sustantivo de la producción y exportación de petróleo, propiciando con ello el encarecimiento del energético. Años más tarde, en 1981, se produjo la segunda gran crisis petrolera la cual derivó del conflicto armado protagonizado por Irak e Irán, naciones con vastas reservas de crudo, quienes se disputaban el alcance sus fronteras territoriales. Los ataques recíprocos a instalaciones petroleras condujeron a una caída abrupta en sus volúmenes de producción, repercutiendo en un incremento considerable del precio internacional del barril de petróleo. Otros sucesos asociados a alzas considerables del precio del crudo incluyen la crisis del canal de Suez en 1956-57, la revolución iraní de 1978-79, la primera guerra del Golfo Pérsico en 1990-91 y el pico de las cotizaciones en 2007-2008 (Hamilton, 2010).

países desarrollados serían luego adoptadas y ampliadas por muchas otras naciones de acuerdo con sus posibilidades.

Consecuencia de este replanteamiento en la política energética, se incrementó el consumo de gas natural, tanto para la generación de electricidad como para otras aplicaciones. Asimismo se erigieron numerosas centrales nucleoelectricas y el carbón recuperó parte del terreno antes perdido. Hubo respuesta también a los impactos ambientales asociados a la producción, transformación y consumo del petróleo que comenzaban a ser notorios. Se impulsó el desarrollo de nuevas fuentes y tecnologías energéticas, figurando en este rubro las fuentes renovables, que entraron así en una etapa que favorecería su perfeccionamiento técnico, maduración comercial y aceptación social con miras a acrecentar su presencia en la matriz energética.

En México, la evolución del sector energético ha sido lenta pero ha colaborado en la gradual diversificación de las fuentes de energía. La expansión del uso del gas natural se vio favorecida por controvertidas modificaciones en las disposiciones legales.³¹ En particular para la producción de energía eléctrica en instalaciones de ciclo combinado, desplazando con ello al combustóleo y en ocasiones a la generación en centrales hidroeléctricas. Esta constituye quizá la más notoria de las transformaciones registradas en fechas recientes. La capacidad de aprovechamiento de otros recursos, por ejemplo energía geotérmica, hidráulica y eólica, también ha experimentado periodos de crecimiento, aunque a un ritmo mucho menor y más pausado del observado en el caso del gas natural.

Cabe apuntar que de manera paralela con las medidas de conservación y diversificación se estimuló la producción de petróleo en países no afiliados a la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP)³², uno de los cuales fue México. Estas presiones se dieron ante la imposibilidad de los grandes consumidores de satisfacer por cuenta propia la demanda energética que les imponía su inmenso aparato productivo. No obstante, la coyuntura vivida fue fundamental para abrir paso a las fuentes alternas de energía, incluidas obviamente las renovables. Se supo desde entonces que en algún momento estas fuentes de energía sustituirán a los hidrocarburos fósiles y su amplia gama de energéticos derivados.

El ímpetu con el que en un inicio se promovieron las estrategias de eficiencia, conservación y diversificación comenzó a menguar en la medida en que los precios del petróleo descendían, tal como ocurrió en el transcurso de la década de los 80's. Empero, las habituales alzas en las cotizaciones del crudo en años posteriores, las tensiones geopolíticas suscitadas por el control del recurso, aunado a las crecientes preocupaciones en materia ambiental, han resucitado el interés por los principios rectores de la planeación energética instaurada durante finales de la década de 1970.

³¹ En el año de 1992, con el propósito de permitir la participación de particulares en el sector eléctrico nacional, y teniendo como marco la negociación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, se reformó la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica. La trascendencia de dicha reforma reside en el hecho de que mediante la definición de aquellas actividades que no se consideran Servicio Público, y que por lo tanto no quedarían reservadas en exclusividad al Estado, se abrió el segmento de generación al sector privado, estableciendo, entre otras modalidades, la figura de productor independiente de energía (PIE) bajo el esquema de comprador único, rol que asumiría desde entonces el ente eléctrico público nacional. Dadas las bondades técnicas y económicas que ofrecen las centrales de ciclo combinado que queman gas natural, los PIE optan preferentemente por esta tecnología de generación.

³² Los miembros fundadores de la OPEP son Arabia Saudita, Irak, Irán, Kuwait y Venezuela. Otras naciones se han ido incorporando y, también, otras la han abandonado, de modo que a la fecha la Organización cuenta con 12 países miembros. La misión central de la OPEP es la de velar por la estabilidad de los precios en los mercados petroleros a fin de asegurar el flujo de ingresos que representan las actividades petroleras para los países productores. La capacidad de la OPEP para regular el precio del crudo descansa en buena medida en el volumen de las reservas y el margen de producción de sus afiliados. Basta precisar que al término del 2009 la OPEP resguardaba el 77.2% de las reservas probadas, aportó el 41.2% de la producción mundial, alcanzando una relación reservas/producción de 85.3 años (BP, 2010).

La energía necesaria para la ejecución de las múltiples actividades que caracterizan a los distintos sectores económicos, se obtiene a partir de la utilización directa o la transformación de los recursos energéticos hasta ahora conocidos. En este sentido, los recursos energéticos suelen agruparse en dos categorías generales, a saber, recursos primarios y recursos secundarios.

Los recursos energéticos primarios o energía primaria, son aquellos productos energéticos que se extraen o captan directamente de los recursos naturales para ser consumidos tal cual o bien para la elaboración de productos secundarios (SENER, 2009). Dentro de esta categoría se destacan el carbón mineral, el petróleo crudo, los condensados, el gas natural, los minerales radiactivos fisionables, las energías eólica, solar, hidráulica, geotérmica, oceánica, así como ciertos residuos agrícolas y forestales por el lado de la biomasa y las energías humana y animal, que mantienen una participación importante en comunidades rurales de los países en desarrollo. Ahora bien, en función de la naturaleza de los procesos que les dan origen, estos mismos recursos pueden ser clasificados como no renovables o renovables. Por conveniencia, se comenzará discutiendo en torno de los primeros, los no renovables.

Las distintas variantes del carbón mineral, del petróleo crudo, del gas natural y de los condensados, son con frecuencia identificadas como energéticos o combustibles fósiles, en clara alusión a la hipótesis comúnmente aceptada que explica el origen de estos recursos.³³ El carbón mineral es un combustible sólido compuesto en su mayoría de carbono, y en menor proporción hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Los distintos tipos de carbón incluyen, en orden ascendente de valor energético, la turba, el lignito, los carbones sub-bituminosos y bituminosos, y la antracita.

El petróleo crudo, por su parte, es un líquido aceitoso conformado por una amplia variedad de hidrocarburos que se le localiza en depósitos por debajo de la corteza terrestre. Los condensados, son compuestos líquidos, pentanos y otras sustancias más pesadas, que se recuperan durante la separación del gas asociado y también en las tuberías por donde se transporta el gas natural. Se distinguen los de tipo amargo (contienen fluidos ácidos) y dulce (una vez que se han sustraído los compuestos ácidos). Por último, el gas natural es una mezcla de hidrocarburos ligeros en donde predomina el metano, otros alcanos como el etano y el propano, así como gases inorgánicos entre los que se cuenta al nitrógeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, están también presentes aunque en menor proporción. El gas natural puede hallarse en yacimientos de manera independiente, lo que se conoce como gas no asociado, o bien compartiendo el espacio con petróleo crudo, en cuyo caso se habla de gas asociado.

Desde hace ya varias décadas, la contribución de los recursos energéticos fósiles al aprovisionamiento de energía primaria a nivel mundial es por demás significativa. Este hecho puede responder a varias razones, entre las principales, como se apuntó antes, su elevada densidad energética, la relativa facilidad para su transporte, almacenamiento y distribución, y el anquilosamiento de la infraestructura y los procesos productivos en todo el orbe, factores que han confluído para hacer de los energéticos de origen fósil los protagonistas en la matriz mundial actual de energía primaria. De acuerdo con las cifras expuestas en la Figura II.1.a, en 2009, de cada 10 unidades de energía primaria disponible en el planeta, poco más de 8

³³ La hipótesis más difundida acerca del origen de estos energéticos plantea que proceden de la prolongada descomposición bajo condiciones particulares de presión y temperatura de un sinnúmero de seres vivos terrestres y acuáticos que poblaron el planeta hace millones de años. La descomposición culminó con la obtención de carbono e hidrógeno, elementos predominantes en la composición de los energéticos antes mencionados. Existen otras hipótesis que sugieren el hecho de que estos recursos son resultado de una multiplicidad de reacciones químicas ocurridas en el interior de la corteza terrestre (Flores, 1980); sin embargo, a la fecha estas suposiciones no gozan de la anuencia de gran parte de los expertos en la materia.

provinieron de fuentes fósiles no renovables, distribuidas casi en partes iguales entre petróleo crudo, carbón y gas natural.

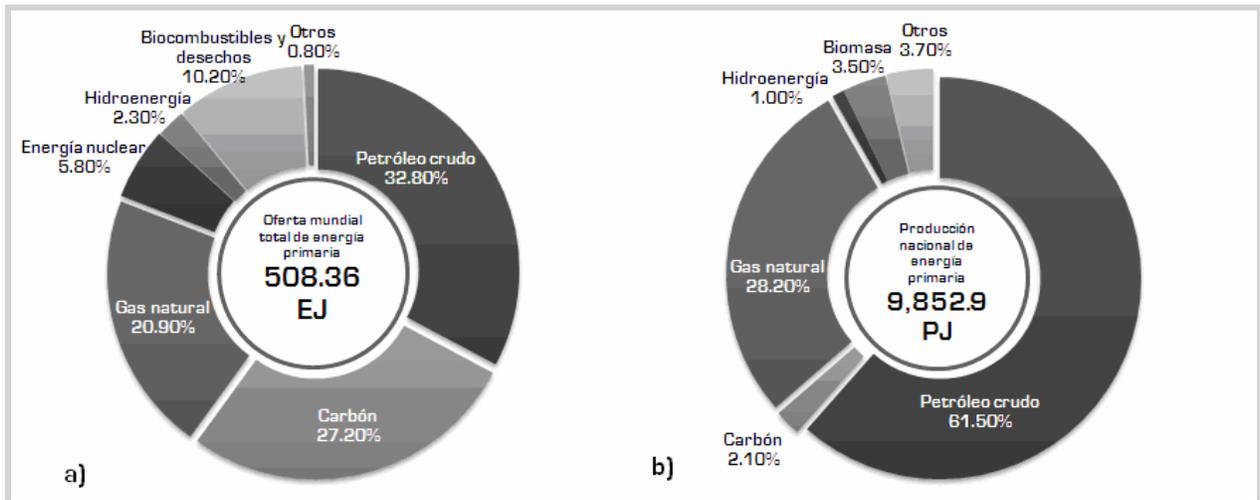


Figura II.1 – Estructura del aprovisionamiento de energía primaria en el mundo (a) y en México (b)
(Elaboración a partir de SENER, 2009; IEA, 2011a)

En lo que respecta a México, la situación es un tanto más radical. En ese mismo año, según se aprecia en la Figura II.1.b, los energéticos fósiles constituyeron más del 90% de la energía primaria producida en todo el país, siendo el petróleo el que registra el mayor aporte, por arriba del gas natural y, más aún, del carbón, el cual tienen una participación marginal en el total nacional, a diferencia de lo que sucede a nivel global donde contribuye con más de un $\frac{1}{4}$ de la oferta de energía primaria.

Según cifras del año 2009, la energía procedente de los minerales radiactivos extraídos de la corteza terrestre significó cerca de seis puntos porcentuales del total de la energía primaria puesta a disposición en el planeta. Su explotación es más notoria en países industrializados por cuestiones fundamentalmente de corte económico.³⁴ En México, donde de momento opera una sola central nuclear, del total producido de energía primaria para ese mismo año, la energía nuclear representó el 1.1% (SENER, 2009).

Los combustibles obtenidos de la biomasa, junto con los materiales de desecho de distinta procedencia en conjunto aportaron poco más de 10% de la oferta mundial total de energía primaria en 2009. En México, su participación en cambio llegó a sólo 3.5%. Hay que decir que se trata de energéticos mayoritariamente utilizados en países en desarrollo. El resto de las fuentes energéticas primarias mantienen todavía hoy una participación bastante discreta en el escenario energético global. En el contexto mundial y para el año de referencia, la energía geotérmica, solar, eólica, mareomotriz, del oleaje y oceánica, sumadas tienen un peso inferior al 1.0%. En México, país que cuenta con capacidad instalada en sólo algunas de las opciones anteriores, la cifra está por debajo del 2.0% (SENER, 2009). La hidroenergía, por su parte, posee una presencia superior debido a la enorme contribución de los grandes emplazamientos hidroeléctricos repartidos en todo el mundo, los cuales suministran

³⁴ El monto de la inversión inicial para edificar una central para el aprovechamiento de la energía nuclear es de cientos e incluso miles de millones de dólares. De ahí que se trate de proyectos impensables para los países con estrecha solvencia económica. El que la inversión inicial sea tan elevada da cuenta de la complejidad técnica y operativa de estas instalaciones, su grado de sofisticación, así como de la rigurosa regulación a la que están sujetas con objeto de reducir al mínimo posible la ocurrencia de un percance que conlleve la liberación y diseminación de material radiactivo. En este contexto, el endurecimiento de tales disposiciones incide de manera directa en la economía de la energía nuclear dado que incrementa los requerimientos de capital para la construcción de las centrales nucleoelectricas y los gastos de operación y mantenimiento, encareciendo por consiguiente el costo de la energía eléctrica que producen.

importantes cantidades de energía. Los valores correspondientes a su aprovechamiento a nivel mundial y nacional para 2009 se situaron en 2.3% y 1.0%, respectivamente. Dichos recursos energéticos conforman el repertorio actual de las denominadas fuentes renovables de energía, mismas que serán abordadas con cierto detalle líneas más adelante.

La estructura de la oferta de energía primaria responde, en última instancia, a las necesidades energéticas de los distintos participantes de la actividad económica en un país, región o en el mundo entero. Los recursos primarios se someten a procesos de conversión a fin de sintetizar productos conocidos como energéticos secundarios. De éstos, destacan el coque de carbón, coque de petróleo, gas licuado de petróleo, gasolinas, naftas, querosenos, diésel, combustóleo, gas seco y electricidad. Una vez producidos, se canalizan a los distintos sectores encargados de la fabricación de bienes y la prestación de servicios. En este rubro, los productos energéticos derivados del petróleo crudo, del gas natural y del carbón han sido históricamente los de más alto consumo a nivel mundial. Así, por ejemplo, del consumo global registrado en 2009, tales energéticos representaron el 41.4%, 15.2% y 10.0%, respectivamente (SENER, 2010). En el caso de México, aun cuando los porcentajes varían, el panorama es bastante similar, con la salvedad de que los derivados del carbón registran una contribución mucho menor.

Empero, el consumo desmedido de esta clase de energéticos no sólo es físicamente insostenible a largo plazo en virtud de su existencia limitada. También ha propiciado el surgimiento y la exacerbación de problemáticas en distintos ámbitos, en particular en el social y el ambiental. Son problemáticas que, según se advierte, de no ser atendidas con prontitud y efectividad, amenazan seriamente la viabilidad futura de los conglomerados socioeconómicos erigidos a la fecha. Ésta constituye una de las principales motivaciones para apresurar la adopción de fuentes alternas de energía, en especial las de carácter renovable, cuyo potencial a desarrollar debe ser tal que alcance para sustituir a los combustibles fósiles en multitud de aplicaciones y asistir en el control de sus repercusiones.

II.2 - Fuentes renovables de energía

Las dificultades que se enfrentan para hallar y extraer el petróleo y el gas natural son cada vez mayores, indicativo inequívoco del comienzo del fin de la era del hidrocarburos fáciles y baratos. Ello sin duda marcará un punto de inflexión en la curva de producción y será el preámbulo de una nueva situación en la cual las complicaciones de carácter técnico, económico, social y ambiental continuarán agravándose, dando paso a la fase de declinación definitiva de la explotación de esos recursos.³⁵ Un destino semejante puede augurarse para el carbón e incluso para los minerales radiactivos, uranio en especial, con sus respectivos atenuantes y agravantes.

A lo anterior se añaden las secuelas del consumo acelerado y masivo de los energéticos de origen fósil que resultan particularmente alarmantes en el plano ambiental. La alteración del régimen climático de la Tierra, la perniciosa contaminación del aire, suelo y agua, el efecto corrosivo de las precipitaciones ácidas, los frecuentes descuidos en las fases de extracción,

³⁵ Un modelo muy popular para predecir el comportamiento de la producción de crudo es el modelo de King Hubbert. En esencia, el modelo establece que la producción describe una trayectoria de "U" invertida. Al principio, el ritmo de extracción es intenso debido a condiciones geológicas propicias y a la abundancia de yacimientos. Después de un tiempo, la producción alcanza su máximo, manteniéndose en torno a ese nivel por un lapso determinado para luego comenzar a declinar con celeridad como consecuencia de las condiciones cada vez más adversas que se enfrentan aguas abajo. De esta forma, la extracción del crudo remanente se torna inviable económicamente, por lo que cesa su explotación, al menos durante el tiempo en que prevalezcan las mismas condiciones técnicas y de mercado.

transporte y refinamiento que se convierten en auténticas catástrofes químicas³⁶, son sólo algunas de las calamidades producto del empleo desmedido de combustibles fósiles.

Frente a esta panorámica, la reacción ha consistido entre otras medidas en impulsar la diversificación de los sistemas energéticos. Esto se ha dado en parte por medio de la integración creciente de fuentes alternas de energía de mínimo impacto ambiental. En especial de aquellas de reducidas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). No está de más recordar que la presencia excesiva de GEI en la atmósfera es responsable en alto grado de la intensificación del calentamiento global que trastoca el régimen climático del planeta. Entonces, dentro de las fuentes alternas se ha dado prioridad a las de tipo renovable, en consideración de sus singulares cualidades que las convierten en opciones pertinentes para encarar las múltiples las problemáticas actuales.

El adjetivo renovable, que se usa para referirse a este tipo de fuentes de energía, remite a la noción de algo que se regenera o restablece de manera continua, en una escala de tiempo breve, volviendo a sus condiciones originales. Su propósito es separar a estas fuentes de aquellas otras que, como el petróleo, el carbón, el gas natural y el uranio, se les asigna el calificativo de no renovables, a modo de hacer patente el hecho de que su existencia es limitada.³⁷ En efecto, el proceso de conformación de los energéticos no renovables requirió de millones de años bajo condiciones extraordinarias. De ahí que cualquiera que sea su nivel de consumo, éste conlleva inevitablemente una disminución en las reservas disponibles cuya tasa de regeneración es, para efectos prácticos, nula. En cambio, los recursos renovables, se distinguen por el hecho de que su explotación no conduce a su agotamiento dado que se regeneran a un ritmo que iguala o supera al de su consumo.³⁸

Las fuentes renovables se vinculan con los flujos de energía al interior del ecosistema de la Tierra. Ese movimiento de energía es propiciado por la radiación solar y la energía geotérmica del propio planeta, que le confieren una magnitud tal que sobrepasa sin dificultades el nivel de consumo de energía de la civilización actual (Turkenburg, 2000). Las fuentes renovables se asocian, pues, a ciclos o fenómenos naturales y permanentes la mayoría relacionados de manera directa o indirecta con la energía solar. Los vientos, la fotosíntesis, las precipitaciones pluviales, el oleaje, las mareas y las corrientes oceánicas, son ejemplos de manifestaciones secundarias de la energía solar. Mención aparte merecen los flujos de calor emanados del núcleo de la Tierra, en los cuales no se percibe influencia alguna de la energía solar.

A la fecha, el repertorio de fuentes renovables de que dispone la humanidad se compone de las siguientes energías: Hidráulica, solar, biomasa o bioenergía, geotérmica, eólica y oceánica. Cada una de ellas posee sus respectivas variantes, aplicaciones idóneas, grados de maduración técnica y comercial y nivel de competitividad frente a las fuentes y tecnologías convencionales. A este respecto, la Tabla II.1 ofrece una descripción sucinta del modo en que se aprovecha cada uno de los recursos renovables antes mencionados, una también breve

³⁶ A finales de abril de 2010 en la plataforma petrolera *Deepwater Horizon*, situada en aguas territoriales de EE.UU., en el Golfo de México, ocurrió una gran explosión que provocó su hundimiento y el vertido de más de 60 mil barriles de crudo por día junto con volúmenes aún no contabilizados de gas natural procedentes del pozo Macondo en donde se encontraba instalada dicha plataforma. Los hidrocarburos derramados afectaron vastas zonas del Golfo de México para las cuales los acciones de remediación se dilataron varios meses, sin ofrecer resultados aceptables.

³⁷ Aun cuando puede aceptarse el supuesto de que la energía que se podría generar a partir de las existencias de minerales radiactivos es incalculable, las proyecciones auguran que el agotamiento de las reservas probadas de uranio tendrán lugar, de persistir la actual tasa de consumo, en la década del año 2070 (Willem y van Leeuwen, 2006). Pese a que se tienen contabilizadas cantidades bastante significativas de sustancias radiactivas dispersas tanto en la corteza terrestre como en los océanos (Frisch, 1965), la reducida concentración en que se encuentran anticipa un proceso sumamente complejo y oneroso para extraerlas. De ahí que su eventual aprovechamiento sugiere una dosis alta de incertidumbre (Delgado, 2009).

³⁸ La condición esencial para que esto suceda implica el diseño e implementación de estrategias eficaces que impidan la aparición de prácticas que persigan la explotación irracional de estos recursos. Esto es particularmente cierto para el caso de la energía derivada de la biomasa y, en un modo un tanto menos evidente, en el de la energía hidráulica.

reseña de su desarrollo histórico y las distintas configuraciones o modalidades propuestas para su explotación.

La Tabla II.2 presenta información referente a los parámetros determinantes en la evaluación del recurso renovable, los sitios teóricamente con mayor potencial, además de los componentes básicos de los sistemas de conversión junto con algunas de las particularidades técnicas de los mismos. Lo concerniente a inversión y costos estimados, así como a la vida útil promedio de las tecnologías para su aprovechamiento y principales participantes en las respectivas industrias, es expuesto en la Tabla II.3. Por último, la Tabla II.4 da cuenta de las aplicaciones más pertinentes de las fuentes renovables de energía, al tiempo que precisa las virtudes e inconvenientes de mayor trascendencia que se identifican en su aprovechamiento.

La revisión del desarrollo histórico de las fuentes renovables pone de manifiesto el hecho de que se trata de recursos energéticos que han sido utilizados por la humanidad desde tiempos ancestrales, obviamente de maneras mucho más rudimentarias y limitadas en comparación con los sistemas actualmente en uso. La energía solar está presente desde la formación del planeta mismo. La biomasa, en particular los materiales leñosos, comenzó a ser empleada con fines energéticos a partir del momento mismo del descubrimiento del fuego. Los recursos hidráulicos y eólicos se emplean desde hace varios siglos en la obtención de energía mecánica para diversas tareas. La energía geotérmica se conoce y utiliza para distintos fines desde hace más de 200 años. Las de menor trayectoria histórica son las diferentes modalidades de la energía oceánica, muchas de las cuales aún se encuentran en etapas de estudio.

II.2.1 - Características distintivas de las fuentes renovables de energía

El combate al fenómeno del cambio climático y la reducción de los niveles de contaminación local y global, son dos poderosas razones que impulsan el uso creciente de las fuentes renovables de energía en el mundo entero. Pero no son los únicos alicientes. Existen motivaciones de tipo social y económico que también colaboran en este proceso de expansión de las fuentes renovables. Dichas motivaciones, en conjunto, se conectan con las cualidades más destacadas de estas variantes energéticas. Una síntesis, tal vez incompleta, de las principales problemáticas que abonan al despliegue masivo de las fuentes renovables, se presenta en la Tabla II.5.

Probablemente, los beneficios que en materia ambiental comporta el uso de fuentes renovables son los más conocidos, en especial lo que concierne a sus reducidas emisiones de GEI, aun considerando su ciclo de vida completo.³⁹ Ello es comprensible dada la magnitud y potenciales consecuencias de la problemática asociada al cambio climático que tanto desasosiego provocan en las sociedades actuales.

Sin embargo, las contribuciones en términos económicos y sociales son igualmente trascendentes y afines a los postulados centrales del modelo bautizado como Desarrollo Sustentable, en lo tocante a sus tres dimensiones fundamentales: Ambiental, social y económica. Sin embargo, cabe apuntar que las fuentes renovables presentan también una serie de inconvenientes, algunos inherentes a su naturaleza misma, y otros que responden más bien a factores coyunturales que derivan de un inconcluso proceso de maduración en términos técnicos y de mercado.

³⁹ Para profundizar en relación a este y otros temas sumamente interesantes, se sugiere revisar del documento titulado *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* preparado por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.

Tabla II.1 – Descripción, historia y variantes de los recursos energéticos renovables. (Elaboración a partir de Turkenburg, 2000; IEA, 2003; Estrada e Islas, 2010)

Fuente	Descripción básica	Reseña histórica	Variantes
Energía hidráulica	Energía potencial almacenada en una masa de agua en virtud de su altura natural o artificial	Una de las fuentes cuya utilización se inició hace ya varios siglos, primero para obtener energía mecánica y luego, con la invención de la turbina en 1827, para la generación de electricidad en instalaciones monumentales. A raíz de las crisis petroleras de la década de los 70's y posteriormente con la liberalización de la industria eléctrica, se ha estado promoviendo del desarrollo de proyectos de escala reducida	<ul style="list-style-type: none"> -Gran-hidro (más de 10 MW) -Pequeña-hidro (menos de 10 MW) -Mini-hidro, (entre 0.1 y 1 MW) -Micro-hidro (menos de 100 kW)
Energía solar – fotovoltaica	Conversión directa de la radiación solar en electricidad empleando de por medio celdas constituidas por materiales semiconductores a base de silicio mono y policristalino, sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre	El principio de operación de las celdas se conoce desde 1839. Sin embargo fue hasta después de la invención de los componentes electrónicos, diodo y transistor, que se hizo posible la creación de uno de estos dispositivos. Los Laboratorios Bell fueron los primeros en patentar en 1955 la celda solar basada en silicio	<ul style="list-style-type: none"> -Celdas de silicio cristalino, las más diseminadas -Celdas de película delgada, en perfeccionamiento Rango de potencia: desde 10 W, para dispositivos portátiles; 10 kW, sistemas residenciales; más de 1 MW en sistemas interconectados
Energía solar – fototérmica	Consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para la producción directa de energía térmica.	El concepto nace en 1860, en Francia, con las propuestas de motores impulsados por vapor generado a través de energía solar. El interés en este rubro facilitó la incorporación de proyectos fototérmicos a los programas de ID de países industrializados. Sin embargo, ante resultados poco alentadores, el interés fue decayendo con los años hasta que finalmente el desarrollo del primer sistema de Torre Central reavivó la investigación en esta modalidad de aprovechamiento de la energía solar. El parámetro decisivo es el grado de insolación, que se entiende como la radiación solar intensa que se recibe gracias a que existen porciones de la atmósfera donde no hay demasiado vapor de agua el cual tiende a dispersar la energía	<ul style="list-style-type: none"> -Sistemas de baja temperatura, por debajo de los 100 °C -Sistemas de media temperatura, se superan los 100 °C -Sistemas de alta temperatura, alcanzan como mínimo 400 °C
Energía de la biomasa	Se trata de energía solar almacenada en plantas en forma de energía química a través del proceso de fotosíntesis, absorbiendo en el transcurso carbono, agua y nutrientes. Al ser ingeridas, la energía contenida en las plantas se deposita en otros seres vivos	Es uno de los más antiguos recursos energéticos explotados por la humanidad, junto con las energías humana y animal. Destaca el uso de materiales leñosos para obtener calor e iluminación, siendo la combustión directa el modo típico de conversión. La biomasa constituye en sí misma una forma de almacenamiento de energía, aunque se trata de un recurso sumamente disperso que demanda tiempo y esfuerzos considerables para su acopio. Con regularidad se asocia esta clase de energéticos con la pobreza, y es que en efecto las modalidades de energía comercial no son asequibles o no se encuentran disponibles para los estratos de menores ingresos	<ul style="list-style-type: none"> -Combustión directa -Co-combustión con energéticos de distinto origen -Pirólisis -Gasificación -Descomposición anaerobia de materia orgánica

Continuación Tabla II.1 – Descripción, historia y variantes de los recursos energéticos renovables (Elaboración a partir de Turkenburg, 2000; IEA, 2003; Estrada e Islas, 2010)

Fuente	Descripción básica	Reseña histórica	Variantes
Energía geotérmica	Calor que se genera en el interior de la Tierra, tanto el debido al colapso gravitacional que dio lugar a la formación del planeta, como el originado por el decaimiento de isótopos radiactivos.	Desde comienzos del siglo XIX, los fluidos geotérmicos eran ya utilizados en virtud de sus cualidades energéticas, La industria química asentada en una provincia italiana, fue la primera en implementar un sistema para aprovechar el calor geotérmico para la obtención de ácido bórico. De manera paralela se concibió la técnica para la conversión a energía mecánica. En 1904 apareció el primer proyecto comercial exitoso para la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico. En años posteriores otros países, con la geología y geofísica propicias, incursionaron en la explotación de este recurso energético. Se distinguen distintos procesos y tecnologías acordes a la naturaleza y temperatura del fluido geotérmico.	<ul style="list-style-type: none"> -Vapor seco; fluidos geotérmicos donde predomina el vapor. -Vapor separado; el fluido ingresa a un tanque separador para eliminar la fracción líquida. -Ciclo binario; se valen de un fluido secundario de bajo punto de ebullición el cual recibe y transporta la energía térmica. -Roca seca caliente; se incrementa la permeabilidad de la fractura en la roca base.
Energía eólica	Conversión de la energía cinética de los flujos de aire en la atmósfera, provocados por los gradientes de presión y temperatura, el movimiento de rotación de la Tierra y la topografía circundante.	Su aprovechamiento se remonta varios siglos atrás. En un principio para la navegación a vela y la obtención de energía mecánica mediante molinos de viento. En 1888 fue posible la conversión a energía eléctrica a través de sistemas autónomos de pequeña escala. Años después, en 1930, se desarrolló la primera turbina para generar corriente alterna. La evolución tecnológica y el crecimiento comercial de la energía eólica han contribuido a que hoy día sea considerada como una opción viable y conveniente para la generación de energía eléctrica a gran escala. Sin embargo, a últimas fechas, las dificultades para hallar locaciones apropiadas en tierra firme son cada vez mayores, razón por la cual se está incursionando en las instalaciones costa afuera (off-shore), aun cuando ello suponga la elevación de los costos.	<ul style="list-style-type: none"> -Emplazamientos en tierra (<i>on-shore</i>). -Emplazamientos en costas (<i>near-shore</i>) y aguas (<i>off-shore</i>). <p>En la modalidad <i>off-shore</i> se prevé la utilización de turbinas de más de 1,500 kW de potencia.</p>
Energía oceánica	Aprovechamiento con fines energéticos de distintos fenómenos observados en los océanos, desde las mareas, hasta el oleaje, las corrientes marinas y los gradientes térmicos y salinos.	La energía de los océanos constituye una modalidad de energía renovable con un potencial enorme, aunque su aprovechamiento actual es bastante modesto. La energía de las mareas ha sido utilizada desde hace siglos en la forma de molinos de agua. En 1960 se construyó en La Rance, Francia la más importante de las centrales para la generación de electricidad a partir de las mareas. Con respecto a la conversión de otras formas de energía oceánica, la tecnología no ha alcanzado su maduración ni técnica ni comercial; mucha de la investigación comenzó a efectuarse hace aproximadamente un par de décadas. En general, se trata una energía sumamente difusa y distante de los centros de consumo, su explotación en las circunstancias actuales puede no ser atractiva desde el punto de vista económico. No obstante, existen de sitios que reúnen condiciones únicas que la convierten en una alternativa competitiva.	<ul style="list-style-type: none"> -Mareomotriz, diferencias de nivel entre pleamar y bajamar. -Oleaje (undimotriz), conversión de la energía cinética de las olas. -Gradientes térmicos y salinos, disparidades de temperatura y concentración de sales existentes en las aguas de los océanos.

Tabla II.2 – Factores determinantes, sitios idóneos, componentes y aspectos técnicos de los recursos energéticos renovables

(Elaboración a partir de Turkenburg, 2000; IEA, 2003 y 2011b; Goldemberg y Johansson, 2004; Moomaw y col., 2011; WWF, 2011)

Fuente	Factores determinantes	Sitios idóneos/Variabilidad	Componentes esenciales para su aprovechamiento	Atributos técnicos relevantes
Energía hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> -Régimen de precipitaciones, el cual determina el gasto promedio de agua. -Topografía local, acota la altura efectiva aprovechable. 	<p>Zonas montañosas, ríos de distinta envergadura, y combinaciones de ambas/horas a años (corriente de ríos); días a años (embalses).</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Embalse natural o artificial, o bien una corriente permanente de agua. -Aditamentos para la conversión a una forma útil de energía, en el caso de electricidad, turbina y generador. 	<ul style="list-style-type: none"> -Eficiencias típicas de componentes: Turbinas grandes, más del 90%; microturbinas, del 60 al 80%; generadores, de 98 a 99%. -Eficiencia global en instalaciones grandes y modernas, superior al 90%; en instalaciones vetustas y pequeñas, en torno del 60%.
Energía solar – Fotovoltaica	<ul style="list-style-type: none"> -Nivel de irradiación. -Costo y eficiencia de las celdas. -Almacenamiento de energía y acumulación de polvo y suciedad en las celdas. 	<p>Si bien la energía solar es un recurso ubicuo, resultan idóneas las regiones de alta insolación/ minutos a años.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Sistemas modulares de interconexión en principio ilimitada. -Celdas, inversores DC-AC, baterías para el almacenamiento de la energía y controladores. 	<p>La eficiencia media de conversión de las celdas se ubica entre 6 y 15%; en ensayos controlados ha sido posible lograr hasta un 25%.</p>
Energía solar – fototérmica	<ul style="list-style-type: none"> -Nivel de insolación, ubicación geográfica, condiciones climáticas predominantes. -Magnitud de la componente difusa. -Almacenamiento de la energía. -Disponibilidad de terreno. 	<p>Regiones áridas y semiáridas con elevada insolación normal directa/horas a años.</p>	<p>Se requiere de un colector o concentrador de la radiación, un receptor, medios de transporte y almacenamiento de la energía térmica, así como los equipos necesarios para efectuar la conversión energética.</p>	<p>En sistemas de alta temperatura, la eficiencia neta de conversión solar-eléctrica está en el rango del 13 al 16%, para sistemas cilindro-parabólicos. Las configuraciones de Torre Central ofrecen eficiencias del 17 a 25%. Los factores de planta van de 15 a 28%.</p>
Energía de la biomasa	<ul style="list-style-type: none"> -Volumen disponible y características de la biomasa. -En el caso de cultivos energéticos, uso de tierra, consumo de agua, suministro externo de energía y materiales complementarios. -Para la biomasa residual, labores de selección, recolección y traslado. -Variaciones estacionales. 	<p>Abundante presencia de alguna de las distintas clases de biomasa, preferentemente aquellas que no exijan un pre-procesamiento demasiado complejo/temporadas.</p>	<p>Los componentes varían de acuerdo a la tecnología de conversión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -En biocombustibles líquidos, la eficiencia es de 80 y 88% a partir de semillas oleaginosas y algas ,respectivamente; 39 y 80% vía la fermentación de celulosa y azúcares. -En combustión, del 70% para calor y de 30 a 40% para la generación de electricidad. -En la descomposición anaerobia, de 52 a 67%; y en la producción de carbón vegetal, el valor típico es de 40%.
Energía geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> -Entalpía o gradiente térmico. -Número y profundidad de los pozos de extracción. -Corrosión de materiales en contacto directo con el medio subterráneo. 	<p>Zonas de alta entalpía y de fácil acceso/años.</p>	<p>Se requiere de una fuente de calor geotérmico, un reservorio y un fluido, encargado del transporte de la energía calorífica. Estos últimos, pueden ser provistos de manera artificial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -La temperatura mínima necesaria para generar electricidad es de 90°C, en tal caso la eficiencia es menor del 2%; a mayores temperaturas, la eficiencia se ubica entre 7 y 10%. Tratándose de sistemas CHP, la cifra es cercana al 97%. -El factor de planta es alto, ronda el 98%.

Continuación **Tabla II.2 – Factores determinantes, sitios idóneos, componentes y aspectos técnicos de los recursos energéticos renovables**

(Elaboración a partir de Turkenburg, 2000; IEA, 2003 y 2011b; Goldemberg y Johansson, 2004; Moomaw y col., 2011; WWF, 2011)

Fuente	Factores determinantes	Sitios apropiados/variabilidad	Componentes esenciales para su aprovechamiento	Atributos técnicos relevantes
Energía eólica	-Velocidad anual promedio del viento e intermitencia del mismo.			
	<p data-bbox="386 396 674 427">-Área de barrido del rotor.</p> <p data-bbox="359 456 701 597">-En el caso de generación de electricidad, puntos de interconexión a la red de transmisión para la evacuación de la energía generada.</p> <p data-bbox="401 626 659 683">-Disponibilidad de sitios adecuados.</p>	<p data-bbox="764 427 1018 597">Perímetros costeros, regiones montañosas y planicies con vientos veloces y regulares/minutos a años.</p>	<p data-bbox="1066 334 1451 683">Los elementos de una turbina eólica son: Rotor, donde se acoplan las aspas o paletas; generador, en el caso de producción de electricidad; sistema direccional, que se encarga de orientar conforme a la línea de máxima potencia; sistema de protección, el cual actúa ante ráfagas de viento excesivas; sistema de engranes, por medio del cual se incrementan las revoluciones; torre, que sostiene al rotor y demás accesorios</p>	<p data-bbox="1499 342 1927 423">-Sistemas de uso comunitario y aplicaciones independientes, menos de 500 kW.</p> <p data-bbox="1486 456 1942 513">-Sistemas de pequeña escala, por debajo de los 750 kW.</p> <p data-bbox="1499 542 1927 599">-Sistema de mediana escala, potencias entre 750 y 1,500 kW.</p> <p data-bbox="1478 628 1942 685">-Complejos de gran escala, suman más de 1,500 kW de capacidad.</p>
Energía oceánica	<p data-bbox="352 761 695 932">-Tratándose de la energía mareomotriz, los factores decisivos son la magnitud de los desniveles provocados por las mareas y la capacidad de retención de agua.</p>	<p data-bbox="743 875 1031 1045">-Regiones costeras donde las mareas son de gran envergadura, además de contar con un entorno geográfico favorable/horas a días.</p>	<p data-bbox="1066 875 1451 1248">El aprovechamiento de la energía mareomotriz es ya una realidad en algunas partes del mundo por medio de instalaciones que guardan cierta similitud con las plantas hidroeléctricas. Para el resto de los recursos energéticos oceánicos la tecnología es relativamente nueva. Sólo se cuenta con prototipos de muy variados principios de operación. A la fecha, los prototipos están siendo evaluados y rediseñados.</p>	<p data-bbox="1486 748 1942 948">-Con la energía mareomotriz se puede generar cantidades importantes de energía. Aunque para ello las instalaciones deben ser de grandes dimensiones. Ello con el propósito de compensar sus factores de planta generalmente bajos [20-30%].</p>
	<p data-bbox="352 964 695 1135">-La velocidad, duración y uniformidad de las olas son de importancia capital para el establecimiento de sistemas de captación y conversión de la energía del oleaje.</p> <p data-bbox="338 1164 709 1359">-La diferencia de temperaturas, o concentración de sales, observada entre las aguas superficiales y las cercanas al lecho marino, son cruciales para explotación de esta vertiente de la energía oceánica.</p>	<p data-bbox="743 1078 1031 1248">-Los mares tropicales, en donde la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fondo de las aguas es de por lo menos 20°C.</p>		<p data-bbox="1486 976 1942 1175">-De entre el universo de prototipos para el aprovechamiento de la energía del oleaje, uno de los sistemas más promisorios es el llamado de Columna Oscilante de Agua. Individualmente, son equipos de capacidad reducida y con factores de planta que van de 20 a 35%.</p> <p data-bbox="1486 1205 1942 1375">-En la utilización de los gradientes térmicos de las aguas oceánicas con propósitos energéticos, se distinguen las tecnologías de ciclos cerrado y abierto, así como las híbridas. Sus factores de planta son más altos, del 70 al 80%.</p>

*NOTA: Se refiere a las escalas de tiempo características para la operación de los sistemas de potencia

Tabla II.3 – Aspectos económicos, participantes en la industria, vida útil de las tecnologías de los recursos energéticos renovables

(Elaboración a partir de IEA, 2003 y 2011b; CEC, 2011)

Fuente	Aspectos económicos	Estructura de la inversión inicial*	Participantes en la Industria	Tiempo estimado de vida
Energía hidráulica	Inversión inicial bastante elevada; bajos costos de operación y mantenimiento (OyM); prolongada vida útil.	-Ingeniería civil, del 35 al 60%. -Juego de turbinas, 15-30%. -Equipamiento accesorio para generación de energía eléctrica, del 25 al 35%.	-Cuatro transnacionales dominan el mercado de grandes turbinas; las de menor tamaño son elaboradas por al menos 175 empresas. -Son originarias de EE.UU. y países europeos y asiáticos.	Más de 50 años.
Energía solar – fotovoltaica	Inversión inicial elevada debido al costo de las celdas; mínimos costos de OyM; prolongada vida útil.	-Desarrollo de proyecto, 13%. -Celdas fotovoltaicas, 50%. -Montaje e instalación, 20%. -Inversores y cableado, 11%. -Estructura de soporte, 6%.	Diez compañías acaparan cerca del 90% de la producción mundial de celdas fotovoltaicas; principalmente europeas, estadounidenses y japonesas.	Para la celda, entre 20 y 30 años.
Energía solar – fototérmica	Inversión inicial considerable (costo de la tierra y la mano de obra, capacidad, la utilización o no de un medio de almacenamiento y el nivel de madurez). Los gastos de OyM representan el 20% de las erogaciones a lo largo de toda la vida del proyecto.	-Ingeniería civil, 10%. -Aditamentos de control, 5%. -Reflectores y receptores, de 25 a 40%. -Estructuras, del 15 a 35%. -Transporte y almacenamiento de calor, entre 25 y 30%.	Se tienen registradas alrededor de 25 compañías que diseñan, comercializan u operan sistemas fototérmicos.	En el rango de 20 a 40 años.
Energía de la biomasa	Dada la diversidad de alternativas, la inversión inicial y los costos por OyM son variables. Es de las opciones donde se debe considerar un costo por suministro de combustible.	Dada la amplia gama de opciones tecnológicas para las distintas clases de biomasa, resulta por demás aventurado dar cifras concretas.	Son contados los fabricantes especializados en tecnología para el aprovechamiento energético de la biomasa. Las pocas que existen se localizan en su mayoría en los países del norte de Europa.	Varía según la tecnología de conversión; el promedio es 25 años.
Energía geotérmica	Inversión inicial considerable; costos de OyM más altos en comparación con otras fuentes renovables. La temperatura define el tamaño y constitución de los componentes.	-Exploración, 15%. -Pozos, 25% (en función de la temperatura y composición del fluido). -Campo, 8%. -Instalaciones, 52%.	Cinco consorcios, japoneses, italianos y estadounidenses, encabezan la industria geotérmica; en exploración y caracterización del recurso existen más participantes.	Puede sobrepasar los 50 años.
Energía eólica	Para sistemas costa afuera la inversión inicial es superior a la de emplazamientos terrestres. Los costos de OyM están supeditados en buena medida a la accesibilidad del sitio.	-Complejos terrestres: Turbinas, 80%. infraestructura e interconexión, 20%. -Complejos costa afuera: Turbinas, 55%; cimientos, 19%; interconexión, 17.5%; otros, 8.5%.	Se especula que más del 80% del mercado internacional está en manos de siete grandes compañías; asentadas en los países con mayor capacidad instalada.	Para las turbinas actuales, de 20 a 30 años.
Energía oceánica	Para proyectos de gran escala, la inversión inicial es muy alta en tanto que los costos de OyM puede ser módicos.	Las cifras son difíciles de precisar debido al carácter incipiente de muchas de las tecnologías hasta ahora sugeridas.	Existen cerca de una veintena de compañías involucradas en el desarrollo y promoción de la energía oceánica; en su mayoría están asentadas en los EE.UU. y la parte norte de Europa.	De 25 a más de 50 años.

*Nota: Se trata solamente de valores aproximados. Las cifras reales estarán determinadas por la capacidad del sistema, el tipo específico de tecnología, las condiciones particulares del lugar, restricciones en materia ambiental, entre otras cuestiones.

Tabla II.4 – Aplicaciones, principales ventajas e inconvenientes de los recursos energéticos renovables

(Elaboración a partir de Turkenburg, 2000, IEA, 2003, UN-FAO. 2006; Arvizu y col., 2011)

Fuente	Aplicaciones exploradas	Potencial técnico global estimado	Atributos positivos	Atributos negativos
Energía hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> -Aporte de energía mecánica para distintos fines. -Generación de electricidad en pequeña, mediana y gran escala. 	<p>Para electricidad: Máximo: 52 EJ/año Mínimo: 50 EJ/año</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Mínimas emisiones de GEI <i>in situ</i>. -Regulación del caudal de ríos. -Ayuda en la eliminación de la escoria arrastrada por el agua. -Las mini y micro-hidráulicas no implican el desplazamiento de comunidades, se instalan “a boca de río”. Asimismo, son idóneas para la generación distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> -En el caso de grandes proyectos, las afectaciones al hábitat de flora y fauna acuáticas son de consideración. -Dificulta el tránsito migratorio de peces. -Favorece la acumulación de sedimentos que al descomponerse arrojan CO₂ y CH₄. -Ruido intenso ocasionado por el funcionamiento de la maquinaria. -Alteración del perfil natural del río -Impacto sobre el paisaje.
Energía solar – fotovoltaica	<p>En función de la capacidad y número de unidades, es posible proveer energía eléctrica para alimentar desde pequeños aparatos, hasta comunidades enteras a través de sistemas de de gran capacidad conectados o no al red de distribución.</p>	<p>Como fuente de energía primaria: Máximo: 49,837 EJ/año Mínimo: 1,575 EJ/año</p>	<ul style="list-style-type: none"> -No desprende emisiones <i>in situ</i> de ningún tipo. -Operación silenciosa. -Su instalación es relativamente sencilla y versátil, pudiendo sustituir inclusive materiales tradicionales de construcción. -Se colocan en el punto mismo de consumo, compatible con el concepto de generación distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> -La fabricación de las celdas supone un elevado consumo de energía, sobre todo eléctrica, de ahí que se diga que “heredan” las emisiones por la generación de dicha energía; asimismo, se emplean sustancias tóxicas, gases y metales, en su elaboración. -Ocupan grandes extensiones de terreno, lo cual puede ser causa de tensiones por la competencia de usos.
Energía solar – fototérmica	<p>Calentamiento de agua, calefacción, secado de productos agrícolas y marinos, desalación y potabilización de agua, producción de vegetales en invernaderos, refrigeración y por supuesto generación de electricidad.</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Es técnicamente plausible obtener una potencia de salida apta para distintos propósitos. -Si bien en ciertas configuraciones pueden registrarse emisiones, éstas son predominantemente vapor de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> -Consumo de agua similar al observado en plantas térmicas convencionales. -Demanda de terreno. -Si se opera conforme a un esquema dual apoyado por algún combustible de origen fósil, se tendrán emisiones distintas de vapor de agua durante su funcionamiento.
Energía de la biomasa	<ul style="list-style-type: none"> -Mediante combustión directa de biomasa sólida o subproductos gaseosos, como biogás, se obtiene energía térmica para calefacción, calentamiento de agua y cocción de alimentos. Además, son muy utilizados para proporcionar iluminación. -Combustibles líquidos para el sector transporte. -Generación de electricidad. 	<p>Como fuente de energía primaria: Máximo: 500 EJ/año Mínimo: 50 EJ/año</p>	<ul style="list-style-type: none"> -En términos energéticos, no existen emisiones netas de CO₂. -Los cultivos energéticos pueden contribuir a la captura definitiva de CO₂ a través de raíces y otras porciones en principio no aprovechables. -Se disponen de múltiples variantes tecnológicas con igual número de opciones de biomasa potencialmente útiles. -Es posible rehabilitar suelos degradados por medio de cultivos con fines energéticos. -El potencial de la biomasa residual, que no tiene otros usos más que el energético es enorme. 	<ul style="list-style-type: none"> -Tratándose de cultivos con fines energéticos, causa controversia la pretensión de utilizar tierras fértiles, el consumo de agua, la aplicación de fertilizantes en altas dosis, y la eventual erosión de suelos. -La mayor preocupación reside en la competencia con otros usos y sus posibles repercusiones sobre la seguridad alimentaria. -Incremento de emisiones y partículas resultantes de la quema de algunos de los combustibles obtenidos a partir de biomasa; por ejemplo, los óxidos de nitrógeno.

Continuación Tabla II.4 – Aplicaciones, principales ventajas e inconvenientes de los recursos energéticos renovables

(Elaboración a partir de Turkenburg, 2000, IEA, 2003, UN-FAO. 2006; Arvizu y col., 2011)

Fuente	Aplicaciones viables	Potencial técnico global estimado	Atributos positivos	Atributos negativos
Energía geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> -Suministrando energía térmica de manera directa para calefacción, acondicionamiento de alimentos, industrias químicas, fermentación, teñido de telas, entre otros usos. -Generación de energía eléctrica conectada a la red principal o de manera descentralizada. 	<ul style="list-style-type: none"> -Para energía térmica: Máximo: 312 EJ/año Mínimo: 10 EJ/año -Para electricidad: Máximo: 1,109 EJ/año Mínimo: 118 EJ/año 	<ul style="list-style-type: none"> -Emite mucho menos contaminantes que las fuentes y tecnologías convencionales, en particular, los niveles de descarga de CO₂ son muy inferiores a los registrados en las típicas centrales térmicas. -Los fluidos geotérmicos de baja a media temperatura tienen concentraciones mínimas de químicos que pueden incidir sobre el equilibrio de los ecosistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Se producen gases no condensables (H₂S, SO₂, CH₄, CO₂). -Aguas residuales con potencial efecto contaminante debido a las sustancias químicas en ellas presentes. -Hundimientos a consecuencia de la extracción del fluido geotérmico. -Contaminación auditiva originada por la operación rutinaria de la central. -Incremento en la frecuencia de la actividad sísmica. -Merma en el valor estético de zonas prístinas.
Energía eólica	<ul style="list-style-type: none"> -Obtención de energía mecánica con distintos usos como, por ejemplo, trituración de granos y bombeo de agua. -Generación de energía eléctrica para comunidades aisladas y de pocos habitantes. -Generación de energía eléctrica a gran escala para inyectar a la red eléctrica. -Configuraciones híbridas con el respaldo de combustibles fósiles. 	<ul style="list-style-type: none"> Para electricidad: Máximo: 580 EJ/año Mínimo: 85 EJ/año 	<ul style="list-style-type: none"> -Son nulas las emisiones <i>in situ</i> debidas a la operación de las turbinas. -Un elevado porcentaje de los materiales usados en las turbinas modernas pueden provenir de materias primas recicladas. -El terreno ocupado por un complejo eólico eventualmente puede ser empleado simultáneamente para otras actividades, como agricultura y ganadería. 	<ul style="list-style-type: none"> -Dado que la densidad energética del viento es baja, se requiere de un número importante de turbinas y, por tanto, de un área considerable de terreno si se pretende captar cantidades significativas de energía. -Emisiones acústicas de origen mecánico y aeroacústico, en ambos casos su intensidad depende primordialmente de la velocidad del viento. -Obstaculiza las rutas migratorias de aves, así como el hábitat de éstas y otras especies animales. -Alteraciones en la región submarina cuando se trata de centrales costa afuera (<i>off shore</i>) Impacto visual.
Energía oceánica	<ul style="list-style-type: none"> -Obtención de energía mecánica por medio de ruedas hidráulicas para trituración de granos y bombeo de agua. -También se aprovecha para la generación de electricidad para abastecer, en principio, a los poblados aledaños. 	<ul style="list-style-type: none"> Para electricidad: Máximo: 331 EJ/año Mínimo: 7 EJ/año 	<ul style="list-style-type: none"> -Los océanos manifiestan una opción energética con un vasto potencial teórico, varias veces superior al consumo mundial total. -El impacto visual puede ser minimizado si los dispositivos para su aprovechamiento se instalan lo suficientemente lejos de las costas. 	<ul style="list-style-type: none"> -El montaje de sistemas para el uso de la energía mareomotriz, en particular de los diques, puede lesionar de manera significativa el ecosistema local marino, afectar la vida en las comunidades costeras e incidir de modo negativo en las industrias pesquera y naviera. -La modalidad de conversión de la energía térmica de los océanos puede liberar emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Tabla II.5 - Ventajas del uso de fuentes renovables de energía

(Elaboración a partir de Goldemberg y col. 2001; MNRC, 2005; Masera y col., 2006; Rincón, 2010)

Ventajas ambientales			
Problemática	Causas	Efectos	Forma en que las fuentes renovables contribuyen a solucionar la problemática
Cambio climático	Elevación de la temperatura promedio del planeta a causa del incremento en la concentración de GEI derivados de actividades humanas, en especial la quema de combustibles fósiles.	Eventos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes; derretimiento del hielo de los polos; aumento del nivel del mar; expansión del área de proliferación de vectores infecciosos.	Reducen el consumo de combustibles fósiles y, por ende, de las emisiones de GEI asociadas.
Contaminación local y global	Se debe a la acumulación de sustancias (NO _x , SO _x , CO, Pb) y partículas de distintos tamaños emanadas de la utilización de los combustibles habituales. Los altos niveles de ruido y el deterioro visual son otras de las formas de contaminación.	Perjuicios tanto para la salud humana (enfermedades crónicas de todo tipo) como para el entorno natural en su conjunto.	La sustitución, parcial o total, de los combustibles de origen fósil aminorar la producción de contaminantes. Algunos de los sistemas de fuentes renovables se pueden incorporar a la arquitectura misma y reducir de manera sensible el impacto visual, al tiempo que su operación es silenciosa.
Ventajas sociales			
Desocupación creciente	En el sector energético, las tecnologías convencionales se basan en la explotación de recursos altamente concentrados en contadas regiones del mundo; son intensivas en el uso de capital.	Grandes flujos de dinero salen de la economía local y son transferidos hacia unas cuantas empresas, regiones o países; se pierde el eventual efecto multiplicador de dichos recursos.	Típicamente, la explotación de recursos renovables es más intensiva en mano de obra, el potencial para generar empleos es considerable, tanto en la manufactura e implementación de las tecnologías, como en la prestación de los servicios asociados.
Pobreza en comunidades rurales	Las comunidades rurales de los países en desarrollo han sido históricamente abandonadas, padecen un alarmante rezago en temas esenciales como salud, educación y empleo.	La calidad de vida de los habitantes de estas comunidades dista de los niveles razonablemente aceptables. La falta de oportunidades de empleo los obliga a marcharse de sus lugares de origen.	El despliegue de tecnologías de fuentes renovables puede estimular la participación e integración de las comunidades. Ello mediante la creación de fuentes de empleo y la captación de inversiones, reactivando así la economía local. Además se incrementan las posibilidades de acceso a servicios energéticos.
Ventajas económicas			
Elevación de los precios de los energéticos convencionales	La demanda continua creciendo, no así el descubrimiento de nuevos yacimientos. La explotación de las reservas de tipo no convencional supone costos e impactos ambientales mayores.	Si la demanda crece por encima de la oferta, entonces, bajo la lógica de mercado, el precio aumenta. Si se incrementa el costo de los energéticos se pone en riesgo la satisfacción de necesidades.	A menudo, los sistemas que aprovechan fuentes renovables resultan económicamente competitivos cuando se ponderan los beneficios y costos registrados a lo largo de toda su vida útil.
Volatilidad de los precios de los energéticos convencionales	Alzas y descensos, que obedecen a diversas circunstancias de índole local, nacional, regional, continental y global, en los precios del carbón, gas natural y petróleo, y que se transmite a sus múltiples productos derivados.	Enormes dificultades financieras para individuos, familias, industrias y países enteros, principalmente aquellos que son importadores netos de energéticos.	Los costos asociados a la operación de las tecnologías de fuentes renovables, además de ser en general bajos, parecieran estar sujetos a una mínima variabilidad.

La intrínseca intermitencia de los fenómenos naturales ligados a la mayoría de los recursos renovables, es quizá la mayor de sus desventajas puesto que incide directamente en la confiabilidad del suministro energético. Dicha intermitencia implica que la magnitud, o bien las características del recurso a explotar sean hasta cierto punto inciertas. Así, en ocasiones el recurso podrá ser insuficiente para cubrir una demanda dada, o, por el contrario, presentarse en cantidades excesivas que no puedan ser aprovechadas e incluso amenacen la integridad

física de las instalaciones. Esta dosis de incertidumbre con respecto a su aporte energético, se acentúa por las deficiencias de las tecnologías de almacenamiento de energía que a la fecha están disponibles. Sin embargo, no todas las fuentes renovables padecen este inconveniente en igual medida. Mientras que, por un lado, las energías solar y eólica tienen una variabilidad muy alta, por el otro, las energías hidráulica y de la biomasa siguen un patrón estacional más o menos predecible, y la energía geotérmica es enteramente ajena a esta situación.

La dispersión propia de muchos de los recursos renovables reviste un carácter ambivalente. Por una parte, favorece el nivel de accesibilidad a estos recursos, eleva las necesidades de mano de obra para su explotación y pone límites a las tentativas de monopolización. Por otra, su marcada dispersión afecta negativamente su densidad energética. La repercusión directa de ello se observa en el tamaño de los emplazamientos apropiados para su captación y conversión en cantidades importantes. El caso de la energía solar fotovoltaica resulta bastante ilustrativo en vista de los requerimientos de espacio para la instalación de un número considerable de celdas con objeto de hacer sustantiva la contribución del sistema. El vasto terreno ocupado difícilmente puede ser utilizado en actividades paralelas, al tiempo que podría perturbar el equilibrio ecológico del área donde se dispongan.

Un rasgo hasta ahora común para todas las fuentes renovables es su considerable costo de inversión y, por consiguiente, de financiamiento. Esta situación puede atribuirse a varios factores, entre ellos el tipo de materiales y procesos empleados durante su fabricación, el hecho de que no se produzcan ni oferten en grandes cantidades y, ligado a esto último, la tendencia a importar el producto o equipo terminado. En algunos casos las tecnologías no han madurado lo suficiente como para ofrecer un desempeño técnico-económico competitivo frente a las tecnologías convencionales, lo cual obstaculiza su desarrollo. Se espera, no obstante, que los costos disminuyan de manera considerable gracias al efecto combinado de la investigación, el desarrollo y la demostración, así como del aprendizaje que pueda extraerse de su incursión paulatina en el mercado (IEA, 2003 y 2008). Es así, que tanto los aspectos positivos como negativos referentes al aprovechamiento de las fuentes renovables de energía se conjugan para delimitar su nivel de participación y ritmo de crecimiento actuales en el sistema energético global.

11.2.2 - Nivel actual de participación de las fuentes renovables de energía

En general, las aplicaciones de las fuentes renovables se dividen en cuatro áreas primarias, a saber: La generación de electricidad, la producción de energía térmica (enfriamiento), combustibles para el sector transporte y servicios energéticos descentralizados para las comunidades rurales (REN21, 2011). Esta versatilidad de las fuentes renovables permite un potencial de satisfacción de múltiples necesidades o usos finales en todos los sectores partícipes de la actividad económica. Así, las fuentes renovables son capaces de proveer desde calor y potencia motriz para procesos industriales, hasta iluminación, calefacción, calentamiento de agua, cocción de alimentos, movilidad y, mediante la electricidad a partir de ellas generada, el funcionamiento de infinidad de aparatos.

La participación de las fuentes renovables en el suministro de energía primaria a nivel mundial contabilizada para el año 2008 fue de 12.9%, lo que significa que de los 492 EJ consumidos en ese año, las fuentes renovables aportaron en conjunto 63.5 EJ (Figura 11.2).⁴⁰ La energía

⁴⁰ La proporción en que participan las fuentes renovables puede variar de acuerdo a la metodología seleccionada para su cuantificación. Así, por ejemplo, en REN21 (2011) se estima que la aportaron de dichas fuentes en 2009 fue del 16%, esto con relación al consumo global de energía final. Esto da pie para precisar que hay tres procedimientos fundamentales para medir el aporte de las fuentes renovables en el aprovisionamiento de energía (REN21, 2007). Uno de ellos, adoptado por la

derivada de la biomasa es la que realiza la mayor contribución, al ascender al 10.2% del total de energía primaria, principalmente debido a su amplia utilización en cocción de alimentos y calefacción de espacios en el ámbito residencial en los países en desarrollo. La hidroenergía proporciona un 2.3%, el 0.4% restante proviene de las energías eólica (0.2%), solar directa (0.1%), geotérmica (0.1%) y oceánica (0.002%) (Moomaw y col., 2011).

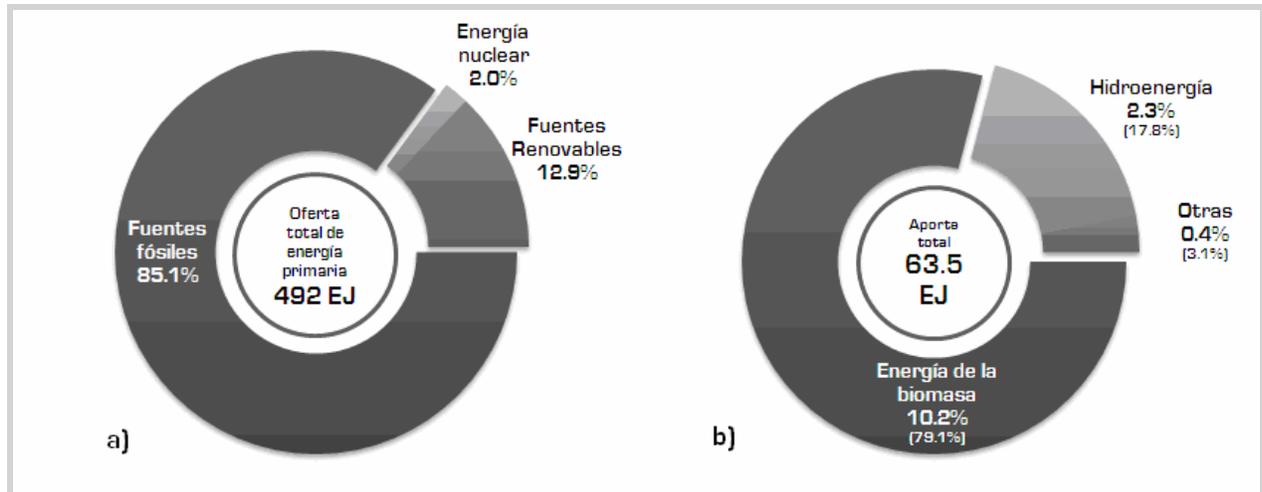


Figura II.2 – Participación de las fuentes renovables en el aprovisionamiento mundial de energía primaria (a) y contribución de cada fuente (b) en el 2008
(Elaboración a partir de Moomaw y col., 2011)

Con respecto a la utilización de las fuentes renovables para la obtención de las distintas modalidades de energía, sus contribuciones relativas en las actividades de generación de energía eléctrica, térmica y combustibles para el sector transporte, se muestran en la Figura II.3. Ahí se observa que en el rubro de generación de energía eléctrica, los recursos renovables, en particular la hidroenergía, colaboraron con 19% de la producción total mundial registrada en 2008. En ese mismo año, 2% de la oferta mundial de combustibles para el sector transporte provino de la bioenergía, fuente que también cubrió hasta 25% de la demanda mundial de calor. Para este último segmento, las contribuciones de las energías solar-fototérmica y geotérmica alcanzaron un 2%, cifra que sumada al aporte de la bioenergía da un total de 27%.

Si bien en términos generales nunca se ha detenido, el ritmo de expansión de las fuentes renovables de energía es diferente para cada una de ellas. Si se considera el lapso de 2005 a 2010, la capacidad instalada de energía solar-fotovoltaica, conectada y no conectada a la red eléctrica, creció a una tasa promedio anual de 49%. La producción de biodiésel, por otro lado, hizo lo propio pero a un ritmo de 38%; la energía eólica al 27%, la energía solar térmica de concentración al 25%, la producción de etanol al 23%, la energía solar térmica de baja temperatura al 16%, la energía geotérmica al 4%; y por último, la hidroenergía se expandió a una velocidad promedio de 3% anual (REN21, 2011).

Debido a cuestiones de índole geográfica, ambiental, económica, social y política, el nivel de inclusión y la trayectoria de crecimiento de las fuentes renovables no son uniformes en todas las naciones del planeta, En México, por ejemplo, los recursos energéticos renovables

Agencia Internacional de Energía (AIE), calcula el porcentaje con base en la energía eléctrica generada por las renovables y refiere los resultados al total de la energía primaria. Otro método, conocido como de sustitución, consiste en determinar el equivalente en energía primaria fósil de la electricidad producida por medio de fuentes renovables. Una tercera opción remite los resultados al consumo de energía final, esto es, a la que llega al punto de consumo, contabilizando por igual toda la electricidad, sin hacer distinciones en cuanto a su origen.

proveyeron solamente el 6.2% de la producción nacional de energía primaria durante 2009, de ese valor, más de la mitad, 3.5%, corresponde a energía derivada de la biomasa en forma de leña y bagazo de caña de azúcar (Figura II.4). La energía geotérmica también realiza una contribución sustantiva, incluso por encima de la correspondiente a la energía hidráulica.⁴¹



Figura II.3 – Contribución de las fuentes renovables de energía en distintos rubros energéticos
[Elaboración a partir de Moomaw y col., 2011]

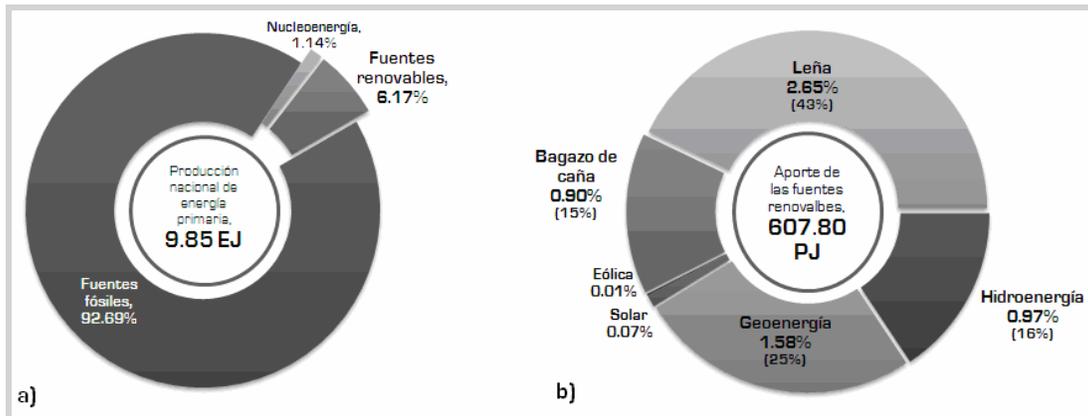


Figura II.4 – Participación de las fuentes renovables en la producción nacional de energía primaria (a) y contribución de cada fuente (b) en el 2009
[Elaboración a partir de SENER, 2009]

En México, las fuentes renovables que son actualmente explotadas se utilizan en mayor medida para la producción de energías eléctrica y térmica para su uso en los sectores

⁴¹ Esta observación puede crear confusión con respecto a la superioridad en términos de la capacidad instalada para la explotación de la energía hidráulica en comparación con la correspondiente a la energía geotérmica. Conviene recordar, sin embargo, que los porcentajes están expresados en relación al total de energía primaria, y dado que la eficiencia de las centrales geotérmicas en suelo mexicano es muy inferior al valor típico para las centrales hidroeléctricas, la magnitud del recurso primario consumido en el caso de las primeras, vapor endógeno, resulta mayor al contabilizado para las segundas, y por consiguiente, su contribución al total de energía primaria es mayor.

residencial, comercial, público e industrial. En la generación de electricidad se dispone de emplazamientos para la conversión de las energías hidráulica, geotérmica y eólica (SENER 2012). Mientras tanto, el aprovechamiento de la energía solar se concentra en los sectores residencial y comercial, y un mínimo en el industrial, tanto para la obtención de electricidad como, en mayor medida, de energía térmica. La mayor parte de la biomasa, por su parte, se destina como leña al aprovisionamiento de energía térmica en el sector residencial, el otro tanto, en forma de bagazo de caña, es empleado en actividades industriales como insumo para generar calor y electricidad. Con respecto a la producción nacional de biocombustibles líquidos para el sector transporte, si bien se tienen algunas instalaciones en operación, ésta es todavía incipiente y muy lejana de los niveles de producción observados en otros países.

Pese al extraordinario avance registrado en años recientes, es casi un hecho que las fuentes renovables continuarán opacadas por los energéticos de origen fósil cuando menos en el corto y, muy probablemente, mediano plazos. Esta predicción se sustenta en las grandes expectativas depositadas en los recursos fósiles considerados como no convencionales.⁴² La explotación de esos recursos, hasta hace algún tiempo inviable, se perfila ahora como técnica y económicamente plausible. Los presagios que auguran un incremento en la demanda de energía resultado, entre otras cosas, del crecimiento poblacional y de eventuales mejoras en el nivel de ingreso, sobre todo en las naciones en desarrollo, son claves para comprender esta situación. A ellos hay que añadir la subsistencia de intereses corporativos, geopolíticos y económicos que se benefician de la continuación del paradigma energético estructurado en torno de los combustibles fósiles.

No obstante, en todo el mundo es patente la inclinación, algunas veces titubeante, hacia las fuentes alternas de energía, preferentemente las fuentes renovables. La razón principal de ello es que las fuentes renovables se consideran elementos clave en la configuración de un modelo de desarrollo sustentable. Conviene recordar que esta forma de desarrollo aspira a atender las necesidades actuales y atenuar las disparidades económicas y sociales, pero sin poner el riesgo la capacidad de generaciones posteriores de satisfacer sus propios requerimientos.

De acuerdo con lo antes comentado en relación al aprovisionamiento energético actual tanto a nivel mundial como nacional, la energía obtenida de las múltiples formas de biomasa hace una aportación significativa. La bioenergía participa, como desde hace ya bastante tiempo, de modo sustantivo en la cobertura de los requerimientos energéticos de la humanidad. Hoy día, la contribución de la bioenergía ya no es solamente a través de las antiquísimas prácticas tradicionales, todavía muy socorridas en asentamientos rurales en buena parte de los países en desarrollo. La tecnología actualmente disponible para el aprovechamiento de la bioenergía le concede una gran versatilidad de aplicaciones, junto con insoslayables contribuciones en varias esferas. Todo ello intentará ser demostrado a continuación.

II.3 - Energía de la biomasa

Conocida también como bioenergía, la energía de la biomasa es aquella que se obtiene, como su nombre lo expresa, de materiales orgánicos de origen biológico no fosilizados.⁴³ Este material orgánico resulta de la actividad fotosintética de organismos vegetales, por medio de

⁴² Llamam fuertemente la atención los hidrocarburos impregnados en rocas de pizarra, muy populares por sus denominaciones en inglés de *shale oil* y *shale gas*, y a partir de los cuales se pueden obtener gas natural, condensados y petróleo crudo. Existen otras fuentes no convencionales como el gas grisú, presente en las minas subterráneas de carbón; las arenas bituminosas, pastas grasosas compuestas de hidrocarburos de gran tamaño y de las cuales se obtiene crudo sintético; y el crudo extrapesado.

⁴³ Véase la nota al pie al final del Capítulo I

la cual, la energía solar se convierte y almacena en forma de energía química, susceptible de ser nuevamente transformada y liberada por distintos medios. El repertorio de la biomasa, expuesto sintéticamente en la Tabla II.6, también incluye materiales de desecho procedentes de animales, el caso específico de sus excretas, y de actividades humanas, lo que corresponde a la porción orgánica de los residuos sólidos y líquidos. Quizá una de las mayores ventajas de la biomasa en comparación con muchas de las otras fuentes renovables de energía, es que constituye en sí misma una forma de almacenamiento de energía. Esto significa que puede disponerse de ella en cualquier momento, en tanto no se encuentre en una etapa avanzada de descomposición natural.

Tabla II.6 – Fuentes de biomasa aprovechable para fines energéticos

(Elaboración a partir de IEA, 2003; Maserá y col., 2006)

Alternativas de biomasa	Ejemplos
Combustibles de madera provenientes de bosques naturales y plantaciones de rápido crecimiento	<i>Comprende materiales leñosos extraídos de árboles, arbustos, matorrales y formas similares de vegetación.</i>
Subproductos de la extracción forestal y la industria maderera	<i>Los primeros abarcan los desechos maderables que resultan de las prácticas de extracción de la madera comercial; los segundos, los desechos generados en los aserraderos.</i>
Subproductos agrícolas	<i>Se generan en el terreno de siembra, e incluyen a las hojas, puntas y rastrojo que se retiran de distintos productos como cereales, leguminosas, caña de azúcar.</i>
Subproductos agroindustriales	<i>Aquellos remanentes del procesamiento primario de insumos agrícolas, Pertenecen a esta categoría, por ejemplo, el bagazo de la caña de azúcar, la cáscara del arroz y los olotes del maíz.</i>
Cultivos energéticos	<i>Son plantaciones de productos que contienen azúcares, almidón, o aceites sembradas ex profeso para la elaboración de combustibles. En fechas recientes se ha estado experimentando con productos herbáceos lignocelulósicos. En etapas preliminares, el cultivo de plantas acuáticas y algas para la producción directa o indirecta de biocombustibles.</i>
Subproductos pecuarios	<i>Esencialmente se trata de las excretas de aves de corral, bovinos, porcinos, caprinos y ovinos.</i>
Subproductos de origen municipal	<i>La fracción orgánica de los desechos sólidos, los lodos o biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, efluentes industriales no tóxicos de alto contenido orgánico.</i>

II.3.1 – Recursos de la biomasa para la obtención de energía

Las cifras relativas a la utilización con propósitos energéticos de las variedades de biomasa empleadas actualmente se muestran en la Figura II.5. Al examinar la información, queda patente el hecho de que la mayor parte de la energía obtenida de la biomasa proviene de combustibles de la madera (materiales leñosos). Lo anterior responde en buena medida al elevado consumo de estos recursos por parte de hogares y pequeñas industrias asentadas en zonas rurales, y también urbanas, de los países en desarrollo. En este sentido, suele hacerse

la distinción entre lo que se ha convenido en llamar, por un lado, “biomasa tradicional” y, por otro, “biomasa moderna”.

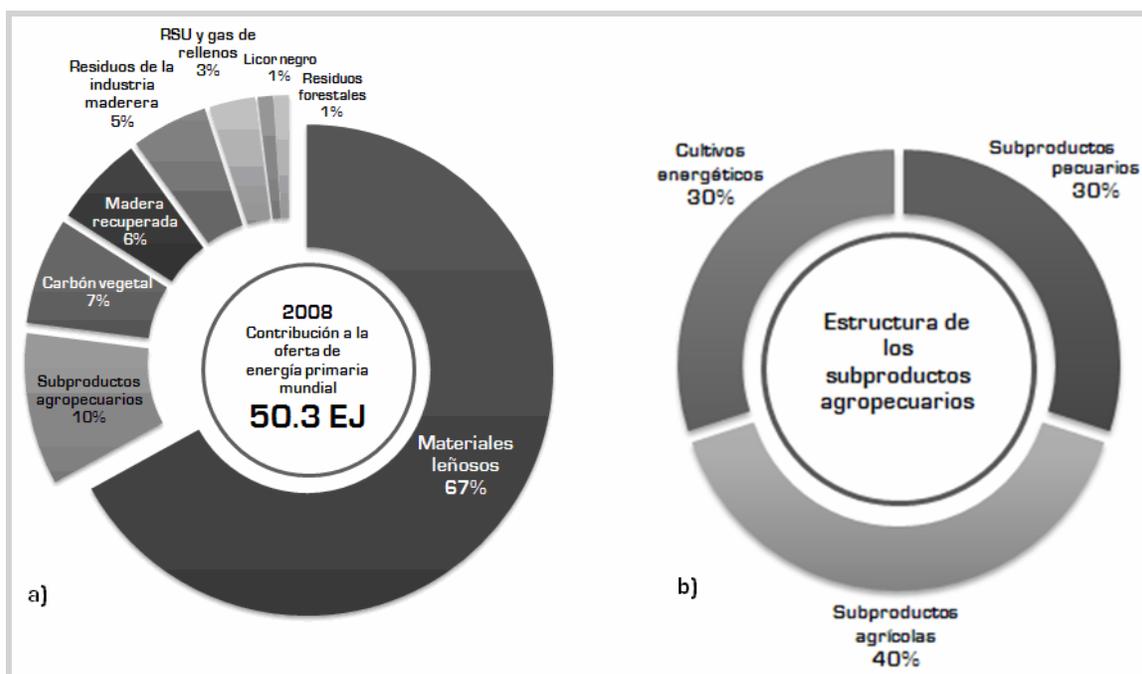


Figura II.5 – Participación relativa de las variedades de biomasa en la contribución de ésta a la energía primaria mundial (a) y detalle de la estructura de los subproductos agropecuarios (b)
(Elaboración a partir de Arvizu y col., 2011)

Con una mayor difusión, la biomasa tradicional alude a productos como la leña, la paja y los estiércoles secos. Estos combustibles son usados para la cocción de alimentos, iluminación y calefacción por un alto porcentaje de habitantes de los países subdesarrollados, quienes por lo general los utilizan de modo intensivo valiéndose de rudimentarias tecnologías para extraer su energía. La biomasa moderna, en cambio, engloba a las tecnologías que, en principio, aprovechan de un modo más eficiente los recursos biomásicos. Aquí se incluyen aquellos sistemas que sintetizan energéticos secundarios, sólidos, líquidos y gaseosos, aptos para la generación de energía térmica, eléctrica, o ambas, y como combustibles para vehículos. Conviene apuntar que, según cifras del 2008 reportadas en Arvizu y col. (2011), la biomasa moderna representó a nivel mundial tan sólo 22.5% del total de la energía derivada de la biomasa, el resto se obtuvo entonces por medio de las prácticas tradicionales.

Si bien a escala mundial la explotación de la bioenergía muestra un incremento sostenido en términos absolutos en las últimas 4 décadas, su contribución al aprovisionamiento energético no es uniforme en todos los países. Por ejemplo, en términos relativos, en los países más industrializados la energía de la biomasa hace una módica contribución a su oferta total de energía primaria. A este respecto, cifras del 2006 muestran que el aporte de la bioenergía en esas naciones se ubicó entre el 1 y el 4% de la energía primaria total (Chum y col., 2011). Destaca sobre todo su empleo en la generación de electricidad para abastecer al sector industrial. Cabe apuntar que para esta modalidad de aprovechamiento de la biomasa se avizora un crecimiento importante en años venideros (GBEP, 2008).

En naciones con un nivel de desarrollo medio, la bioenergía reporta porcentajes más altos de participación en comparación con los países desarrollados. Según cifras del 2006, ésta se ubicó entre 5 y 27% de su oferta de energía primaria. Mientras, para los países en condiciones más precarias, la contribución de la bioenergía tiende a ser más sustantiva, de tal

suerte que para ese mismo año, alcanzó cerca del 80%, con un predominio, tanto aquí como en los países medianamente desarrollados, del aprovechamiento por la vía tradicional (Chum y col., 2011). Se prevé que el empleo energético de la biomasa continúe aumentando en todo el mundo, abandonando gradualmente las formas tradicionales de su utilización y prestando mayor atención a los métodos modernos de conversión. Ello es muy probable que ocurra, toda vez que se proyecta un potencial técnico de la biomasa que podría llegar a los 500 EJ por año para el 2050 (Arvizu y col., 2011).

En el contexto nacional, los principales recursos de la biomasa utilizados con fines energéticos son la leña, destinada al uso residencial y de pequeñas industrias del ámbito rural, y el bagazo de caña, empleado por las industrias azucarera y, en proporción inferior, la de celulosa y papel (Masera y col., 2006). Abundando en este sentido, información reportada en SENER (2009) puntualiza que la biomasa aportó en 2009 cerca de 350 PJ al total de energía primaria producida en México, lo que equivale a poco más del 3.5% de dicha producción. De ese porcentaje, aproximadamente dos terceras partes corresponden a la leña que es consumida a través de las modalidades tradicionales (Figura II.4).

Esa modesta participación de la bioenergía en la matriz energética nacional, puede acrecentarse significativamente toda vez que se cuentan con el potencial para producir y aprovechar mejor los recursos de la biomasa. En ese sentido, estimaciones realizadas por Masera y col. (2006) manifiestan un potencial técnico, sumando las contribuciones de una amplia gama de recursos, de hasta 4,550 PJ por año (Figura II.6). Esta cifra representa 13 veces el aporte de la biomasa a la energía primaria producida a escala nacional en 2009.⁴⁴

En México, los usos finales que tienen la energía de la biomasa son de índole mayoritariamente térmica (Figura II.7). Incluyen la cocción de alimentos, el calentamiento de agua y la calefacción, particularmente en el ámbito residencial rural. Ahí se opta por la combustión de los materiales leñosos en fogones abiertos, que si bien son versátiles y económicos, no permiten el aprovechamiento eficiente del recurso y tienden a favorecer la contaminación en espacios interiores (Masera y col., 2006). De igual modo, un número importante de pequeñas industrias del medio rural se valen de la biomasa leñosa para la realización de sus actividades productivas, abarcando desde tabiquerías, hasta talleres alfareros, panaderías y otras tantas (Masera y col., 2006). El bagazo de caña también se emplea predominante para suministrar calor, si bien en ocasiones se hace con la generación simultánea de electricidad (cogeneración). Ambas formas de energía son suministradas a los procesos que tienen lugar en los ingenios azucareros y en otras pocas industrias, como la papelería (Masera y col., 2006).

Como se aprecia, buena parte de los recursos biomásicos son empleados de manera directa para proveer energía mediante su combustión. No obstante, esta vía resulta en general poco eficiente y potencialmente pernicioso para la salud de efectuarse sin las precauciones debidas y careciendo de los implementos adecuados. Por fortuna, gracias al permanente progreso técnico, en la actualidad se dispone de una gama más amplia de tecnologías de conversión, de características igualmente variadas. A través de éstas es posible aprovechar de mejor

⁴⁴ Es oportuno remarcar las diferencias esenciales entre las distintas clases de potenciales. El potencial teórico se relaciona con la cantidad máxima de energía que puede obtenerse de un recurso dado tomando en consideración su contenido energético, haciendo a un lado todo tipo de barreras. Cuando se incorporan los rendimientos de las tecnologías de conversión existentes y competencia de usos, se hace alusión al potencial técnico, el cual, sin embargo, omite lo referente a costos y políticas. El potencial económico pondera además los costos y beneficios sociales asociados a la explotación del recurso. Por último, el potencial comercial consiste en la cantidad de energía que se obtendría según las condiciones actuales y futuras del mercado, en esencia lo concerniente a los porcentajes de ganancia fijados por el sector privado. Otra categoría un tanto desconocida es el potencial de desarrollo sustentable, que se entiende como la magnitud de la energía que se esperaría obtener guardando un balance ideal entre las exigencias sociales, económicas y ambientales.

manera las bondades y complementariedades que ofrecen los distintos tipos de biomasa, y generar productos secundarios más flexibles y con un rango más amplio de aplicaciones que comprende desde la producción de energía térmica, hasta la generación de electricidad y los servicios de movilidad terrestre, aérea y marítima.

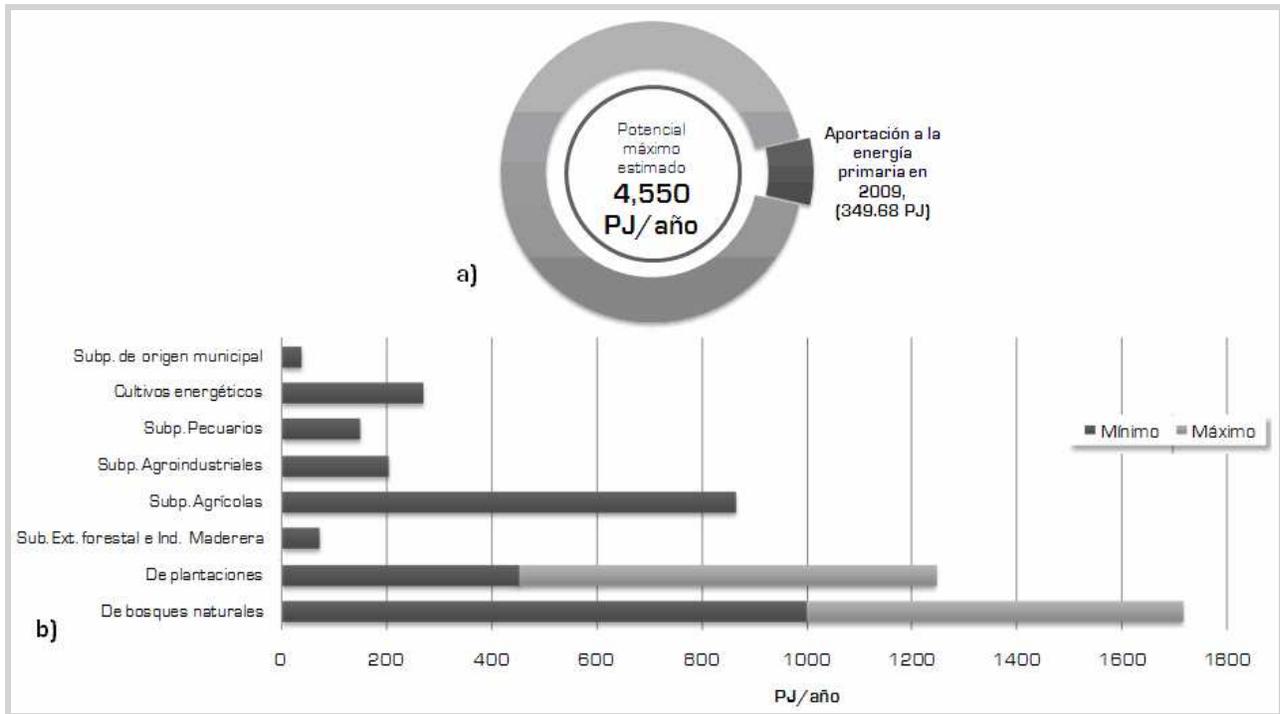


Figura II.6 – Comparativa entre el potencial estimado y el aprovechamiento actual de la biomasa en México (a) y potenciales calculados correspondientes a los distintos tipos de recursos (b)
(Elaboración a partir de Masera y col., 2006; SENER, 2009)

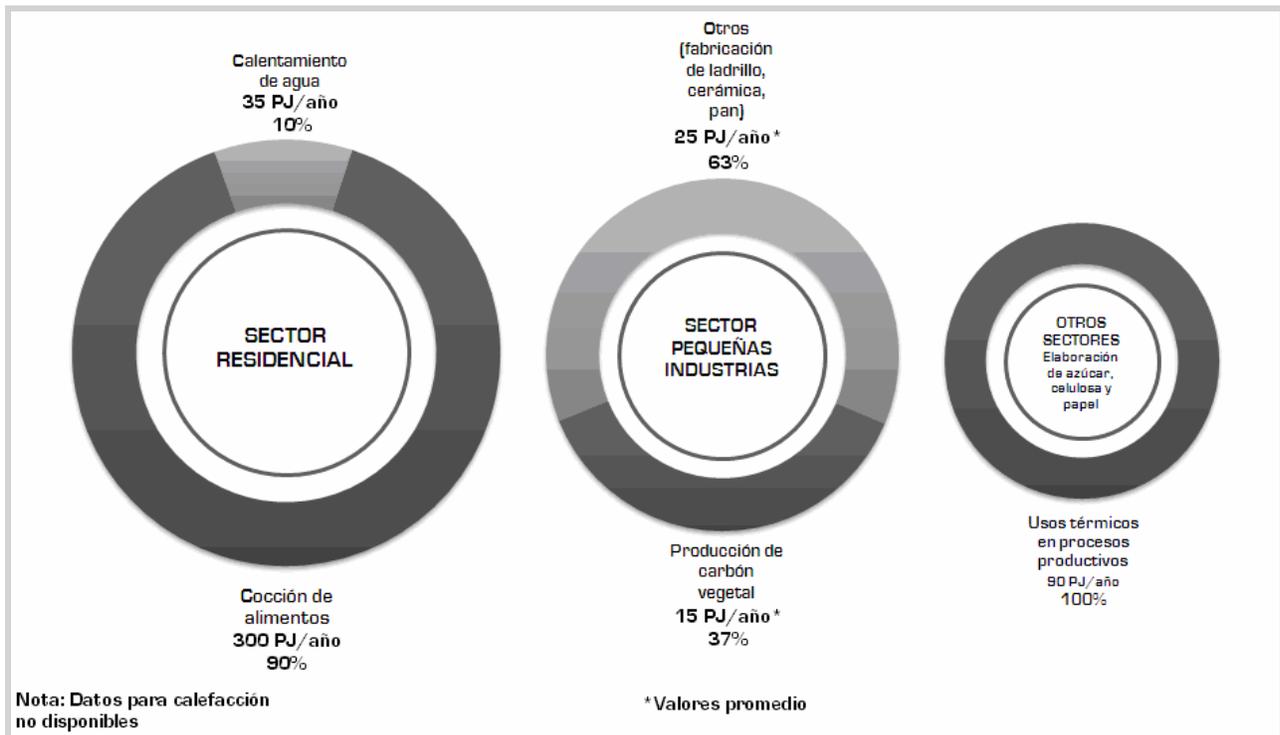


Figura II.7 – Usos finales de la energía obtenida de la biomasa en México
(Elaboración a partir de Masera, 2003)

11.3.2 – Principales alternativas tecnológicas

Los procesos que permiten la conversión de los recursos de la biomasa directamente en energía o en energéticos secundarios, se agrupan en torno de tres categorías principales, a saber: Termoquímica, química y bioquímica (Figura 11.8).⁴⁵ Los combustibles de la madera y otras formas de biomasa sólida son utilizados regularmente en procesos termoquímicos. En tanto, la biomasa húmeda al igual que los productos agrícolas son procesados la mayor parte del tiempo mediante las rutas química o bioquímica. Ello se consigue a menudo con el auxilio de procedimientos mecánicos en las fases iniciales de la transformación (Bauen y col., 2009).

11.3.2.1 – Procesos termoquímicos

Este tipo de métodos involucra reacciones de oxidación o de descomposición térmica de la biomasa por la acción de altas temperaturas. A este grupo pertenecen los siguientes procesos:

a) Combustión – El carbono y el hidrógeno contenidos en la biomasa reaccionan con oxígeno, suministrado en forma pura o mezclado, en cantidades suficientes para formar dióxido de carbono (CO₂) y agua además de liberar energías térmica y luminosa. Este es uno de los métodos mejor comprendidos y más populares en que se aprovecha la biomasa, tanto en la vertiente tradicional como en la moderna. Es, pues, una tecnología madura. La biomasa puede, inclusive, ser incorporada de forma exitosa en centrales térmicas convencionales que operan a base de carbón mineral (IEA, 2003).

b) Gasificación – A través de una oxidación parcial, esto es, una combustión incompleta, a alta temperatura, la biomasa se convierte en una mezcla de gases. Esta mezcla gaseosa es combustible debido a la presencia de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) en porcentajes variables dependiendo de diversos factores. Entre ellos el tipo de biomasa, el comburente usado para la reacción y la configuración del gasificador. El contenido energético de esta mezcla de gases se ubica en torno del 10 al 45% del poder calorífico del gas natural (Chum y col., 2011). Una vez que le son retiradas las impurezas, al gas producido se le denomina gas de síntesis. El gas de síntesis puede ser usado para la generación de electricidad o como sustituto del diésel en motores de combustión interna adaptados para este propósito (Chum y col., 2011). Variantes de la gasificación son implementadas también en ciertas industrias del medio rural en países como China e India (Yokohama y Matsumura, 2008; Mukunda y col., 2010). Si se le compara con la combustión, la gasificación resulta un proceso más eficiente y manipulable, con la posibilidad de obtener combustibles y subproductos químicos de utilidad en ámbitos diversos (Kirkels y Verbong, 2011).

c) Pirólisis – Consiste en la descomposición térmica de la biomasa en una atmósfera carente de oxígeno. De la pirólisis de la biomasa se obtienen subproductos sólidos (coque o *char*), líquidos (aceites de pirólisis también conocidos como bio-aceites) y gaseosos (gas de pirólisis). Las cantidades de los mismos dependen de las condiciones de operación: Presión, temperatura y tiempo de retención. Igualmente influye la composición del material pirolizado. A temperaturas moderadas (450 a 550 °C) alcanzadas de forma abrupta y con tiempos cortos de retención, lo cual se conoce como pirólisis rápida, se obtiene una producción mayor de aceites oxigenados. La carbonización o pirolisis lenta, en cambio, se efectúa con tiempos de retención

⁴⁵ En ocasiones se habla de una cuarta categoría que representa los procesos de tipo mecánico. No obstante, estos procesos, como el astillado, la trituración, la maceración y la compactación, son más bien procesos de acondicionamiento de la biomasa para su posterior conversión energética por medio de alguna de las tres vertientes principales.

prolongados, obteniendo un porcentaje más alto del producto sólido que sirve a su vez como energético secundario. Aunque en apariencia se trata de un proceso complejo, la pirólisis forma parte de las técnicas tradicionales de conversión de la biomasa. Se aplica, con ciertas deficiencias, en la fabricación del carbón vegetal mediante hornos artesanales construidos a base de tierra, adobe o ladrillos (Masera y col., 2006).

11.3.2.2 - Procesos químicos

A través de estos procesos, los componentes de la biomasa son transformados por reacciones químicas inducidas, que ocurren, a diferencia de los métodos termoquímicos, a temperaturas no necesariamente muy elevadas. Los procedimientos más relevantes en este ramo se describen de manera breve a continuación:

a) Transesterificación - Acontece cuando un alcohol, regularmente metanol, reacciona, con ayuda de un catalizador, ácido o base, con los triglicéridos presentes en aceites vegetales y grasas animales, formándose un éster de ácidos grasos además de glicerina como subproducto. Los ésteres así obtenidos es lo que se ha convenido en llamar biodiésel, el cual puede ser mezclado en distintas proporciones con el diésel de origen fósil para hacer funcionar motores de vehículos u otro tipo de máquinas. Cuando se usan semillas oleaginosas como materia prima, es necesario extraer primeramente su aceite, ya sea estrujándolas o por medio de solventes químicos (Chum y col., 2011).

b) Hidrogenación - Se aplica de igual modo a aceites vegetales, grasas animales y aceites reciclados, los cuales son forzados a reaccionar con hidrógeno (H_2) con la asistencia del catalizador apropiado. El resultado es una serie de hidrocarburos que pueden ser fácilmente añadidos, en cualquier porcentaje, al diésel y propano sintetizados del petróleo. Los bicomcombustibles formulados a través de hidrogenación de aceites y grasas de procedencia orgánica se caracterizan, entre otras cosas, por un menor contenido de azufre y una mayor viscosidad (Knothe, 2010). La hidrogenación, no obstante, es un proceso todavía en etapas tempranas de desarrollo e implementación en comparación con la transesterificación.

11.3.2.3 - Procesos bioquímicos

Aquí, se suceden una serie de reacciones químicas resultado de la acción directa de diversas clases de microorganismos bajo condiciones controladas y específicas. A menudo dichas reacciones se vinculan con las propias funciones metabólicas de los organismos, pudiendo también ser manipuladas por procedimientos artificiales. Las opciones más populares de conversión bioquímica de la biomasa en energía se abordan someramente a continuación:

a) Fermentación - Es llevada a cabo por microorganismos, comúnmente levaduras, los cuales metabolizan en un entorno con poco o nulo oxígeno los carbohidratos presentes en la biomasa. El producto es luego destilado para extraer etanol, un alcohol que tiene múltiples usos en la industria, en la preparación de bebidas y como combustible o aditivo en las gasolinas para aplicaciones móviles y estacionarias (Masera y col., 2006). Entre los microorganismos utilizados para llevar a cabo la fermentación, se cuentan a la bacteria *Escherichia coli*, usada en la síntesis industrial de productos bioquímicos, entre ellos el etanol, y la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, muy socorrida en la síntesis de etanol a partir de azúcares. Las materias primas más demandadas hoy día para este proceso son la caña de azúcar, el sorgo dulce, la remolacha azucarera, así como biomasa rica en almidón, por ejemplo maíz y trigo (Chum y col., 2011).

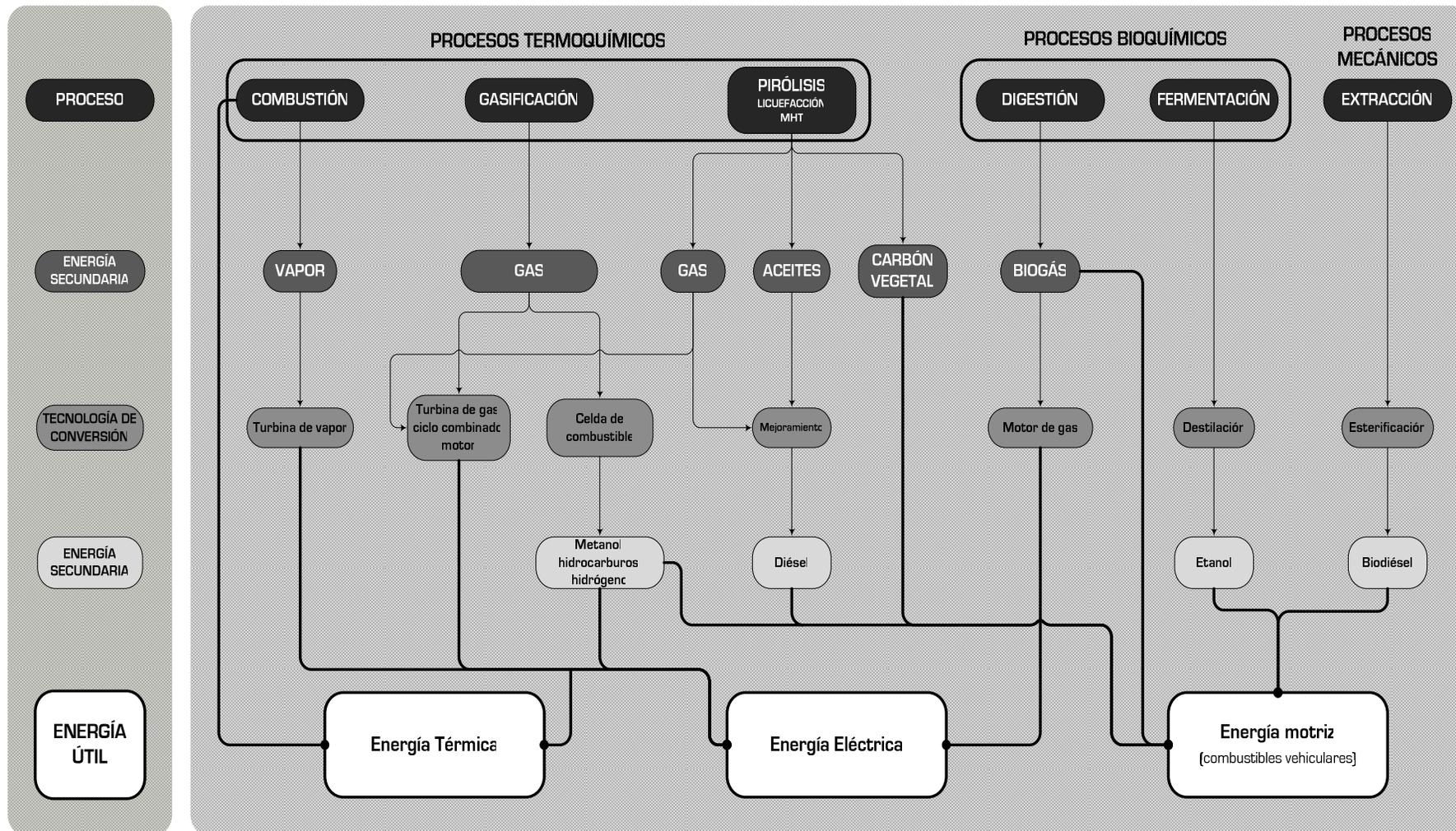


Figura II.8 – Rutas predominantes para la conversión energética de la biomasa
 (Elaboración a partir de Turkenburg, 2000)

b) Degradación anaerobia – Comprende el conjunto de reacciones de descomposición de los compuestos orgánicos presentes en materiales como los subproductos de origen agropecuario, el excremento humano, los desechos urbanos tanto sólidos como líquidos, y los remanentes del procesamiento de alimentos. La descomposición es efectuada en condiciones anaeróbicas propicias para el crecimiento de colonias microorganismos que se encargan de completar diferentes fases del proceso. El producto energético resultante es una mezcla de gases conformada fundamentalmente por metano (CH₄, 50 a 70%) y dióxido de carbono (CO₂). La degradación anaerobia se inicia cuando la materia orgánica seleccionada es depositada en un contenedor cerrado, en espera de que comience su desintegración por efecto de la actividad de las múltiples clases de bacterias anaerobias previamente introducidas en el contenedor. El gas emanado de los procesos de degradación anaerobia, conocido como biogás, puede ser quemado no sólo con fines térmicos, sino también para la generación de energías mecánica y eléctrica. Asimismo, el biogás puede ser sujeto a un proceso de enriquecimiento para remover algunos de sus componentes e incrementar así el porcentaje de CH₄ (85 a 90%) (Bauen y col., 2009; Petersson y Wellinger, 2009). En principio, una vez estabilizado el efluente de la descomposición anaerobia, puede ser aplicado como fertilizante o revitalizador de suelos.

Los procesos de conversión de la biomasa descritos anteriormente son conocidos en mayor o menor medida en todo el mundo. Sin embargo, algunos países comienzan ya a destacar en el empleo de ciertos insumos y tecnologías. En su selección intervienen factores como ubicación geográfica, condiciones climáticas, dotación natural de recursos, capacidad económica, problemáticas sociales, preocupaciones ambientales y planes de desarrollo. En este sentido, la Tabla II.7 reúne información concerniente al estatus de las principales tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa alrededor del orbe, y, con propósitos comparativos, muestra la situación específicamente para el caso de México.

Al examinar la situación actual del aprovechamiento de la biomasa como insumo energético en México, hay por lo menos dos hechos que conviene destacar. El primero, que pese al enorme potencial energético que ostentan las distintas variantes de biomasa en México (Figura II.6), su nivel de explotación actual es reducido. El segundo, que su explotación se hace mayormente a través de modalidades en general ineficientes que están aparejadas con impactos sociales y ambientales adversos que se resienten con particular intensidad en áreas y situaciones específicas (Masera y col., 2006). El débil impulso y escaso desarrollo de la bioenergía en México tienen como consecuencia el privar al país de los múltiples beneficios y oportunidades comporta esta alternativa energética.

II.3.3 - Combustibles derivados de la biomasa

A partir de las distintas variedades de biomasa, y mediante procedimientos mecánicos, térmicos, químicos o biológicos, es posible obtener energéticos secundarios, a menudo englobados bajo término *biocombustibles*. Se trata de combustible en estado sólido, líquido o gaseoso que encuentran usos en multitud de aplicaciones. En este sentido, a continuación se presentan algunas variantes y particularidades de los biocombustibles en función de su estado físico. Enseguida, se muestra la Tabla II.8 la cual recopila información valiosa de un número importante de biocombustibles en sus tres variantes. Se comienza, pues, con la descripción de los tipos de biocombustibles:

a) Biocombustibles sólidos – Abarcan sobre todo la biomasa leñosa procedente en mayor medida de bosques naturales y plantaciones forestales, con una contribución menor de otras coberturas vegetales como selvas, matorrales y flora hidrófila. En el

caso de la biomasa muerta, ésta se recolecta en piezas menudas directamente del suelo y, gracias a su bajo contenido de humedad, arde sin dificultades, razón por la cual se utiliza profusamente como combustible en el ámbito doméstico. Los subproductos de la extracción y transformación de la madera, así como aquella que proviene de variedades o porciones de escaso valor comercial y de ocasionales aclareos de los bosques, también forman parte de los biocombustibles sólidos. Los productos y residuos agrícolas, si bien para ellos existe una mayor competencia de usos, son igualmente ejemplos de este tipo de combustibles. La mayoría de los subproductos agrícolas pueden ser utilizados sin tratamientos previos para obtener energía por medio de su combustión directa. Sin embargo, a través de procedimientos mecánicos, es posible obtener combustibles de mayor densidad energética y mejor desempeño termodinámico.

b) Biocombustibles líquidos – Son considerados energéticos de transición en el marco de la configuración de un nuevo sistema energético desprovisto de los combustibles fósiles. Los biocombustibles líquidos son de características idóneas para ser empleados en el sector transporte. Su utilización ayudaría, en principio, a reducir la dependencia sobre el petróleo, a abatir las emisiones de CO₂ y a valorizar los recursos agrícolas y forestales [Damien, 2010]. Por su estado físico, los biocombustibles líquidos son compatibles con buena parte de la infraestructura existente para los energéticos fósiles convencionales, con los que incluso pueden mezclarse en distintas proporciones, desde 5 hasta 85% en volumen. También es posible utilizarlos en estado puro, siempre y cuando se efectúen las modificaciones necesarias a los motores de los vehículos. El empleo de productos agrícolas comestibles para la producción de biocombustibles es sin duda el aspecto más controvertido de esta vertiente de la bioenergía. Sin embargo, los procesos y las tecnologías recientes permiten la utilización de materias primas que no tienen usos alimentarios y que demandan mínimos cuidados. La visión a futuro plantea la síntesis de biocombustibles valiéndose de bacterias genéticamente modificadas que aprovechen el CO₂ como fuente de carbono para la creación de los productos energéticos [Álvarez, 2009].

c) Biocombustibles gaseosos - Obtenidos a partir de procesos termoquímicos o bioquímicos de transformación de la biomasa. Esta clase de biocombustibles se componen de una mezcla de gases, donde figuran compuestos de valor energético considerable, sobresaliendo el metano, el monóxido de carbono y el hidrógeno. Luego de ser depurados mediante diversas técnicas disponibles, los biocombustibles gaseosos pueden usarse exitosamente en aplicaciones móviles y estacionarias de distinta envergadura y con igual número de fines.

11.3.4 – Implicaciones de la obtención y utilización de la energía de la biomasa

Ciertamente, la bioenergía es un elemento clave en la confección de las estrategias de diversificación de los sistemas energéticos futuros y en la cobertura de una demanda de servicios energéticos en crecimiento, sobre todo en los países en desarrollo. Sin embargo, la utilización a gran escala de la bioenergía tiene implicaciones de carácter social, económico y ambiental tanto positivas como negativas. La magnitud de sus efectos dependerá en mayor medida del cuidado que se tenga al momento de formular los lineamientos y las políticas para que su aprovechamiento se conduzca de manera sustentable [UN-FAO, 2006].

En ese sentido, el caso de los biocombustibles obtenidos a partir de plantaciones sembradas exclusivamente con fines energéticos resulta por demás ilustrativo. Hasta ahora los productos agrícolas más utilizados para la elaboración de biocombustibles incluyen la caña de azúcar, el

maíz, la colza y la soya. La demanda de tierras de cultivo⁴⁶ para su siembra puede conducir al cambio acelerado de uso de suelo, lo cual podría significar prácticas de deforestación masiva. Frente a esta situación, los eventuales beneficios por abatimiento de emisiones de GEI vinculados a la utilización de tales biocombustibles serían cuestionables. Adicionalmente, el consumo de agua para el crecimiento de cultivos energéticos puede reducir las cantidades disponibles para otros fines, incluido el abastecimiento a poblaciones humanas.

Tabla II.7 - Estatus global y local de las principales tecnologías de conversión energética de la biomasa
(Elaboración a partir de Maserá y col., 2006; Chum y col., 2011; REN21, 2011)

Tecnología	Producto energético	Países con niveles sobresalientes de producción	Materias primas predominantes	Situación en México (al año 2006)
Combustión	Energía térmica	EE.UU. - 48 TWh (2010)	Desechos de madera	Se limita al bagazo de caña empleado en ingenios azucareros y en la industria del aserrio
Gasificación	Gas de síntesis	Se calcula un total de 385 gasificadores, la mayoría en países europeos. Cerca de 7 GWt para utilización de biomasa (2004)	Residuos forestales y agrícolas	Se cuenta al menos con un gasificador experimental donde se efectúan pruebas a diversos combustibles posibles, desde leña hasta basura seleccionada
Fermentación	Etanol	EE.UU. - 49,000 ML (2010) Brasil - 28,000 ML (2010)	Maíz Caña de azúcar	45 ML/año producidos en la industria cañera, pero que no tienen uso energético
Transesterificación	Biodiésel	Alemania - 2,900 ML (2010) Brasil - 2,300 ML (2010)	Semillas de colza Aceites vegetales	Existe una planta piloto que lo sintetiza a partir de sebo de res; su producción mensual es de 300 a 500 kL
Descomposición anaerobia	Biogás	Alemania - 13.8 TWh (2010) Reino Unido - 6.8 TWh (2010)	Residuos agrícolas, pecuarios, urbanos e industriales	Digestores de escala reducida en el sector rural. Los más utilizados son los de tipo bolsa horizontal flexible. Además, existe una instalación que aprovecha el biogás de un relleno sanitario ubicado en el estado de Nuevo León. La generación anual es de 52 GWh

A la bioenergía se le concede un significativo potencial de mitigación de GEI, siempre y cuando se establezca una explotación sustentable de la biomasa y la utilización de tecnologías eficientes de conversión (Chum y col., 2011). A este respecto, el empleo a través de medios apropiados de la biomasa residual y desperdicios orgánicos diversos, así como otras modalidades, ofrecen entre 80 y 90% de reducción de emisiones de GEI en comparación con los exhibidos por las tecnologías fósiles convencionales (Chum y col., 2011). En última instancia, el potencial de mitigación de GEI asociado a la producción y empleo de la bioenergía depende, en todo caso, de los alcances del análisis de ciclo de vida con que sea abordado el asunto. En este análisis intervienen decisivamente factores como el uso de suelo, la elección del cultivo, las prácticas agrícolas, la tecnología de conversión y el uso final (UN-FAO, 2006).

Las posibilidades que ofrecen las tecnologías modernas de bioenergía para proveer servicios energéticos en especial a los estratos más pobres de la población mundial, son extraordinarias. No obstante, emergen restricciones en términos de la disponibilidad y

⁴⁶ A este respecto, Delgado (2009) trae a cuenta datos verdaderamente impactantes. A fin de producir suficiente etanol para reemplazar la gasolina que se consume en todo EE.UU. sería necesario que ese país destinara 71% de sus tierras cultivables a la producción de los insumos agrícolas para lograr tal volumen de producción. La Unión Europea, por otra parte, para alcanzar 5.75% de uso de biocombustibles líquidos en el sector transporte, requeriría de alrededor de 17 millones de hectáreas, equivalentes a la quinta parte de la superficie agrícola en esa región.

competencia de usos de la biomasa y de los costos debidos a la adquisición, operación y mantenimiento de las tecnologías. Si bien esos y otros inconvenientes podrían sortearse con la instrumentación de esquemas efectivos y suficientes de financiamiento, tanto de parte del sector público como del privado en los ámbitos local e internacional (UN-FAO, 2006).

Tabla II.8 – Variantes de los combustibles derivados de la biomasa

(Elaboración a partir de Maserá y col., 2006; Álvarez, 2009; Damien, 2010)

Biocombustible	Descripción	Particularidades	Poder calorífico inferior medio
Biocombustibles Sólidos			
Leña	Biomasa forestal muerta en forma de ramas y pequeños troncos	Humedad del 15-40%	5.04 - 7.56 GJ/t
Cortezas de árbol	A menudo contiene sustancia tóxicas que dificultan su utilización	Humedad del 40-60%	5.86 - 10.05 GJ/t
Virutas y aserrín	Subproductos de la transformación de la madera	Humedad <20%	15.84 GJ/t @ 10-15% humedad
Astillas forestales	Piezas de tamaño reducido provenientes de la trituración de la madera	Humedad del 20-30%	7.92 - 12.24 GJ/t @ 30-50% humedad
Pellets	Pequeños cilindros elaborados de biomasa comprimida	Humedad del 7-12%	16.92 - 18.00 GJ/t
Briquetas	Cilindros de tamaño medio elaborados de una mezcla de virutas y aserrín comprimido	Humedad del 8-10%	16.56 GJ/t
Carbón vegetal	Se consigue mediante la pirólisis de la madera	Humedad del 5-10%	30.00 GJ/t
Pajas y otros subproductos agrícolas	Derivados de varios cultivos, como trigo, colza, girasol y remolacha azucarera	Humedad del 20-30%	En función de la especie vegetal. Se encuentra en el rango de 14.60 a 17.40 GJ/t
Biocombustibles líquidos			
Etanol	Proviene de la fermentación de biomasa con alto contenido de azúcares, almidón o celulosa. Se prevé la utilización masiva de biomasa lignocelulósica	Mezclas de 5 a 85% con gasolina convencional	26.8 MJ/kg [21.3 MJ/L]
Biodiésel	Se sintetiza principalmente por la vía de la transesterificación de aceite vegetal o grasa animal	Se registra una disminución en la potencia del motor	44.4 MJ/L
Aceite vegetal	Se extraen, por medios mecánicos o químicos, de semillas oleaginosas. Es posible utilizarlos en motores de encendido por compresión	Contienen ínfimas cantidades de azufre y no suponen riesgos de contaminación por derrames	En promedio 37.3 MJ/kg [34.35 MJ/L]
Dimetil-éter DME	Para su elaboración se ha sugerido la utilización del gas de síntesis, promoviendo una reacción entre H ₂ y CO, obtenido a partir de biomasa	Su combustión no produce hollín	28.6 MJ/kg [18.9 MJ/L]
Licor negro	Subproductos derivados de la fabricación de pasta de papel; predomina en ellos la lignina procedente de la separación de la celulosa de la madera	Es consumido por instalaciones papeleras para la provisión parcial de calor de proceso	10.8 - 14.76 GJ/t
Butanol	Obtenido de una fermentación específica de materias primas destinadas a la producción de etanol	Se ha ensayado con mezclas de hasta 10% con gasolina convencional	Es cercano a 33.0 MJ/kg
Biocombustibles gaseosos			
Biogás	Generado mediante la descomposición anaerobia de la materia orgánica fermentable	55 - 65% de metano	20 - 23 MJ/m ³ Densidad con respecto al aire es de 0.55
Biohidrógeno	Puede extraerse del gas de síntesis obtenido de la gasificación de la biomasa, de la reformación del metano de la degradación anaerobia o por procesos bioquímicos	La concentración de H ₂ varía según el método de síntesis	120 MJ/kg @ 0.08357 kg/m ³
Gas de síntesis	Caudal de gases, algunos de ellos combustibles, producto de la gasificación o pirólisis de la biomasa	Composición típica: 20% CO y 17% H ₂	4.5 - 13.0 MJ/Nm ³ *

*Nota: Nm³; metro cúbico a condiciones normales, esto es, 0 °C de temperatura y 1 atm de presión.

Una estrategia acertada de expansión de la bioenergía indudablemente contribuiría en mucho a revitalizar el desarrollo del sector agroindustrial y colaborar en la generación de empleos, en especial en las comunidades rurales. La productividad y competitividad agrícola pueden mejorar a través del impulso a la manufactura de biocombustibles líquidos, etanol y biodiésel, creando oportunidades para pequeñas, medianas y grandes empresas en los distintos segmentos de la cadena productiva, con un incremento en el número de plazas de trabajo. Sin embargo, al mismo tiempo se vislumbran problemáticas vinculadas al uso y propiedad de las tierras de cultivo. Ante la influencia y el poder económico de los grandes consorcios transnacionales agroindustriales, nada evitaría que intentaran hacerse del control del mayor número posible de parcelas. Pero además, existe el riesgo de que extiendan su dominio a toda la cadena de valor de la bioenergía dentro de un escenario de producción de biocombustibles a gran escala. Cabe apuntar, sin embargo, que situaciones como esa pueden prevenirse. Una manera de lograrlo es mediante la conformación de cooperativas por parte de los pequeños y medianos productores agrícolas. Aunque para ello resulta imprescindible contar con una legislación que vele por una distribución más justa de los dividendos entre todos los involucrados en la producción de los biocombustibles (UN-FAO, 2006).

Un elemento que distingue en particular a los biocombustibles líquidos, es la existencia de una gran variedad de productos agrícolas para su elaboración, cada uno con requerimientos especiales de suelo, agua, nutrientes y condiciones climáticas. La controversia, no obstante, emana en razón de que muchos de estos productos son alimentos básicos y de larga tradición, casos específicos del maíz y la caña de azúcar. De manera que su utilización masiva para fines energéticos podría tener hondas repercusiones en la seguridad alimentaria de los países productores y consumidores de estos productos agrícolas. Este temor se finca, entre otras cosas, en la inevitable competencia por el agua y los suelos más fértiles. Cabría esperar entonces una disminución en la oferta de alimentos y, por ende, un aumento continuado de sus precios, a lo que se sumarían otras apremiantes problemáticas como la hambruna, el crecimiento demográfico y el cambio climático (UN-FAO, 2006). De igual modo, se advierte que el uso intensivo de combustibles y químicos derivados del petróleo en la agricultura industrializada, puede hacer que la volatilidad propia de las cotizaciones del crudo, se traslade a los precios de las materias primas para la elaboración de los biocombustibles.

La biomasa residual, en especial la generada en los asentamientos urbanos en razón de sus diferentes actividades, es una alternativa que evade muchos de los inconvenientes ligados a la producción y utilización de productos agrícolas comestibles y de otro tipo de plantaciones para propósitos energéticos. La biomasa residual con frecuencia implica bajos o, mejor aún, nulos costos de adquisición y resuelve de manera simultánea problemáticas padecidas en distintas áreas a causa de su producción y acumulación no controladas. Reduce, por ejemplo, los daños ambientales asociados a la inadecuada disposición de desechos urbanos, que se manifiestan como contaminación del aire y el agua, proliferación de plagas y diseminación de enfermedades, destrucción del paisaje y afectaciones en la calidad de vida de las personas (Masera y col., 2006). Adicionalmente, de no ser tratados o aprovechados de manera oportuna, la permanencia en el ambiente de estos materiales acarrearía un impacto ambiental severo. Dicho impacto comprende, entre otras cuestiones no menos importantes, la emisión de metano producto de la descomposición de la biomasa, sin olvidar que el metano es un GEI con un potencial de calentamiento 21 veces superior al del CO₂ (Chum y col., 2011). En síntesis, la biomasa es un recurso energético cuyo consumo se centra actualmente en la satisfacción de necesidades básicas de comunidades de países en desarrollo. La diversidad de opciones que ofrecen las tecnologías modernas para el aprovechamiento de la bioenergía representa una oportunidad para satisfacer de mejor manera esas y otras necesidades. Sin embargo, su utilización tiene implicaciones de carácter social y ambiental, cuyos impactos dependerán de las condiciones locales y de la naturaleza misma de los proyectos.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS II: BIOMASA RESIDUAL PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y DEGRADACIÓN ANAEROBIA. TECNOLOGÍAS

Es un hecho que existen numerosas maneras de clasificar a la biomasa para aplicaciones energéticas atendiendo a criterios igualmente diversos, como en base a sus propiedades, composición, posibles usos finales o procedencia. En relación a la procedencia de la biomasa suele distinguirse entre biomasa primaria y biomasa secundaria (García y Rezeau, 2010). La biomasa primaria, de manera análoga al concepto de energía primaria, alude a aquella que se extrae directamente de la naturaleza. Este es el caso, por ejemplo, de la biomasa forestal y de la obtenida de otras coberturas vegetales con la finalidad de servir de insumo para la generación de energía. En cambio, la biomasa secundaria, también denominada residual, abarca los subproductos o remanentes de las transformaciones fisicoquímicas de la biomasa dentro de diversas actividades humanas. Así, la biomasa secundaria se compone de los residuos de labores silvícolas, agrícolas, pecuarias, de las industrias maderera, agroalimentaria, papelera, y otros desechos como la componente orgánica de los residuos urbanos. La biomasa residual puede hallarse en forma sólida, semisólida o líquida, lo cual, junto con su composición, determina el tipo de proceso y tecnología idóneos para su eventual aprovechamiento energético.

Algunos autores proponen clasificar como biomasa terciaria a la resultante del procesamiento de biomasa primaria o secundaria al punto de obtener productos energéticos finales como el etanol, biodiésel, pellets, briquetas o biogás. Sin embargo, parece más atinado referirse a estos productos propiamente como combustibles, toda vez que éstos están en condiciones ya de ser empleados de manera directa en artefactos para producir energía, siendo esta la acepción primera del término combustible.

III.1 - Biomasa residual

La biomasa residual proviene fundamentalmente de actividades de extracción, procesamiento, transformación y consumo realizadas en los sectores forestal, agropecuario, industrial y residencial. Se presenta en múltiples formas y con distintas propiedades, lo que en cierto

modo condiciona la elección del método y tecnología para su conversión energética. Así, por ejemplo, la biomasa residual seca de tipo sólido, que se genera en cantidades importantes en los ámbitos forestal, agrícola, maderero y agroindustrial, es en principio ideal para los procesos termoquímicos en virtud de su reducida humedad. La biomasa residual húmeda, emanada de actividades industriales, complejos pecuarios y asentamientos humanos, razón por el cual es mayoritariamente de carácter secundario⁴⁷, es en alto grado compatible con los procedimientos de conversión bioquímica.

Para abundar un poco en relación a las distintas clases de biomasa y sus procesos de conversión energética, se presenta la Tabla III.1. Ahí, se encuentra información referente a las alternativas tecnológicas, presentes y futuras, para la utilización energética de los tipos más populares de biomasa residual. La tonalidad del fondo de cada celda de la Tabla III.1 tiene la intención de aludir al grado de maduración de la tecnología en cuestión. La tonalidad más oscura corresponde a las tecnologías plenamente comercializada. Aquellas que se encuentran en fase de investigación y desarrollo se distinguen con un fondo blanco. La idoneidad de los procesos para cada fuente de biomasa residual podrá comprenderse mejor luego de revisar la información básica que sobre éstas se presenta a continuación.

III.1.1 - Biomasa residual forestal

Abarca todos los restos de árboles generados luego de efectuada una intervención ya sea con propósitos mercantiles, o como parte de las medidas de mantenimiento de los ecosistemas forestales guiadas por parámetros tales como edad de las especies, tamaño y densidad de población. Una práctica benéfica para los bosques consiste en el retiro oportuno, pero no excesivo, de los residuos forestales que de otro modo se convertirían en medios potenciales de propagación de plagas e incendios. La biomasa residual forestal incluye, pues, tanto hojas como ramas, recortes y pequeños troncos, y las especies de árboles y arbustos, en porciones o de manera íntegra, que carecen de valor comercial y que por tanto pueden también ser aprovechadas con fines energéticos, en tanto su preservación no se juzgue conveniente.

Es importante aclarar que la sustracción de los residuos forestales no debe ser total. Es preciso dejar al menos un mínimo, en particular de hojas y ramas pequeñas, a fin de no afectar la biodiversidad local, representada esencialmente por hongos e insectos, y el inventario y disponibilidad de nutrientes esenciales para la renovación de la biomasa. Del mismo modo, se recomienda dejar las raíces de los árboles, como medida para impedir la erosión acelerada del suelo [Damien, 2010].

III.1.2 - Biomasa residual agrícola

Engloba todas aquellas porciones de los productos agrícolas que no son comestibles y que, por ende, generalmente carecen de valor comercial. Se trata, entonces, de hojas, puntas, tallos, rastrojos, paja, restos de poda de árboles frutales y demás biomasa que se genera en el terreno de siembra y no se considera parte de la producción [Mäser y col., 2006]. Al ser partes del mismo organismo vegetal, estos subproductos se desarrollan de manera simultánea con el grano o fruto de interés, de modo que se benefician también de los cuidados y atenciones que se le prestan a los cultivos de manera habitual. Si se toma en cuenta que las porciones comestibles representan un porcentaje reducido de muchas de las plantas cultivadas, es posible ponderar el potencial de los subproductos agrícolas que en su mayoría

⁴⁷ Como apunta García (2010), es posible encontrar fuentes primarias de biomasa húmeda, como por ejemplo la materia orgánica semidescompuesta de los pantanos o acumulaciones focalizadas de excrementos; sin embargo, estas fuentes de biomasa no suelen explotarse como materia prima para procesos energéticos.

no poseen valor como alimento o forraje, ni como materia prima para la elaboración de otros productos de interés.

Tabla III.1 – Variantes y tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa residual

(Elaboración a partir de Damien, 2010; Chum y col., 2011)

Proceso/Tipo de biomasa	Termoquímicos/ producto energético		Químicos/ producto energético		Bioquímicos/ producto energético	
Residuos forestales y de la industria maderera	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	Procesos pendientes de verificación	Dimetil-éter, hidrógeno	Fermentación	Alcoholes [etanol y butanol]
	Densificación	Pellets y briquetas				
	Pirólisis	Carbón vegetal				
	Gasificación	Gas de síntesis y derivados			Procesos pendientes de verificación	Hidrógeno
	Pirólisis	Aceite de pirólisis				
Residuos agrícolas	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	Procesos pendientes de verificación	Dimetil-éter, hidrógeno	Fermentación	Alcoholes [etanol, butanol]
	Gasificación	Gas de síntesis y derivados				
	Pirólisis	Aceite de pirólisis			Degradación anaerobia	Biogás
Residuos agroindustriales	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	Transesterificación e hidrogenación	Biodiésel	Degradación anaerobia	Biogás
	Gasificación	Gas de síntesis y derivados			Fermentación	Alcoholes [etanol, butanol]
Residuos industriales	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	Procesos pendientes de verificación	Dimetil-éter	Fermentación	Alcoholes [etanol, butanol]
Residuos pecuarios	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	Procesos pendientes de verificación	Dimetil-éter	Degradación anaerobia	Biogás
	Gasificación	Gas de síntesis y derivados			Procesos pendientes de verificación	Hidrógeno
Lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	No reportado		Degradación anaerobia	Biogás
					Procesos pendientes de verificación	Hidrógeno
Fracción biodegradable de los residuos urbanos	Combustión	Aporte térmico/eléctrico	Transesterificación e hidrogenación	Biodiésel	Degradación anaerobia	Biogás
	Gasificación	Gas de síntesis	Procesos pendientes de verificación	Dimetil-éter	Procesos pendientes de verificación	Hidrógeno
	Pirólisis	Coque				

Simbología: ■ Comercial ■ Comercialización incipiente ■ Demostración □ En desarrollo

Los subproductos de los cultivos energéticos también constituyen una fuente de biomasa secundaria. Puesto que en estas plantaciones la atención se centra en la obtención de semillas, frutos o raíces con base en ciertas especificaciones, el resto de la planta queda libre para otros fines, entre ellos por supuesto el energético. Sin embargo, la baja densidad energética de esta clase de biomasa, que incide en los costos de transporte y almacenamiento, así como las dificultades que supone su recolección, son algunos de los inconvenientes asociados al empleo como insumo energético de los residuos agrícolas (Damien, 2010). Adicionalmente, no se debe pasar por alto la contribución que hacen estos residuos al mantenimiento de los niveles de materia orgánica y minerales en las superficies de cultivo. De ahí que el retiro de estos materiales para ser usados con fines energéticos, impediría que desempeñasen esta valiosa función. Por ello debe ponderarse con sumo cuidado la pertinencia y viabilidad de utilizar esta biomasa como recurso energético.

III.1.3 - Biomasa residual industrial

Esta materia orgánica proviene principalmente de las industrias agroalimentaria y de transformación de la madera. Una de las ventajas de la biomasa residual industrial es que no se genera de manera dispersa. Asimismo, este tipo de biomasa es generalmente de bajo o nulo costo de adquisición y se encuentra disponible en cantidad y composición prácticamente constantes (García y Rezeau, 2010). Es muy común que esta biomasa residual sea aprovechada por las mismas industrias que la generan. En este sentido, tratándose de consorcios de gran envergadura, la inversión que se requiere para la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de conversión no constituye un impedimento. Por el contrario, resulta en especial atractiva, sobre todo para aquellas empresas cuya factura por consumo de energía es elevada y que es susceptible de reducirse a través de la implementación de tecnologías de bioenergía. De esta manera, las industrias sacan enorme provecho de su caudal de biomasa residual.

A esta categoría de biomasa pertenecen los subproductos que resultan de las actividades industriales de acondicionamiento, extracción o transformación de insumos agrícolas para la obtención de productos que demanda el mercado. El bagazo de la caña de azúcar, las cáscaras de distintos cereales, los olotes del maíz y las pastas remanentes de la extracción de los aceites de las semillas oleaginosas son parte del repertorio de la biomasa residual industrial. La biomasa de este tipo tiene ventajas en términos de recolección y procesamiento. De ahí que su utilización se convierta en una práctica mucho más sencilla en comparación con otras fuentes de biomasa. Ejemplos adicionales de esta clase de biomasa residual son los desechos provenientes de las industrias cervecera, harinera, lechera, cárnica, de frutas y legumbres, y otras tantas (Damien, 2010). En algunos casos se trata de desechos acuosos con alto contenido de materia orgánica biodegradable; no obstante, si la presencia de compuestos químicos inorgánicos es abundante, los efluentes industriales pueden convertirse en caudales tóxicos no aptos para los procesos bioquímicos de obtención de energía.

Una de las formas en que se pueden eliminar los residuos industriales es mediante su adecuación como alimento para ganado o aplicándolos sobre suelos agrícolas proveyéndolos de nutrientes esenciales para los cultivos. Con fines energéticos, la biomasa residual industrial puede ser aprovechada mediante procesos termoquímicos, para aquellas variedades de baja humedad, y bioquímicos, para efluentes y desechos semisólidos.

Como ya se dijo, además de las industrias agroindustrias, existen otras ramas del sector industrial que producen residuos con un alto contenido de materia orgánica. Los licores negros generados por la industria papelera son una forma de biomasa residual actualmente en uso (Figura II.6). Con un contenido sustantivo de celulosa, hemicelulosa y lignina, los licores

negros, luego de ser concentrados, son quemados para producir vapor que se consume durante la producción de la pulpa utilizada para la elaboración de papel. La industria de la transformación de la madera, por su parte, también aporta biomasa residual aprovechable para cuestiones energéticas. Durante la extracción y transformación de la madera comercial, se genera una cantidad importante de subproductos como cortezas, trozos de madera, aserrín y virutas. Los volúmenes de generación de toda esta diversidad de residuos de la madera llegan a ser bastante considerables, baste tomar en cuenta el hecho de que tan sólo alrededor del 40% del volumen total de un árbol es realmente utilizado en esa industria (Damien, 2010).

III.1.4 - Biomasa residual pecuaria

Caen dentro de esta categoría las deyecciones líquidas, excrementos, piel, pelos y el agua empleada para el aseo de las granjas donde se crían con propósitos diversos clases de ganado como son porcinos, bovinos, caprinos, ovinos, equinos, aves y otros animales propios de la ganadería estabulada. Cuando el excremento de estos animales se mezcla con la paja de sus encamados, se forma el estiércol. Éste, una vez estabilizado, puede ser esparcido sobre campos de cultivo para restituirle nutrientes indispensables. Sin embargo, la marcada preferencia por los fertilizantes sintéticos comerciales, deriva en la acumulación de cantidades crecientes de excremento, que con bastante frecuencia son vertidas sin un tratamiento previo en sitios no autorizados.

Los residuos ganaderos son aptos para fermentar con rapidez a causa de su elevado contenido de humedad. Esta es la razón por la cual se destinan preferentemente a los procesos bioquímicos, en particular a la degradación anaerobia. Al emplearlos como materia prima para la degradación anaerobia se evita la necesidad de un secado para reducir su contenido de agua (Damien, 2010). No obstante, si el estiércol se somete a un proceso de secado por cualquier vía, puede ser usado directamente como combustible sólido en una reacción de combustión, tal como ocurre hoy día en varias comunidades al interior de los países en desarrollo. Esta alternativa podría resultar conveniente a la luz de que la ingesta de medicamentos o productos análogos por parte del ganado, origina que en sus excreciones a menudo se detectan sustancias que en un momento dado pueden interferir con los procesos normales de tratamiento y estabilización por vía bioquímica.

III.1.5 - Aguas residuales urbanas

Estos efluentes provienen de los sectores residencial, comercial y, en ocasiones, también del industrial. Las aguas residuales urbanas ingresan regularmente a instalaciones donde se les aplican distintas técnicas de tratamiento al término de las cuales se obtiene una masa o lodo que posee una elevada concentración de materia orgánica. Las características de estos lodos varían en función del tipo de proceso de tratamiento. En este sentido son determinantes tanto el volumen como la composición del influente, y los requerimientos exigidos para los efluentes de las plantas de tratamiento. De cualquier forma, los lodos contienen la materia orgánica inicialmente presente en las aguas. Por la procedencia misma de estas aguas, es muy común que la biomasa que conforma los lodos contenga algún tipo de sustancia contaminante arrojada de sitios como talleres, industrias, comercios o viviendas (García, 2010).

Los lodos de las aguas residuales urbanas se suelen aplicar directamente en fase líquida sobre campos agrícolas, con la idea de aportarle nutrientes para elevar así su fertilidad. No obstante, está constituye una práctica muy controvertida (García, 2010). En cuanto a su aprovechamiento energético, los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden ser canalizados, luego de una etapa de secado, a procesos termoquímicos.

Alternativamente, pueden ser utilizados también a través de procesos bioquímicos, en particular la degradación anaerobia para la síntesis de biogás combustible.

III.1.6 – Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Está constituida por los materiales fermentables o biodegradables del caudal total de residuos sólidos generados en domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios (véase Capítulo I). Su empleo está condicionado, por tanto, a la separación de esos componentes biodegradables del resto de los residuos. Su alto contenido de humedad, del 60 al 90%, es la razón de que sean catalogados como biomasa residual húmeda, aún cuando generalmente se presente en estado sólido o semisólido. Evidentemente existen otros materiales donde están presentes sustancias orgánicas, pero el hecho de que estén acompañadas de ingredientes no naturales agregados en algún momento de su fabricación, no permite que sean considerados formalmente como biomasa biodegradable.

La biomasa presente en los desechos sólidos urbanos puede adquirir valor en términos energéticos por medio de procesos termoquímicos, como la combustión, y bioquímicos, en particular a través de la degradación anaerobia. Al someter a los residuos sólidos urbanos a la degradación anaerobia se asegura la conversión energética de su fracción biodegradable. Esto es debido a que los microorganismos encargados de la descomposición sólo actúan sobre ese tipo de materia. En cambio, en procesos como la combustión se oxida (quema) toda forma de materia orgánica, incluida la de origen fósil. La materia orgánica de procedencia fósil es de carácter no renovable, de modo que su quema tiene implicaciones ambientales.

A manera de resumen, la Tabla III.2 presenta las fuentes de donde emanan las distintas clases de biomasa residual, tanto seca como húmeda, las variantes de biomasa más representativas e información adicional respecto de su producción, manejo y destino regular. Ahora bien, en razón del objetivo central que persigue el presente trabajo, se tratarán algunos aspectos de interés en torno de las principales variedades de biomasa residual húmeda. Para luego abordar con cierta profundidad lo relativo a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).

III.2 – Biomasa residual húmeda

la biomasa residual húmeda es un subproducto de actividades humanas en diversas áreas y se distingue, lógicamente, por su elevado contenido de agua. Esta condición le confiere una pronta biodegradabilidad que puede ser capitalizada mediante procesos bioquímicos, en específico la degradación anaerobia de la cual se obtiene una mezcla de gases denominada biogás con multitud de aplicaciones energéticas. La rápida biodegradabilidad de la biomasa húmeda, la convierte, por otro lado, en un potencial foco de contaminación que amenaza la salud humana, los cuerpos de agua, suelos, atmósfera y el ecosistema en su conjunto, de ahí que su vertido no regulado debe ser impedido (García, 2010). De las formas de biomasa presentadas con anterioridad, la biomasa residual húmeda engloba a los efluentes de industrias agroalimentarias, residuos pecuarios, aguas residuales urbanas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

Con objeto de divisar el camino más adecuado para la gestión y tratamiento de la biomasa residual húmeda, es imprescindible contar con elementos básicos que permitan caracterizarla. En este sentido, en la caracterización de la biomasa residual húmeda se pone particular atención a los parámetros o indicadores que permiten conocer, directa o indirectamente, la cantidad de materia orgánica que está presente en su composición. Con

dicha información, es posible estimar su potencial en términos energéticos, así como develar la opción tecnológica más apropiada para hacerlo efectivo. Entonces, los principales parámetros que registran el contenido de materia orgánica en la biomasa residual húmeda se listan a continuación [García, 2010]:

a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO, mgO_2/l) – Se define como la cantidad de oxígeno disuelto que requieren los microorganismos presentes en un medio acuoso para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en una masa de agua. Conociendo la DBO es posible determinar la cantidad de materia orgánica para ser degradada por los microorganismos aerobios.

b) Demanda química de oxígeno (DQO, mgO_2/l) – Da cuenta de la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de toda la materia oxidable, tanto orgánica como inorgánica, por esa razón la DQO es mayor que la DBO.

c) Biodegradabilidad del flujo – Se obtiene del cociente entre la DBO_5 y la DQO; si el resultado está por debajo de 0.2, el fluido se considera como no biodegradable.⁴⁸

d) Grado de humedad y contenido de sólidos (%) - La humedad se refiere a la cantidad de agua contenida en la masa total de un cuerpo. La humedad puede alojarse en la superficie exterior o estar impregnada en el interior del material. Si se requiere un porcentaje bajo de humedad en la biomasa, ya sea para disminuir los costos de transporte, facilitar la molienda o aumentar la energía potencialmente aprovechable, se puede recurrir a un proceso de secado. El contenido de sólidos es la contraparte de la humedad, y se obtiene de restar al 100% el porcentaje de humedad. En el caso de la biomasa residual húmeda, la proporción de humedad suele situarse entorno del 70%.

Composición elemental y relación C/N – La composición elemental se refiere a la identificación y cuantificación de las distintas sustancias de la biomasa en estudio. Por otro lado, la relación carbono-nitrógeno [C/N] es una medida de las proporciones y balance existentes entre dichos elementos. En cuanto a los procesos bioquímicos, el desempeño óptimo de los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica se ve favorecido con una C/N dentro del rango de 25 a 30.

La Tabla III.3 reúne una serie de valores o intervalos de los indicadores previamente descritos como herramientas para caracterizar a la biomasa residual húmeda. Los indicadores son útiles para indicar la concentración y biodegradabilidad de la materia orgánica presente en las diversas formas de biomasa residual húmeda. Algunos de ellos aparecen más vinculados a la biomasa residual diluida, ya sea en razón de su naturaleza o método de obtención. Esto sucede por ejemplo con la DBO y la DQO, muy socorridas en el ámbito de las aguas residuales. Aunque otros indicadores son igualmente apropiados para describir a la biomasa residual diluida, semisólida o sólida.

En la Tabla III.3 se presentan los rangos usuales en que se ubican algunos parámetros fisicoquímicos tratándose de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU). Se observa, por ejemplo, que la FORSU llega a tener un porcentaje de humedad inferior al correspondiente a otras opciones de biomasa residual húmeda. De ahí que la FORSU se presenta habitualmente en condiciones tales que simplifican en alguna medida su manejo y transporte. El contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable de la FORSU, medida

⁴⁸ La DBO₅ se refiere a la demanda bioquímica de oxígeno medida hasta el quinto día de la prueba. Se considera una medida representativa toda vez que en ese periodo se consume 60–70% del oxígeno requerido para la oxidación de toda la materia orgánica biodegradable de la muestra. La DBO total del flujo (DBO_T) precisa como mínimo 20 días de ensayo [García, 2010].

como materia orgánica o materia volátil, es bastante considerable, por encima de otros residuos de tipo urbano e industrial. Su relación C/N no es particularmente alta si se toma en cuenta el valor ideal que demandan los tratamientos de corte bioquímico. Este es uno de los motivos por los cuales con frecuencia la FORSU se procesa de manera conjunta con algún otro tipo de biomasa que compense tales deficiencias.

Tabla III.2 - Resumen de fuentes principales de biomasa residual
(Elaboración a partir de Masera y col., 2006; García, 2010; Esteban, 2010; García y Rezeau, 2010)

Tipo	Subtipo	Actividades en donde se origina	Ejemplos	Comentarios
Biomasa residual seca	Residuos forestales	Podas, aclareos, limpieza, apertura de caminos, cortes de regeneración	Piezas sin valor comercial, ramas de poda, copas	<i>Su utilización se ve obstaculizada por dificultades de acceso, localización, derechos de propiedad, información insuficiente.</i>
	Agrícolas	Cultivo de distintas especies, podas	Paja, rastrojo, hojas, ramas	<i>Su producción es estacional, por lo que se precisa de un almacenamiento temporal. Su acopio puede complicarse en ciertas circunstancias. Para algunos subproductos existe competencia por otros usos. Precios altos de parte de los agricultores.</i>
	Industria agro-alimentaria	Industrias extractiva y preparadora	Cascarillas, huesos, cortezas, bagazo, pastas sobrantes de la extracción de aceites	<i>Su generación es menos dispersa en comparación con otras fuentes de biomasa residual. Suele utilizarse con fines energéticos en el mismo sitio en que es generada, con la intención de reducir la factura energética.</i>
	Industria maderera	Transformaciones de la madera	Corteza, aserrín, virutas, polvo de lijado, recortes, papel	<i>Al producirse de manera focalizada, se facilita enormemente su aprovechamiento. Es también usada por las mismas industrias que la generan principalmente por medio de procesos termoquímicos.</i>
Biomasa residual húmeda	Industria agro-alimentaria y papelera	Procesamientos diversos de la materia prima orgánica para la elaboración de productos	Efluentes con alta carga orgánica	<i>Al igual que ocurre con otras formas de biomasa residual de tipo industrial, estos efluentes suelen ser utilizados con distintos propósitos en las instalaciones donde son generados. Son tratados con ayuda de procesos bioquímicos para estabilizarlos y, en el caso de la degradación anaerobia, permitir la obtención de un producto energético.</i>
	Residuos pecuarios	Cría de distintas especies de animales en condiciones de cautiverio	Deyecciones líquidas, excremento, pelos y piel mezclados con agua	<i>Se pueden aplicar directamente sobre campos con objeto de mejorar sus condiciones o beneficiar a los cultivos en crecimiento. Su aprovechamiento debe darse en zonas cercanas al punto de generación con objetivo de reducir los traslados, que en el caso de la biomasa húmeda son particularmente onerosos. Su acumulación al aire libre constituye un foco de contaminación.</i>
	Aguas residuales urbanas	Emanadas de los sectores residencial, comercial e industrial	Fangos o lodos que concentran la materia orgánica removida	<i>Generalmente son tratadas para su depuración. La concentración de materia orgánica tiende a ser baja, razón por la cual de manera excepcional se aplican directamente sobre campos y tierras de cultivo.</i>
	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Generados en mayor medida en el ámbito residencial, aunque también contribuyen otros sectores como el comercial	Materiales fermentables o biodegradables presentes en los residuos sólidos urbanos	<i>La mayor dificultad para su aprovechamiento reside en su segregación del resto de los residuos. Su composición se caracteriza por ser sumamente variable, no sólo por cuestiones estacionales, sino también por hábitos de consumo, contexto económico-social, entre otros factores.</i>

Es importante aclarar que los valores reportados en la Tabla III.3 tienen una función únicamente informativa. No se trata de ningún modo de cifras absolutas, toda vez que las circunstancias en medio de las cuales se genera la biomasa son sumamente variables.

Tabla III.3 – Características relevantes de algunas clases de biomasa residual húmeda

[Adaptado de García, 2010]

Biomasa residual	Sólidos %	DBO ₅ gO ₂ /L	DQO gO ₂ /L	Materia orgánica* %	Relación C/N	Nitrógeno* %	Otros componentes a destacar
Licor negro	10-20	50-80	100-500	30 - 40	50-200	0.05-0.1	<i>Celulosa y ligninas en alta cantidad. Lenta biodegradabilidad, se requiere apoyos enzimáticos o térmicos</i>
Estiércol porcino	15-25	30-45	100-150	70 - 80	15-25	2-3	<i>Trazas de metales procedentes de los alimentos. Restos de antibióticos y otros compuestos farmacéuticos. Presencia importante de amoníaco (NH₃).</i>
Excretas porcinas diluidas	Menos de 15	10-30	10-100	60 - 85	6-12	3-6	
Excretas vacunas	10-15	10-20	10-100	50 - 80	9-11	3-4	
Estiércol vacuno	20-30	30-50	150-250	60 - 80	10-18	1.5-3	
Aguas residuales urbanas	Menos de 0.1	0.1-0.35	0.2-1	50 - 60	3-5	4-6	<i>Disolventes, jabones, metales pesados.</i>
Lodos de PTAR	15-30	-	100-150	50 - 80	8-16	3-6	<i>Metales pesados en cantidades significativas.</i>
FORSU	10-40	-	100-300	70	14-16	1.5-4	<i>Inertes sólidos y otros objetos.</i>

.Notas: PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales. *Del total de sólidos

III.3 – Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y sus alternativas de tratamiento

El mayor aliciente para someter a tratamiento a la biomasa residual húmeda era, hasta hace unos años, la minimización de la carga ambiental que representa. Como se detalla en el Capítulo I, el manejo y disposición inadecuados de la materia orgánica de desecho conllevan afectaciones sobre cuerpos de agua, suelos, vegetación, atmósfera y calidad de vida de las personas. A últimas fechas se ha venido incorporando otro incentivo, éste relacionado con la generación de energía. En el tratamiento de la biomasa residual comienza a privilegiarse a aquellos métodos que posibilitan la obtención de energía a partir de la materia orgánica contenida en materiales de desecho. De esta manera se avanza en la diversificación de fuentes de abastecimiento de energía y se contribuye a frenar el deterioro ambiental ligado a la utilización de los energéticos tradicionales. Sin embargo, en ocasiones se antepone el afán de producir de energía utilizando biomasa residual aun cuando no sea la elección pertinente en términos ambientales o sociales (García, 2010).

La FORSU es una biomasa húmeda en estado sólido con alta concentración de materia orgánica que puede ser tratada y estabilizada por distintas vías a fin de abatir su efecto contaminante. Pero, en función del proceso seleccionado, también es posible aprovecharla para la obtención de energía mediante distintas técnicas de conversión. En este tenor, enseguida se presentan las rutas más difundidas para el tratamiento de este tipo de biomasa. Para algunas clases de biomasa residual húmeda su aplicación directa al suelo es una opción viable y benéfica para el terreno. Esto sucede por ejemplo con los residuos ganaderos. Aunque en el caso de la FORSU esta práctica no suele llevarse a cabo, en parte por su composición poco convencional y sumamente variable, y también por las dificultades y polémicas que ello

supondría. Si se desea emplear a la FORSU como fertilizante o reparador de suelos, se debe optar por algún tratamiento previo que mejore su aptitud para dicho propósito.

La FORSU puede ser transformada mediante procesos termoquímicos como la combustión, gasificación o pirólisis. A través de este tipo de técnicas es posible reducir su volumen, estabilizarla y de paso obtener energía térmica que luego puede servir para generar electricidad, dentro de un esquema de cogeneración de energía. Antes de la combustión, se acostumbra el secado de la biomasa para reducir la energía que de otro modo se perdería debido a la vaporización del agua contenida en la biomasa. Después de secarse, la biomasa puede ser aplicada también como abono, en virtud de que ahora ya se encuentra estabilizada y es más fácil de manipular.

El principal inconveniente para la conversión termoquímica de la FORSU reside en la necesidad de disminuir su contenido de humedad, lo cual se consigue con ayuda de una técnica de secado, ya sea natural (a la intemperie expuesta a la radiación solar) o forzado (suministrando calor desde una fuente externa). La demanda de energía térmica que implica el secado de la FORSU, y de la gran mayoría de las formas de biomasa residual húmeda, llega a ser muy significativo y, por consiguiente, afecta la economía del proceso.

Otra opción son los procedimientos aerobios, que culminan con la obtención de compost, un producto estable y aplicable como abono o sustrato (Villa, 2010). En estos procedimientos, resulta crucial garantizar una aireación suficiente para mantener las condiciones aerobias y con ello la eficiencia del proceso. El porcentaje de humedad característico de la FORSU es totalmente compatible con los tratamientos aerobios. El inconveniente es, sin embargo, su baja relación C/N, situación que es posible corregir con la adición de biomasa lignocelulósica, hojas secas o paja, por ejemplo, como un aporte de carbono a la mezcla (García, 2010). Solos o como parte de un esquema integral de tratamiento, los procesos aerobios para cualquier biomasa residual húmeda, incluida la FORSU, no permiten el aprovechamiento de ésta como recurso energético, se limitan únicamente a conseguir su estabilización, higienización y reducción de volumen.

Una alternativa más, en la cual existe el atractivo adicional de la obtención de un producto energético versátil, es la estabilización e higienización de la FORSU mediante el método de degradación anaerobia. A diferencia de los procesos aerobios, la degradación anaerobia se desarrolla en ausencia total de aire u oxígeno, sus subproductos incluyen una mezcla gaseosa, nombrada biogás donde tiende a predominar el metano (CH_4), un alcano con aplicaciones en el terreno energético. Este mismo proceso de la degradación anaerobia sucede de manera lenta y poco eficiente en los tiraderos o rellenos sanitarios. Ahí, la FORSU junto con el resto de los residuos sólidos urbanos es depositada y cubierta por otros desechos o por capas de tierra. Esto propicia que en los estratos más profundos se tengan condiciones anaerobias que detonan la descomposición de la FORSU con la producción simultánea de biogás. Existen otros métodos para el tratamiento de la biomasa residual húmeda, incluida por supuesto la FORSU, tales como la nitrificación, desnitrificación, electrocoagulación y la ozonización (García, 2010). Sin embargo, no resulta pertinente ahondar en ellos en virtud del acotamiento a que está sujeto el presente trabajo.

Los productos resultantes de los tratamientos practicados a la biomasa residual húmeda son de tipo sólido, líquido y gaseoso. Ya sea directamente o después de efectuado algún procedimiento, estos efluentes tienen la cualidad de que pueden ser reutilizados en el mismo tratamiento o como flujo de entrada para otros procesos. Los constituyentes y los posibles destinos de los remanentes del tratamiento de la biomasa residual húmeda, extensibles por ello a la FORSU, se describen en las líneas siguientes:

a) Efluentes sólidos - Se trata de los lodos procedentes del espesamiento y deshidratación de los efluentes de procesos aerobios y anaerobios. Con regularidad se les somete a un post-tratamiento para convertirlos en productos de utilidad agrícola.

b) Efluentes líquidos - Tomando como ejemplo lo sucedido con los reactores anaerobios, donde el flujo líquido tiene por lo general una concentración importante de materia orgánica no digerida, los subproductos líquidos pueden resultar útiles para la fertilización orgánica de cultivos, mejor todavía si son sometidos a un proceso de espesamiento para obtener un producto de mayor consistencia. La fracción propiamente líquida puede ser reintroducida en el proceso, a menos que se prefiera su eliminación por evaporación.

c) Efluentes gaseosos - Son subproductos de las reacciones bioquímicas a cargo de los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica. Algunas de las emanaciones gaseosas de los tratamientos aplicados a la biomasa residual húmeda están asociadas con problemáticas de la magnitud del cambio climático, la acidificación de aguas superficiales o el desprendimiento de malos olores. Sirva de ejemplo el caso de la degradación anaerobia, uno de cuyos subproductos en fase gas es el CH_4 , uno de los gases responsables del calentamiento global, pero que al mismo tiempo es un combustible que tiene vastas aplicaciones. Esto provoca que en los tratamientos anaerobios se busque con insistencia la maximización del subproducto gaseoso, no así de los subproductos sólidos o líquidos.

La explicación básica de los principios de operación de los tratamientos disponibles para la FORSU se asienta en la Tabla III.4. Ahí mismo, se mencionan sus ventajas e inconvenientes, los productos principales que se obtienen y los parámetros que exigen mayor atención durante el desarrollo de cada tratamiento. Se indica también si las distintas opciones de tratamiento de la FORSU ofrecen o no la posibilidad de sacarle un provecho en términos energéticos.

De la información presenta, se observa que no todos los procesos existentes para el tratamiento de la FORSU tienen el beneficio agregado de sintetizar un subproducto con posibilidades de ser empleado para la generación de energía. El tratamiento aerobio de la FORSU sólo permite la obtención de un subproducto útil para la actividad agrícola. En cambio, el secado térmico o la degradación anaerobia no sólo posibilitan la reducción de volumen y la estabilización e higienización de la materia de desecho. También son opciones disponibles que utilizan a la FORSU como insumo para la obtención de energía. Con la energía que se genera al someter a la FORSU a tratamientos de este tipo, es posible mejorar el desempeño energético y económico de las instalaciones donde están implementados. El resto de los subproductos de estos tratamientos también cuenta con aplicaciones viables dentro del ámbito agrícola, o bien como insumos para etapas posteriores del mismo tratamiento o de un proceso de otra índole.

A diferencia de lo que ocurre con las técnicas de secado térmico, para la degradación anaerobia resulta por demás conveniente el elevado porcentaje de humedad que distingue a la FORSU. Ello en alguna medida simplifica y reduce los costos asociados a los requerimientos de pre-tratamiento de la FORSU para ser tratada mediante degradación anaerobia. Esta puede llegar a ser una ventaja de la degradación anaerobia frente a otras opciones para el tratamiento de la FORSU. Asimismo, no debe olvidarse la importante contribución que a la rentabilidad de los sistemas anaerobios hace el biogás generado. Esta contribución se incrementa en la medida en que el contenido de CH_4 del biogás aumenta. En función de la concentración de CH_4 queda definida la gama de aplicaciones en donde puede ser utilizado el biogás, desde la sólo producción de energía térmica, hasta su empleo como combustible vehicular.

Tabla III.4 – Opciones para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

(Elaboración a partir de McCarty, 1964a; García, 2010; Villa, 2010)

Tratamiento	Descripción	Producto final	Parámetros determinantes	Ventajas	Desventajas	Obtención de energía
Secado térmico	Se suministra energía térmica, de manera natural o forzada, para provocar la evaporación del agua que acompaña a la FORSU.	Materia sólida seca, estable y que puede ser empleada como combustible o como abono.	Humedad inicial, temperatura, tiempo de residencia.	-Se obtienen productos combustibles. -En el caso del secado natural, su operación es sencilla y de bajo costo.	-Generación de olores desagradables. -Infiltración de lixiviados. -Consumo de energía para la eliminación de humedad.	Sí, mediante procesos termoquímicos.
Compostaje	Bajo condiciones apropiadas de aireación, humedad y temperatura, la materia orgánica biodegradable de la FORSU es transformada con la asistencia de microorganismos aerobios.	Compost, producto estable e higienizado con aplicaciones agrícolas.	Aireación y humedad suficientes, temperatura y relación C/N.	-Destrucción de gran variedad de patógenos, semillas y parásitos presentes en la biomasa. -Se obtiene un producto de fácil aplicación. -Permite el reciclaje de materia orgánica.	-En los sistemas abiertos, emisión de productos volátiles, compuestos de nitrógeno. -Generación de lixiviados que amenazan suelos y cuerpos de agua. -La conclusión del proceso puede demorar varios meses.	No.
Degradación anaerobia	La materia biodegradable de la FORSU se descompone, gracias a la acción de colonias de microorganismos, en un entorno carente de aire u oxígeno.	-Efluentes sólidos y líquidos con potenciales aplicaciones agrícolas. -Biogás, mezcla de gases donde destaca el CH ₄ .	Temperatura, acidez-alcalinidad, concentración de materia orgánica y grado de contacto entre ésta y los microorganismos.	-Poblaciones reducidas de microorganismos. -La capacidad de procesamiento de materia orgánica es mayor a la de su contraparte aerobia y se alcanzan porcentajes de remoción cuando menos similares. -Se produce un gas donde está presente el CH ₄ y que tiene aplicaciones como combustible.	-Los microorganismos se reproducen con lentitud y son muy sensibles a ciertas sustancias y a cambios en las variables de operación. -La puesta en marcha de los sistemas puede tomar un tiempo considerable. -Se precisan temperaturas de medianas a altas para una operación óptima.	Sí, siempre y cuando el contenido de CH ₄ en el biogás así lo permita.
Rellenos sanitarios	Los RSU, incluida la FORSU, son depositados en terrenos acondicionados para aminorar los efectos sobre el ecosistema circundante. En ausencia de oxígeno, la FORSU comienza a descomponerse.	-Subproductos líquidos (lixiviados), a menudo reinyectados. -Se genera biogás que contiene CH ₄ .	En este caso, no existe un control formal de los parámetros de operación, la descomposición y generación de biogás ocurren de manera casual.	-La infraestructura requiere un mínimo de inversión y los costos de operación y mantenimiento son igualmente módicos. -Debido a la extensión y cantidad de residuos depositados, la generación de biogás es bastante sustantiva.	-Si no son planeados y operados de manera correcta, los impactos sobre suelo, agua y atmósfera son severos. -Deterioro estético e inhabilitación del lugar donde está emplazado. -Hundimientos y riesgo de explosión de no ser desgasificados oportunamente.	Sí, siempre y cuando el contenido de CH ₄ en el biogás así lo permita.

III.4 - Degradación anaerobia

La descomposición de la materia orgánica biodegradable ocurre en todo lugar y de manera espontánea, en tanto se presenten las condiciones propicias. Los principales responsables de esta degradación son seres microscópicos que sintetizan sus nutrientes a partir de los compuestos orgánicos presentes en la materia biodegradable. Para dicha labor y su supervivencia, además de compuestos principalmente a base de nitrógeno y fósforo, los microorganismos pueden requerir oxígeno, recibiendo entonces el calificativo de aerobios. Si prescindieren de este aporte de oxígeno el cual incluso puede resultarles dañino, se trata entonces de microorganismos anaerobios. A lo anterior hay que añadir el mantenimiento de las condiciones favorables para su desarrollo y reproducción, lo cual se logra a través del uso de dispositivos específicos que permiten controlar y acelerar el proceso en comparación con lo que normalmente acontece en la naturaleza.

En ese sentido, la degradación anaerobia (DA) es un proceso bioquímico para el tratamiento, estabilización e inclusive el aprovechamiento energético de la materia orgánica biodegradable, como la presente en la FORSU. La DA tiene lugar gracias a la acción conjunta y concertada de diversas clases de microorganismos anaerobios, mayoritariamente bacterias. Estos microorganismos crecen y proliferan en tanto se encuentren inmersos en un entorno favorable. La estabilización de la materia en tratamiento anaerobio sucede debido a la remoción o eliminación de un porcentaje significativo de su carga orgánica gracias a su transformación en subproductos más equilibrados, y valiosos desde distintas perspectivas. Uno de estos subproductos es el biogás, una mezcla de diversos gases en la cual los principales integrantes son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). La biomasa susceptible de ser tratada con éxito por la DA comprende a toda aquella materia orgánica de fácil descomposición como consecuencia, en parte, de un porcentaje elevado de humedad. Así pues, la FORSU es una clase de biomasa para la cual la degradación en condiciones anaerobias es una opción pertinente y sumamente atractiva (Figura III.1).

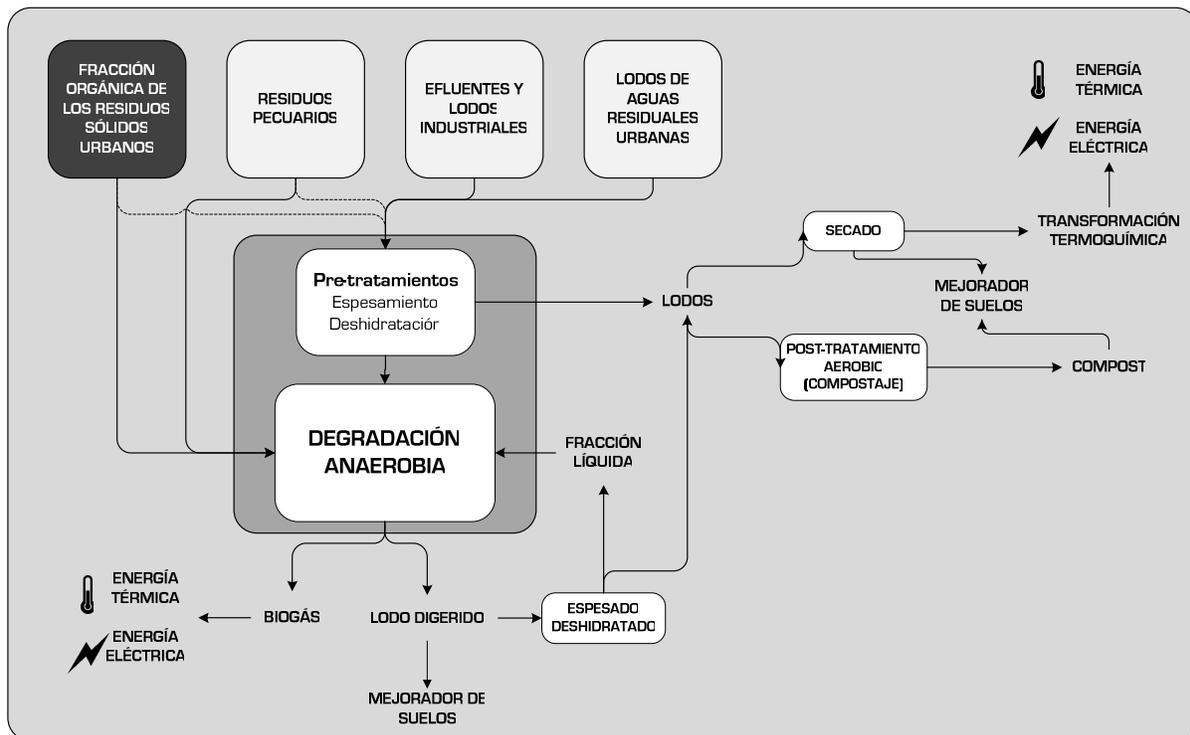


Figura III.1 - Biomasa apta para la degradación anaerobia y aprovechamiento de los subproductos
(Elaboración a partir de García, 2010)

La DA, también conocida simplemente como digestión, es un proceso relativamente complejo a lo largo del cual es posible distinguir varias fases o etapas. En cada una de ellas, toman partido tipos particulares de sustancias y especies de microorganismos, estos últimos con funciones indispensables y bien diferenciadas. Enseguida se discutirá, someramente, la serie de transformaciones que dan forma al fenómeno de DA de la materia orgánica.

III.4.1 - Descripción del proceso

La DA consta básicamente de cuatro fases, con sus respectivas poblaciones de microorganismos, por lo regular bacterias. Las fases ocurren de manera secuencial, en el entendido de que los productos de alguna de estas etapas son la materia de trabajo para la etapa subsecuente [Campos y col., 2005]. Ahora bien, lo acontecido en estas cuatro fases se relata a continuación:

a) Fase de hidrólisis - Marca el comienzo del proceso. Aquí, los compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, lípidos y proteínas, son despolimerizados, es decir, fracturados en sustancias más simples, solubles y aptas para ser utilizadas por los microorganismos partícipes de las fases posteriores. Los productos obtenidos son, entre algunos otros, mono y disacáridos, ácidos grasos, aminoácidos y alcoholes. Las bacterias encargadas de esta fase son del tipo hidrolítico-acidogénica, y su labor es efectuada con la asistencia de enzimas.⁴⁹

b) Fase acidogénica - Los productos de la fase de hidrólisis son empleados por otros conglomerados bacterianos generando ácidos grasos volátiles (AGV), en esencia, ácido acético, propiónico, butírico y valérico. La cinética o velocidad de la fase acidogénica es relativamente rápida. A esto se añade el hecho de que las bacterias que en ella operan son facultativas, es decir que tienen la habilidad de mantenerse con vida con o sin la presencia de oxígeno [Sarasa, 2010]. Estas peculiaridades de la fase acidogénica permiten especular que la formación de AGV se da prácticamente de manera ininterrumpida y con celeridad. De ahí que su adecuada contención sea de enorme importancia para el correcto funcionamiento de la DA.

c) Fase acetogénica - En esta fase intervienen las bacterias productoras de ácido acético (acetogénicas) sintetizando simultáneamente hidrógeno y dióxido de carbono. Estos dos últimos compuestos son empleados a su vez por otra familia de bacterias que, como las homoacetogénicas, los convierten también en ácido acético. Estas bacterias son igualmente facultativas y su actividad está, bajo condiciones operativas óptimas, en sincronía con la de las bacterias productoras de metano.

d) Fase metanogénica - Las responsables de esta fase son bacterias estrictamente anaerobias, las cuales a partir del ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, sintetizan el gas metano. Cabe apuntar que alrededor del 70% del metano proviene de la transformación del ácido acético, a cargo de las bacterias denominadas metanogénicas acetoclásticas. El metano restante resulta de la recombinación de hidrógeno y dióxido de carbono, labor desempeñada por las bacterias metanogénicas hidrogenófilas. Es importante mencionar que la cinética de la fase metanogénica es lenta en comparación con las fases primeras de la DA [Sarasa, 2010].

⁴⁹ Una enzima es un catalizador de origen biológico cuyas funciones son favorecer y acelerar las transformaciones bioquímicas. En principio, al igual que ocurre con otros catalizadores, las enzimas no figuran como los reactivos en un proceso, por lo que no se consumen en el desarrollo del mismo. Sin embargo, las enzimas se combinan temporalmente con el sustrato (sustancia bajo estudio) formando compuestos activados que incrementan la velocidad de reacción, tras la cual se disocian por falta de afinidad entre el producto de reacción y la enzima. Entre los diversos grupos de enzimas se encuentran las hidrolasas, cuya función es descomponer los constituyentes del sustrato con ayuda de las moléculas del agua.

De estas cuatro fases, alguna o algunas pueden adquirir el carácter de fase limitante. Es decir, aquella que en cierto modo acota el ritmo o velocidad de todo el proceso. La fase o fases limitantes de la DA se define en consideración de factores como la composición y estructura de la materia orgánica a degradar.⁵⁰ Aunque también importa el desempeño particular de alguno de los grupos de microorganismos involucrados, tal como sucede con las bacterias metanogénicas cuyo crecimiento es lento y sumamente delicado.

Como se apuntó antes, la DA es el resultado de la convivencia y cooperación armoniosa de diversas familias de bacterias que llevan a cabo cada una de las distintas etapas que integran al proceso. En virtud de lo anterior, resulta necesario contar con información, cuando menos elemental, en torno de las principales familias de microorganismos que tienen una asignación específica dentro de la DA. Para tal efecto, en la Tabla III.5 se presentan los rasgos de mayor relevancia de los microorganismos implicados en la DA.

Tabla III.5 – Clasificación y características de los microorganismos del proceso de degradación anaerobia

(Elaboración a partir de Sarasa, 2010)

Tipo de microorganismos	Subtipo	Materia prima	Productos	Características destacadas	Velocidad de proliferación
Bacterias productoras de ácido	Formadoras de ácidos	Productos de la hidrólisis	AGV, hidrógeno y dióxido de carbono	Si la concentración de H ₂ es baja, producen más ácido acético; cuando es alta, sintetizan otros AGV.	Rápida
	Acetogénicas	AGV, hidrógeno y dióxido de carbono	Ácido acético e hidrógeno	Son afectadas por la concentración de H ₂ .	Medianamente lenta
Bacterias productoras de metano	Metanogénicas acetoclastas (acetofílicas)	Ácido acético	Metano	-No son afectadas por la concentración de H ₂ -Controlan el pH del medio al eliminar el ácido acético y producir el CO ₂ , que una vez disuelto, forma una solución amortiguadora.	Lenta
	Metanogénicas hidrogenofílicas	Hidrógeno y dióxido de carbono	Metano y agua	No reportadas	

III.4.2 – Tipos de reactores anaerobios

El componente central de todo proceso de DA es el reactor anaerobio. La función de los reactores anaerobios consiste en albergar a la materia que será sometida a DA. Además, permite el establecimiento y control continuo de los parámetros esenciales del proceso a fin de acelerarlo y asegurar un nivel aceptable de eficiencia. En su versión más simple, un reactor anaerobio, o lo que es lo mismo un digestor, consiste en un tanque o depósito hermético. En este depósito se vierte la materia orgánica que será estabilizada por los microorganismos responsables de la DA. Por lo general, los digestores cuentan con al menos un punto de acceso para el influente y otro para la purga o salida del efluente, están provistos además de una abertura para la evacuación del biogás se esté generando.

⁵⁰ A este respecto, lo acontecido con los materiales constituidos mayoritariamente por celulosa, hemicelulosa y lignina, resulta bastante ilustrativo. Para estos materiales, presentes en los residuos agrícolas y forestales, la fase limitante es la hidrólisis, dada la dificultad o demora que pueda suponer la ruptura de compuestos de esta naturaleza en unidades más simples. Este es uno de los motivos por los cuales éstas y otras formas similares de biomasa no resulten lo suficientemente atractivas para someterlas a procesos de degradación anaerobia.

Las fosas o tanques sépticos se convirtieron en los precursores de los reactores anaerobios actuales utilizados para el aislamiento, almacenamiento y estabilización de residuos de distinta índole. Con el correr del tiempo, los diseños y configuraciones de los reactores anaerobios fueron evolucionando con miras a ampliar la gama de materiales susceptibles de ser degradados e incrementar la eficiencia global del proceso. Hoy día, los reactores anaerobios se construyen usando materiales diversos, desde tabiques y concreto reforzado, hasta láminas de acero de calibres variados y polímeros plásticos de distintas densidades.

Por otra parte, las tecnologías de los reactores anaerobios son muy distintas en cuanto a su complejidad y funcionamiento, ello es consecuencia de que diferentes formas de materia orgánica demandan diferentes atributos de los reactores anaerobios. De ahí que, la elección de una u otra tecnología dependa sobre todo de las características de la materia orgánica a tratar [Carreras, 2010]. En ese sentido, la clasificación de los reactores anaerobios obedece por lo regular a dos criterios principales, a saber: Régimen de carga o alimentación y arreglo de la masa microbiana al interior del digestor (Figura III.2).

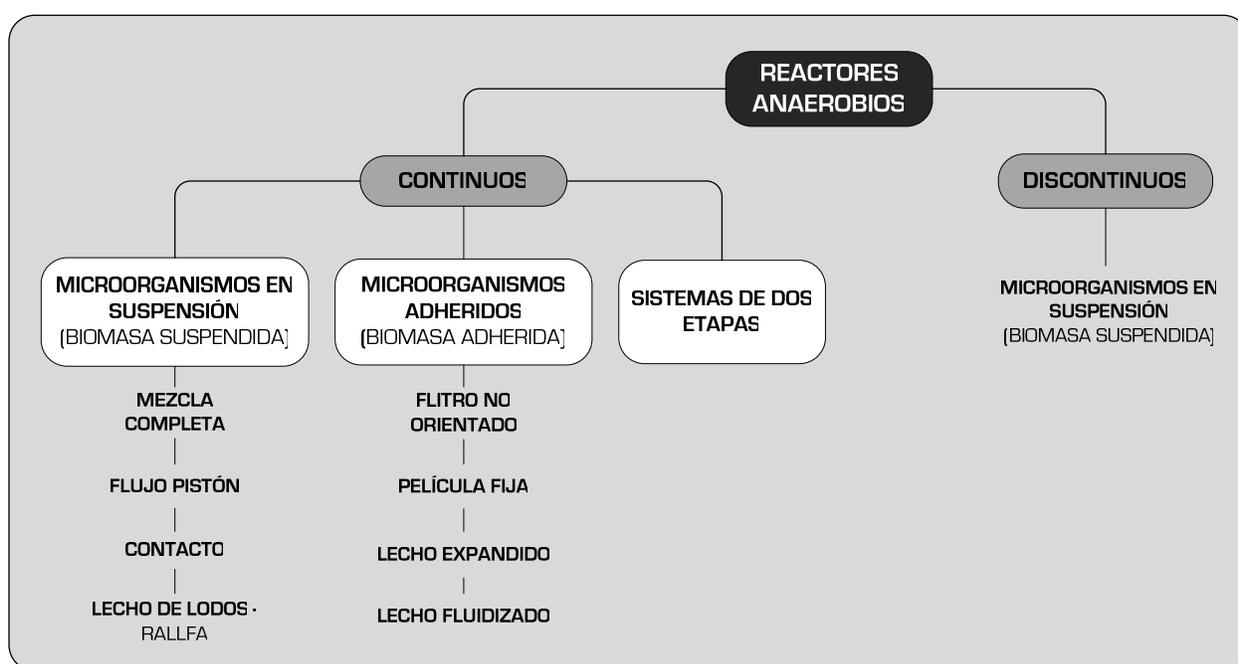


Figura III.2 - Clasificación de las tecnologías en reactores anaerobios
(Adaptado de Carreras, 2010)

Con respecto al régimen de carga o alimentación⁵¹, los reactores anaerobios pueden ser de tipo continuo o discontinuo. En los reactores con régimen de alimentación continua, la carga y descarga del mismo se llevan a cabo de manera periódica. A su vez, se tiene conocimiento de reactores continuos sin recirculación, en donde la materia orgánica se introduce de manera continua o bien intermitente y en los cuales ninguna porción del flujo de salida se reintroduce al digestor. La recirculación, en efecto, se refiere a que una fracción del material saliente, de los lixiviados o de los sólidos acumulados en el reactor, se reinyecta en el sistema al ser

⁵¹ La velocidad de carga orgánica, esto es, la cantidad de materia orgánica introducida regularmente al reactor anaerobio por unidad de volumen de éste, depende de la naturaleza del residuo a degradar y de su tiempo de residencia. La velocidad de carga orgánica está acotada por el tiempo de residencia hidráulico del influente, que representa el lapso que éste debe permanecer en el reactor para ser degradado por los microorganismos, cuyo ritmo de actividad también incide en la determinación de la velocidad de carga orgánica. Al tener un ritmo de crecimiento bastante lento, las poblaciones de bacterias productoras de metano deben ser preservadas en la medida de lo posible, evitando su disminución a consecuencia de, entre otros factores, la extracción del efluente digerido.

mezclada con la materia de entrada. La recirculación se recomienda como una acción para mejorar la homogeneidad e incrementar el tiempo efectivo de contacto entre los microorganismos y la materia orgánica (García, 2010), lo que viene a constituir el tiempo de retención de sólidos.

Las lagunas anaerobias, comúnmente usadas para el tratamiento de residuos pecuarios, son un buen ejemplo de reactores anaerobios continuos sin recirculación. La laguna es alimentada por un costado y del lado opuesto sale, luego de un tiempo de residencia variable, el efluente digerido. Esta la modalidad de operación es mejor conocida como flujo pistón, en la cual el contenido del digestor se desplaza en su interior debido al empuje de la materia orgánica entrante.

De modo análogo, se dispone también de reactores anaerobios continuos con recirculación. La principal de las ventajas de esta clase de reactores consiste en que posibilita un mayor tiempo de contacto entre microorganismos y materia orgánica. Esto generalmente conduce a una digestión más rápida y con menores requerimientos de espacio en comparación con otras modalidades de operación. A la categoría de digestores continuos con recirculación pertenece el reactor de mezcla con recirculación, el cual dispone de mecanismos internos de mezclado para evitar no sólo la formación de zonas muertas, sino también la redistribución de los sólidos precipitados. La temperatura de operación de estos sistemas puede ser de media a elevada, con una concentración de sólidos en el sustrato de alimentación más bien baja.

El reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA, cuyas siglas en inglés son UASB, *up-flow anaerobic sludge blanket*), es otro ejemplo de reactor continuo. En esta clase de reactor la materia orgánica a tratar se alimenta en dirección ascendente desde su parte inferior. En su recorrido al interior del reactor, la materia orgánica atraviesa un lecho o cama de lodos biológicos. Estos consisten en aglomeraciones de microorganismos que debido a la leve turbulencia provocada por la entrada del influente consiguen un mejor contacto con la carga orgánica que se está administrando.

En los reactores discontinuos el ingreso de la materia orgánica se realiza por lotes. Esto significa que se administra una sola carga inicial de microorganismos y materia orgánica de tamaño tal que ocupa el volumen de trabajo del reactor. Dicha carga permanece en el reactor hasta completar su descomposición. Transcurrido ese tiempo, el material, ya digerido, se extrae del reactor y hacen los preparativos pertinentes para repetir de nuevo todo el proceso. En ocasiones se mencionan también a los reactores con una rutina de alimentación semi-continua. En este tipo de digestores, a diferencia de los sistemas de operación continua, la carga de la materia orgánica tiene lugar en intervalos de 24 o menos horas.

Como regla general el diseño y la operación de los reactores anaerobios deben permitir el mayor y más efectivo contacto entre microorganismos y materia orgánica en tratamiento. En tal sentido, es determinante la situación de los microorganismos al interior del digestor. Se distinguen dos configuraciones básicas que aluden a la disposición de los microorganismos en el reactor anaerobio. Por una parte, los reactores con microorganismos suspendidos, y por otra, los reactores con microorganismos adheridos (García, 2010). En atención a parámetros de operación tales como la dosificación de la alimentación, la temperatura y la recirculación o no del medio en descomposición, estos sistemas pueden a su vez subdividirse en otras categorías más específicas.

En los reactores con microorganismos suspendidos, las bacterias que llevan a cabo la DA se hallan dispersas, flotando en toda la masa el medio en descomposición sin estar fijos a ninguna superficie. En esta clase de sistemas, con frecuencia los diferentes microorganismos

se agrupan en pequeños cúmulos, que se denominan flóculos, como medida de adaptación para favorecer su supervivencia y realizar sus funciones de manera más ágil y efectiva.

En los reactores con microorganismos adheridos, por otra parte, las bacterias se fijan a un soporte inerte con elevada relación superficie/volumen, siendo muy útiles para esta tarea los materiales sólidos altamente porosos. El propósito central de estos sistemas es acrecentar el contacto entre el flujo orgánico a tratar y los microorganismos, junto con evitar pérdidas sustanciales de éstos al extraer el efluente digerido. Dos de los sistemas con microorganismos adheridos más difundidos son el filtro anaerobio y el digestor de lecho fluidizado. El filtro anaerobio consiste de un tanque o contenedor cerrado libre de oxígeno, provisto de un sistema de soporte microbiano fijo elaborado con materiales o piezas de alta relación superficie/volumen. Estos sistemas presentan inconvenientes como, entre otros, la formación de bloques y canales preferenciales (García, 2010).

Por su parte, en los digestores de lecho fluidizado, los microorganismos se sujetan de un material de soporte particulado el cual se deposita en el fondo del reactor. Con la entrada ascendente del sustrato a tratar, el material de soporte es fluidizado, de tal suerte que hay una mayor interacción entre materia orgánica y microorganismos (García, 2010). En los reactores con microorganismos adheridos es necesario mantener un movimiento relativo entre la materia orgánica y las estructuras de soporte. Esto como exigencia para preservar un desempeño satisfactorio del proceso de tratamiento. Es por ello que los reactores con microorganismos adheridos no son compatibles con un régimen de alimentación discontinua, a no ser que se lleve a cabo una recirculación sistemática del sustrato (García, 2010).

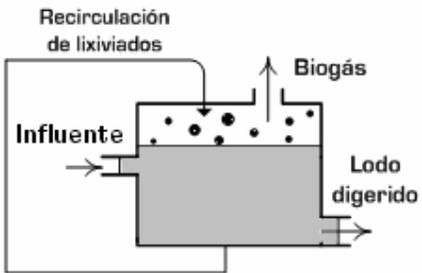
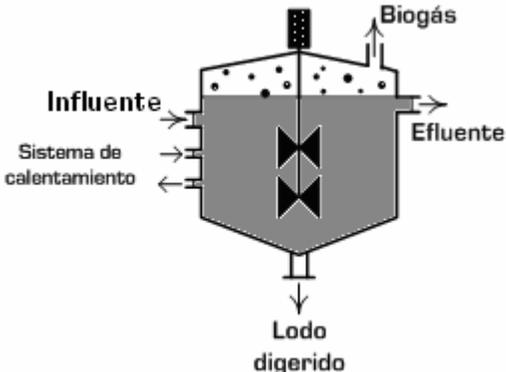
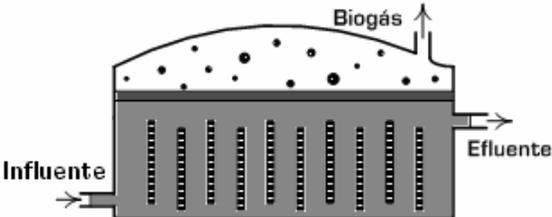
Finalmente, los sistemas de dos etapas están constituidos por dos reactores anaerobios en los cuales se llevan a cabo de manera relativamente independiente las cuatro fases de la DA. El principal beneficio que reporta esta clase de configuraciones estriba en la posibilidad de establecer condiciones de operación diferenciadas para los distintos grupos bacterianos. Esto quiere decir que, sirva de ejemplo, en un primer reactor las variables como temperatura, pH y agitación se calibran con objeto de favorecer el proceso de hidrólisis. Mientras, en un segundo reactor, las condiciones se establecen a modo de aceleran las reacciones involucradas en las fases de acidogénesis y metanogénesis.

Además de los variantes antes presentadas, es posible adoptar otros criterios para clasificar a los reactores anaerobios. De acuerdo con los valores de parámetros de operación como la temperatura, la clasificación es como sigue: Psicrófilicos (5 a 20 °C), mesófilicos (20 - 40 °C) y termófilicos (50 - 70 °C). Algo análogo puede efectuarse aludiendo a la concentración de materia orgánica del sustrato. En este caso, los reactores son del tipo húmedo, cuando el sustrato de trabajo posee una concentración de sólidos totales de no más de 15%, y del tipo seco si el flujo de alimentación posee un contenido de sólidos totales entre 15 y 40%. Sin embargo, los valores que definen a cada categoría a menudo difieren entre sí como resultado de la multiplicidad de discernimientos existentes; empero, tales discrepancias por lo regular no son demasiado significativas.

Retomando el tema central del presente trabajo, cabe apuntar que con relación al tratamiento anaerobio de la FORSU, no existe un consenso en relación a cuál es el diseño de reactor anaerobio más apropiado para llevarlo a cabo. Por tanto, se dispone de múltiples opciones de sistemas anaerobios, de una, dos o más etapas, con o sin calentamiento, mezclado, recirculación, todas ellas en teoría aptas para trabajar con esta forma peculiar de biomasa residual. Para ahondar un poco en este aspecto, se presentan, de forma notoriamente simplificada, en la Tabla III.6 los tipos de reactores y las configuraciones comúnmente empleadas para la DA de la FORSU.

Tabla III.6 – Variantes típicas de reactores anaerobios para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

(Elaboración a partir de Price y Cheremisinoff, 1981; Campos y col., 2005; Carreras, 2010)

Tipo de reactor anaerobio	Ventajas	Inconvenientes	Aspectos adicionales
<p>Reactor discontinuo – RDC</p>  <p>Recirculación de lixiviados</p> <p>Influente</p> <p>Biogás</p> <p>Lodo digerido</p> <p>Régimen discontinuo de alimentación. Concluida la digestión, el reactor se vacía para luego ser cargado con materia orgánica fresca.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Más simple y económico. -No está equipado con sistemas de calentamiento ni de mezcla forzada. -Muy usado en el ámbito doméstico, tanto rural como urbano. 	<ul style="list-style-type: none"> -El medio en descomposición se estratifica. -Prolongado tiempo de residencia (50 – 70 días). -Producción baja e intermitente de biogás. -Eficiencia baja. 	<p>No reportados</p>
<p>Reactor continuo de mezcla completa – RCMC</p>  <p>Influente</p> <p>Sistema de calentamiento</p> <p>Biogás</p> <p>Efluente</p> <p>Lodo digerido</p> <p>Sistema de digestión húmeda, se utilizan agitadores mecánicos o recirculación del biogás para homogeneizar el medio y evitar la formación de costras. Periódicamente se purga el sobrenadante y el lodo digerido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Técnicamente sencillos, no hay retención de microorganismos suspendidos ni recirculación de lodos digeridos. -La incorporación del equipo de mezclado alienta la descomposición y la pronta evacuación del biogás. -Pueden estar equipados con sistema de calentamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> -La materia orgánica requiere pre-tratamiento para alcanzar la concentración de sólidos en el sustrato, lo que conlleva pérdidas de materia orgánica. -Consumo elevado de agua fresca. -Tiempo de residencia hidráulica considerable (15 – 30 días). 	<ul style="list-style-type: none"> -Carga máxima 6.0 – 9.0 kg-SV/m³-día -Tiempo de arranque, entre 30 y 90 días
<p>Reactor continuo flujo pistón – RCFP</p>  <p>Influente</p> <p>Biogás</p> <p>Efluente</p> <p>Trabaja en el rango de la digestión seca. Se tratan de depósitos horizontales, generalmente excavados en el suelo y equipados con un sistema interior de calefacción. La materia que ingresa provoca el desplazamiento progresivo del medio en descomposición a través del digestor, hasta llegar al punto de salida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Digestores sencillos y de tamaño reducido. -Mayor simplicidad de la etapa de pre-tratamiento. -No es necesaria la dilución del sustrato; hay menores pérdidas de materia orgánica. -Residuos separados o sin separar. 	<ul style="list-style-type: none"> -No tienen retención de microorganismos ni recirculación de lodos. -Largo tiempos de retención hidráulica (20 – 30 días). -Formación de espumas y costras que dificultan la salida del biogás y la descomposición de la materia. 	<p>15 – 20 kg-SV/m³-día</p>

Continuación Tabla III.6 – Variantes típicas de reactores anaerobios para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

(Elaboración a partir de Price y Cheremisinoff, 1981; Campos y col., 2005; Carreras, 2010)

Tipo de reactor anaerobio	Ventajas	Inconvenientes	Aspectos adicionales
Sistemas continuos de dos etapas			
	<ul style="list-style-type: none"> -Diversidad de configuraciones posibles combinando reactores anaerobios con funciones complementarias. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mayor complejidad de la instalación, por tanto, es más onerosa. 	<p>Trabajan a distintas cargas orgánicas.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> -Permite una dosificación apropiada de compuestos intermedios para la etapa metanogénica. 	<ul style="list-style-type: none"> -Eventual descoordinación entre las distintas poblaciones bacterianas. 	
	<ul style="list-style-type: none"> -Teóricamente, se incrementa la eficiencia global de la digestión. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mayores consumos de energía durante el proceso, que puede no compensarse con el posible aumento en la generación de biogás. 	
<p>Reactores separados para las fases de la degradación anaerobia, Por un lado, las fases de hidrólisis y acidogénesis, y por otro, la acetogénesis y metanogénesis. Las configuraciones son diversas: Dos RCMC, dos RCFP con o sin retención de microorganismos.</p>			

Muchas de las variantes de biomasa residual, incluida la FORSU, se distinguen por una alta heterogeneidad en sus propiedades físicas y químicas. Este puede ser el caso de parámetros tales como porcentaje de humedad, tamaño promedio y contenido de impurezas. De ahí que con bastante frecuencia sino es que de manera obligada, se consideren uno o varios procedimientos para el pre-tratamiento de la biomasa que pretende ser aprovechada. Gracias a este acondicionamiento previo se consigue un recurso más uniforme y adecuado para el tipo de proceso y tecnología que se deseen implementar.

Las necesidades de pre-tratamiento de la FORSU antes del comienzo formal de la DA, están en función de las exigencias operativas del reactor anaerobio que sea seleccionado. Así, los pre-tratamientos comprenden desde segregación magnética y trituración, hasta cribado y separación por gravedad (Vandevivere y col., 2003). El residuo de salida de la digestión, también demanda uno o varios tratamientos complementarios para culminar la estabilización

de la materia orgánica. El alcance de este post-tratamiento depende enteramente de las características del efluente obtenido, que están condicionadas a su vez al tipo de reactor donde tuvo lugar la degradación. Los posibles post-tratamientos para el efluente de la DA son, en este orden, la deshidratación mecánica, la maduración aerobia y el tratamiento de la fracción líquida [Vandevivere y col., 2003].

III.4.3 - Pre-tratamiento de la biomasa

La biomasa a emplear en un proceso anaerobio, a menudo muy heterogénea de origen, se procesa de manera previa a fin de adecuarla, tanto física como químicamente, a los requerimientos propios del sistema anaerobio. De manera concreta, las operaciones de pre-tratamiento tienen los objetivos siguientes [Díaz y col., 2010]: a) Modificar las características físicas de la biomasa para que los diferentes componentes puedan ser segregados más fácilmente; b) Separar componentes y contaminantes específicos presentes en la biomasa; c) Preparar la biomasa, ya segregada, para la degradación anaerobia; d) Homogeneizar la biomasa antes de su ingreso al sistema, en particular en casos de co-digestión donde se tratan simultáneamente dos o más tipos de biomasa; y e) Facilitar el funcionamiento de los equipos, con lo que se alarga su tiempo de vida.

En la selección de los procesos de pre-tratamiento influye, además de su origen o procedencia, el estado físico en que se encuentra la biomasa. En lo concerniente a biomasa sólida, como lo es la FORSU, las adecuaciones son más bien de carácter físico, resaltando la separación de materiales no deseados, la reducción de tamaño, la separación por densidad, el mezclado, entre algunas otras de las expuestas en la Tabla III.7.

Tabla III.7 - Opciones de pre-tratamiento para biomasa sólida

(Elaboración a partir de Díaz y col., 2010)

Objetivo	Proceso	Principio de operación	Resultado
Eliminación de componentes no deseados	Separación magnética	Campos magnéticos	<i>Extracción de aluminio y materiales ferrosos</i>
	Separación electrostática	Corrientes de Foucault, la separación se logra por medio de los distintos valores de carga superficial	<i>Retiro de materiales conductores (metales) y no conductores (vidrio, plástico)</i>
Adecuado tamaño de partícula	Reducción de tamaño	Trituración, molienda, maceración	<i>Material uniforme que facilita un mejor contacto con las bacterias</i>
	Separación por tamaño	Superficies de criba	<i>Dos o más fracciones de materiales con dimensiones distintas</i>
	Separación por densidad	Diferencias de densidad y de características aerodinámicas	<i>Eliminación de materiales livianos (papel, plástico) y materiales pesados (metales)</i>
Adecuación del flujo de entrada	Calentamiento o enfriamiento	Suministro o sustracción de energía térmica por distintas vías	<i>Influente adaptado al nivel de temperatura del reactor</i>
	Mezclas con otros efluentes	Mezclado mecánico o neumático	<i>Influente para co-digestión</i>
	Mezclas con flujo recirculado (en digestores con recirculación)	Mezclado mecánico o neumático	<i>Inoculación del influente</i>
	Acidificación	Separación de las etapas de hidrólisis y acidogénesis	<i>Influente parcialmente degradado</i>
	Dilución o concentración de materia orgánica	Adición o remoción de agua u otro líquido	<i>Concentraciones idóneas de sólidos y, por consiguiente, de materia orgánica</i>

Los procesos de pre-tratamientos pueden efectuarse en distintos puntos de la cadena de aprovechamiento de la biomasa, pudiendo ser al momento justo de su recolección o minutos antes de su entrada al reactor anaerobio. Cabe hacer notar que el pre-tratamiento de la materia orgánica bruta tiene una estrecha relación con la logística en relación a la biomasa y sus costos asociados, esto es, su transporte, carga, descarga y almacenamiento. Con respecto a la complejidad de la etapa pre-tratamiento, ésta está muy ligada a las condiciones de origen de la biomasa que pretende ser tratada. En este sentido, el pre-tratamiento de la FORSU se dificulta cuando se encuentra íntimamente mezclada con componentes inorgánicos del caudal de residuos sólidos urbanos. En contraste, cuando la FORSU es separada de origen del resto de los desechos, la preparación previa a su tratamiento se torna menos compleja.

III.4.4 - Condiciones del entorno y parámetros de control del proceso

La DA es un proceso que requiere de la colaboración de distintas especies bacterianas para llevar a cabo las tareas específicas en cada una de las fases de que consta este tratamiento. Al tratarse de seres vivos, las bacterias demandan un entorno adecuado para su supervivencia y reproducción, lo cual incide decisivamente en el desempeño global de la DA. Del conjunto de microorganismos, las bacterias productoras de CH₄, sobre las que recae la mayor parte de la estabilización del sustrato por medio de la síntesis de ese gas, son las más delicadas y de lento crecimiento. Su adaptación a cambios repentinos en las condiciones de operación demora un tiempo considerable. De ahí la trascendencia de procurar que parámetros como temperatura, acidez-alcalinidad y ritmo de alimentación se mantengan lo más estables posible. Vigilando que no salgan de los márgenes que aseguran un desarrollo exitoso del proceso. Así pues, los parámetros de control y operación que tienen mayor relevancia en el funcionamiento de la DA serán abordados a continuación.

III.4.4.1 - Inóculo inicial

Es muy frecuente que la materia orgánica a tratar carezca, sobre todo en cantidad, de los microorganismos apropiados para la DA. Tal es el caso de la FORSU y de algunas otras formas de biomasa residual húmeda. De suceder esto, debe proveerse un inóculo o población inicial de bacterias anaerobias que efectúen la digestión y se multipliquen conforme el proceso se lleva a cabo. Habitualmente, el inóculo procede de un digestor que se encuentre operando a base de sustratos como residuos pecuarios, efluentes industriales, aguas residuales, que suelen ser los de mayor presencia a nivel mundial.

Luego de ser introducidos en el reactor anaerobio que se pretende poner en marcha, los microorganismos que aporta el inóculo, requieren un periodo de adaptación al medio de que se alimentarán y a las condiciones de operación que les serán impuestas. Una concentración inicial de inóculo del 5% suele ser suficiente para conseguir la activación de la primera etapa de la DA [Baraza y col., 2003]. Sin embargo, una mayor cantidad de inóculo puede reducir y hacer menos vulnerable el periodo de arranque del sistema anaerobio. Conviene apuntar que los tiempos de arranque típicos para sistemas anaerobios van de 1 a 4 meses [Sarasa, 2010]. Durante la fase de arranque de un sistema anaerobio se opta por una alimentación o carga orgánica moderada. Asimismo, se procura dar seguimiento puntual y sistemático al mayor número posible de parámetros de control. De esta manera se estará en condiciones de garantizar la estabilidad futura del sistema.

III.4.4.2 - Entorno anaerobio

Es requisito esencial que las condiciones anaerobias, esto es, nula presencia de aire u oxígeno, imperen en todo momento para que la digestión eventualmente suceda. De lo contrario, aun

en cantidades ínfimas, el oxígeno resulta bastante nocivo para las bacterias metanogénicas, y en alguna medida para el resto de los microorganismos involucrados en la DA. Para evitar la entrada de oxígeno, es importante asegurarse que los reactores anaerobios se encuentren perfectamente sellados. El biogás que se genera en su interior induce una ligera sobre-presión que no permite el ingreso de aire al reactor. Esto además impide que escapen gases y olores fétidos que resultan de la descomposición de la materia orgánica.

III.4.4.3 - Grado de mezclado

El mezclado apropiado del medio en descomposición contribuye a su homogenización, necesaria para lograr una concentración y temperatura uniforme al interior del reactor anaerobio. Asimismo, contribuye a aumentar el contacto de la materia orgánica con los microorganismos, al transporte de los productos intermedios y finales de la digestión, y de igual modo a la erradicación de zonas muertas en el sustrato. Son dos las modalidades de mezclado más conocidas que se aplican en los reactores anaerobios. La primera es a través de medios mecánicos, mediante aletas sumergidas en el medio en descomposición rotando a velocidades angulares más o menos bajas. La segunda, es por medio de un sistema neumático basado en la recirculación del biogás o del sustrato mismo.

III.4.4.4 - Temperatura

Las bacterias capaces de llevar a cabo la DA suelen clasificarse, de acuerdo a la temperatura en que proliferan, en: Psicófilas, de 5 a 20° C; mesófilas, entre 20 y 40° C, y termófilas, de 50 a 70° C (Lema y Méndez, 1997). La mayoría de las bacterias productoras de metano a la fecha identificadas se desempeñan en el rango mesofílico, con una temperatura óptima de trabajo cercana a los 35° C (Sarasa, 2010). No obstante, también las hay para valores inferiores, incluyendo aquellas que se desempeñan a temperatura ambiente.

En la medida en que la temperatura aumenta, las reacciones suceden en general con mayor rapidez, con lo cual la operación del sistema tiende a ser más eficiente y se reduce el volumen de los reactores (McCarty, 1964b). Sin embargo, la operación en el rango termofílico supone un aprovisionamiento externo de calor a fin de que prevalezca el nivel previsto de temperatura. Esta exigencia puede no ser admisible desde la perspectiva económica, luego de ponderar los costos y los beneficios que implicaría. Por ello, gran parte de los sistemas anaerobios se diseñan preferentemente para operar a temperaturas medias o bajas (McCarty, 1964b).

La influencia de la temperatura es particularmente notoria en los procesos de hidrólisis y en la formación de metano. El nivel térmico además de favorecer la actividad microbiana, repercute en la multitud de interacciones fisicoquímicas que se suscitan en el medio en descomposición. De ahí que la recomendación sea mantener una temperatura lo más estable posible en el digestor a lo largo de todo el proceso de DA. Para tal efecto se utilizan sistemas regulados de calentamiento, o bien aislantes térmicos que eviten variaciones drásticas de la temperatura.

III.4.4.5 - El pH

El pH⁵² es resultado de una serie de frágiles equilibrios químicos suscitados al interior de un reactor anaerobio, existiendo, por definición, una diversidad de factores implicados en su

⁵² El pH se define como el logaritmo base 10 del recíproco de la concentración de iones de hidrógeno de una solución. En agua pura a 25 °C, la concentración de iones de hidrógeno [H⁺] es 1.0x10⁻⁷ moles mL⁻¹, por lo cual su pH es igual a 7, siendo éste el valor que se asocia a una condición de neutralidad. Si la acidez se incrementa, la [H⁺] lo hace proporcionalmente, de modo que el pH desciende por debajo de 7. Por el contrario, cuando la [H⁺] se reduce por efecto de una mayor presencia del ion hidroxilo [OH⁻], es decir que el medio se torna básico o alcalino, el pH ahora se ubicara por arriba de 7.

determinación. El control del pH del medio en descomposición tiene gran importancia para el buen proceder de la DA. Así pues, los valores tolerables de pH para la digestión comprenden de 6.6 a 7.6, con un sub-intervalo óptimo que va de 7.0 a 7.2 [McCarty, 1964b]. Fuera de esos límites, la DA aún es factible, aunque con rendimientos demasiado magros. Es necesario precisar que los diferentes grupos bacterianos involucrados en la DA muestran máxima actividad en intervalos de pH diferenciados, a saber: Bacterias hidrolíticas, 7.2 a 7.4; bacterias acidogénicas, 6.0 a 6.2; bacterias metanogénicas, 6.5 y 7.5 [Sarasa, 2010].

En general, el control externo de pH se realiza en el momento en que su valor desciende más allá de 6.5 - 6.6. Si el pH cae por debajo de 6.5, la eficiencia decrece rápidamente al tiempo que la acidificación del medio comienza a resultar especialmente perjudicial para las bacterias metanogénicas acetoclastas. Si el pH disminuye a menos de 5.5, la actividad de las bacterias productores de metano se detiene completamente. Para valores de pH inferiores a 4.5, todos los microorganismos implicados en la DA quedan inoperantes [McCarty, 1964b; Lema y Méndez, 1997; Sarasa, 2010].

En caso de que el proceso se lleve a cabo de manera íntegra en un solo reactor, el pH debe ubicarse preferentemente en torno de 7, surgiendo complicaciones de consideración si el pH es inferior a 6 ó superior a 8.3 [Baraza y col., 2003]. El pH incide en el contenido de metano del biogás. Si el pH se ubica por debajo de 6, el biogás generado, si lo hubiese, será muy pobre en metano, lo cual reduce significativamente su valor energético [Carreras, 2010].

Pese a la relevancia que suele otorgarse al monitoreo del pH como medida para asegurar el correcto funcionamiento de los microorganismos anaerobios, éste resulta poco preciso para la detección oportuna de posibles desajustes en el sistema. Sarasa (2010) explica que esto es debido, por una parte, a que el pH es una variable logarítmica. De tal forma que al variar en una unidad, en realidad se está registrando un cambio de un orden de magnitud mayor.

Asimismo, las cualidades particulares de la materia orgánica sometida a DA le confieren una capacidad variable de contención del pH. Esto quiere decir que un sistema anaerobio desarrolla por sí mismo una capacidad para contrarrestar o amortiguar, hasta cierto punto, variaciones en el pH. Estas variaciones pueden deberse a acumulaciones de AGV o a cambios en la composición del sustrato de alimentación. La capacidad de amortiguamiento, también conocida como capacidad *buffer*, viene dada fundamentalmente por el sistema conformado por el dióxido de carbono (CO_2) y el ion bicarbonato (HCO_3^-) [Sarasa, 2010]. Existe otro sistema de amortiguamiento formado por el amoníaco (NH_3) y el ion amonio (NH_4^+). Sin embargo, éste ofrece menor capacidad de amortiguamiento en comparación con el primer sistema [Deublein y Steinhauser, 2008].

Profundizar en la explicación de cómo operan esos sistemas para la regulación del pH escapa al alcance del presente trabajo. No obstante, lo que conviene destacar en torno de ellos es que existe la posibilidad de mantener o aumentar la capacidad *buffer*. Ello se consigue mediante reactivos básicos, como por ejemplo el hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; hidróxido de sodio, NaOH ; carbonato de sodio, Na_2CO_3 ; y bicarbonato de sodio, NaHCO_3 . La cal o hidróxido de calcio es uno de los reactivos más utilizados para el control del pH en los procesos anaerobios, esencialmente por su disponibilidad y bajo costo.

El mayor de los inconvenientes asociados al empleo de la cal es la relativa insolubilidad de algunas de sus sales de calcio. Esto es particularmente cierto en los casos del bicarbonato de calcio, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, y del carbonato de calcio, CaCO_3 , compuestos que se forman cuando la cal reacciona con el CO_2 . La acción neutralizante de la cal, no obstante, es limitada. Una vez que el medio se satura, las cantidades adicionales de cal que se suministren prácticamente no

tendrán efecto alguno sobre el pH del medio. Esta cal adicional reacciona con el CO_2 y se forma CaCO_3 , el cual es insoluble y tiende a depositarse en el fondo del reactor sin contribuir a la neutralización de los excedentes de AGV y a la elevación del pH⁵³. El empleo de cal para control del pH se recomienda para cuando el valor se encuentre por debajo de 6.5, y sólo deberá añadirse la cantidad necesaria para elevar el pH en torno de 6.7 – 6.8 [McCarty, 1964b]. Si después de esta labor el pH volviera a ubicarse por debajo de 6.4 – 6.5, la cal puede ser usada nuevamente para incrementar el pH hasta los valores límites antes mencionados.

Otro de los reactivos para el control del pH es el bicarbonato de sodio, NaHCO_3 . A diferencia de la cal, el NaHCO_3 no reacciona con el CO_2 , por lo tanto no se crea vacío al interior del reactor por la desaparición parcial de ese gas. Además, al ser mucho más soluble que la cal, el NaHCO_3 no se precipita en el reactor, por lo que se requieren menores cantidades para nivelar el pH. El riesgo de que se provoque un aumento excesivo del pH al utilizar el NaHCO_3 , es mínimo [McCarty, 1964b].

III.4.4.6 - Alcalinidad

La alcalinidad, referida a un sistema anaerobio, está estrechamente relacionada con el pH y la capacidad de amortiguamiento del sustrato. Corresponde a la suma de las concentraciones de ion carbonato, CO_3^{2-} , y bicarbonato, HCO_3^- , y se expresa como mg/l de CaCO_3 (carbonato de calcio). Un valor óptimo de alcalinidad en el digestor permite amortiguar cambios repentinos en el pH ocasionados sobre todo por una generación desmesurada de AGV.

Se recomienda que el valor de la alcalinidad esté situado entre 1,500 y 5,000 mg/l CaCO_3 . Por tanto, si la concentración de AGV se ubica entre 50 y 100 mg/l, como normalmente sucede, bastaría con mantener una relación constante AGV/alcalinidad menor a 0.25 para no perder la capacidad *buffer* del sistema [WEF, 1998]. Como se dijo antes, para mantener o incrementar la alcalinidad se pueden recurrir a reactivos como: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , Na_2CO_3 y NaHCO_3 . De igual modo, el CO_2 disuelto en el medio en descomposición también contribuye a aumentar la alcalinidad de origen de la materia en digestión [Sarasa, 2010].

III.4.4.7 - Ácidos grasos volátiles

Los ácidos grasos volátiles (AGV) comúnmente considerados son: Acético, propiónico, fórmico, butírico y valérico, si bien los más abundantes suelen ser los dos primeros [Sarasa, 2010]. Los AGV son productos intermedios de la DA, pero al mismo tiempo se convierten en inhibidores de la misma cuando alcanzan ciertas concentraciones. Si se advierte un aumento inusual en la concentración de AGV, hay razones para pensar que ocurre un desbalance en el proceso de DA. Es muy probable que exista una descoordinación entre los procesos de generación y consumo de estos compuestos intermedios.

En un reactor anaerobio maduro, es decir con suficiente tiempo en operación ininterrumpida y estable, la concentración de AGV a menudo es menor a 500 mg AGV/L. La inhibición de la DA no se alcanza sino hasta que la concentración ronda los 5,000 mg AGV/L [Sarasa, 2010]. En este sentido, la sugerencia es realizar la cuantificación individual de los AGV, ya sea mediante cromatografía de gases o cromatografía líquida de alta resolución. Aunque, si no se cuenta con los implementos necesarios para los procedimientos anteriores, la determinación por medio de técnicas de titulación constituye una alternativa aceptable.

⁵³ El hecho de que la cal reaccione con el CO_2 en fase gaseosa plantea el inconveniente adicional de la potencial aparición de una presión de vacío. Ésta puede repercutir negativamente en el funcionamiento de los dispositivos para el aprovechamiento energético del biogás, o inclusive en la seguridad de las instalaciones y los alrededores.

III.4.4.8 - Nutrientes

Los microorganismos que participan en la DA requieren no sólo de materia orgánica biodegradable, sino también de sustancias inorgánicas complementarias e indispensables para su rápido crecimiento y correcto funcionamiento. Estas sustancias son requeridas en pequeñas dosis, y destacan por su importancia aquellas que contienen nitrógeno, hierro y fósforo (McCarty, 1964b). También suelen ser requeridos otros nutrientes donde estén presentes elementos como el níquel, cobalto o molibdeno (Sarasa, 2010). Generalmente, la mayoría de la biomasa residual húmeda, incluida la FORSU, no precisa de la adición externa de nutrientes para su tratamiento anaerobio (Sarasa, 2010).

III.4.4.9 - Presencia de sustancias tóxicas

Toda biomasa que se someta al proceso de DA deberá estar libre de sustancias que resulten tóxicas e inhiban la actividad de los distintos grupos bacterianos. El listado de compuestos perjudiciales abarca desde sales inorgánicas a base de, entre otros elementos, sodio, potasio, magnesio y calcio, hasta metales pesados, compuestos clorados, cianuros y compuestos orgánicos (McCarty, 1964b, Fernández-Polanco y García, 2000). Algunas de las sustancias que se generan en etapas intermedias de la digestión (H_2 , AGV, H_2S) también actúan como inhibidores si alcanzan concentraciones por arriba de lo tolerable. La entrada accidental de grandes volúmenes de oxígeno al reactor frena por completo la digestión. No obstante, una vez removido el oxígeno, ya sea por arrastre con un gas o por acción de microorganismos facultativos, la DA puede reanudarse.

El efecto tóxico o inhibitorio de esas sustancias se manifiesta sólo cuando están disueltas, y su severidad depende de su nivel de concentración. De esta manera, puede ser suficiente una fracción de miligramo por litro para comenzar a apreciar los efectos nocivos de alguna sustancia tóxica, o bien, no tener efecto alguno sino hasta después de acumularse varios gramos por unidad de volumen (McCarty, 1964c). No obstante, en cantidades moderadas, dependiendo del tipo de compuesto, algunas de esas sustancias pueden estimular la actividad de los microorganismos, y así acrecentar el ritmo de ejecución de las reacciones de la DA. Puede suceder que los microorganismos ante la presencia continuada de algún compuesto tóxico, desarrollen mayor capacidad de resistencia, desplazando su umbral de inhibición.

De manera sintética, la Tabla III.8 conjunta una serie de valores de referencia de los parámetros más relevantes de la DA cuando ésta es aplicada a la FORSU bajo distintas concentraciones de sólidos en el sustrato de alimentación.

III.4.5 - Post-tratamiento de la biomasa digerida

Del total de biomasa que ingresa a un sistema de tratamiento anaerobio, una parte es asimilada por los propios organismos, gracias a la cual crecen y se reproducen, el resto, se distribuye de forma variable en los productos residuales, que los hay de tipo sólido, líquido y gaseoso. Los dos primeros emanan del reactor intermezclados, llevando consigo residuos de la actividad biológica, microorganismos y materia orgánica sin degradar. Estos efluentes reciben el nombre común de fango o lodo digerido.

El objetivo principal de las operaciones de post-tratamiento de los lodos digeridos es disminuir su contenido de agua y materia orgánica, con la finalidad de convertirlos en productos capaces de ser reutilizados o, en su defecto, descartados sin afectaciones ambientales. En este sentido, la composición inicial de la biomasa y las particularidades del proceso de DA son

determinantes. Ambas son claves en la definición de las propiedades y, por tanto, de las necesidades de post-tratamiento de los lodos digeridos.

Tabla III.8 - Valores de referencia de parámetros relativos a la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
[Tchobanoglous y col., 1994]

Parámetro	Sólidos en baja concentración	Sólidos en alta concentración
Concentración de sólidos, %	8 a 10 (Típico: 4 a 8)	20 a 35 (Típico: 22 a 28)
Temperatura, ° C	30 a 38 55 a 60	30 a 38 55 a 60
Carga de sólidos, kg/m³ · día	0.6 a 1.6	6 a 7
Tiempo de retención, días	10 a 20	20 a 30
Destrucción de ST, %	40 a 60	Variable según composición del sustrato
Destrucción de STV, %	60 a 80	90 a 98
Producción de biogás, m³/kg-SV	0.5 a 0.75 (CH ₄ , 55%; CO ₂ , 45%)	0.625 a 1.0 (CH ₄ , 50%; CO ₂ , 50%)

De acuerdo con Díaz y col. (2010) los post-tratamientos de los lodos digeridos persiguen tres objetivos fundamentales:

- a) Reducción de peso y volumen** – Esto se consigue al disminuir su elevado contenido de agua, lo cual además facilita su manejo.
- b) Estabilización** – Se enfoca en la materia orgánica existente en el lodo digerido y que es susceptible por tanto a un proceso de descomposición.
- c) Higienización** – Consiste en aminorar la presencia sustancias, como metales, y organismos, sobre todo patógenos

Al respecto de la gama de posibles post-tratamientos aplicables a los lodos digeridos, la Tabla III.9 describe los objetivos y principios de operación de muchos de ellos. El uso que pretende darse a los lodos digeridos constituye igualmente un factor de decisión en la elección del método para su post-tratamiento. El destino de los lodos digeridos luego de ser tratados, va desde su disposición en rellenos sanitarios o su esparcimiento directo en el terreno, en especial del ámbito forestal y jardinería ornamental, hasta su distribución y comercialización como acondicionador de suelos, materia prima para procesos de compostaje o combustible de apoyo en instalaciones industriales (Díaz y col., 2010).

III.4.6 - Tratamiento del biogás

De no ser eliminadas o cuando menos removidas parcialmente, algunas de las sustancias presentes en el biogás, pueden ocasionar problemas al momento de su aprovechamiento energético. Entre estas sustancias se encuentran el vapor de agua (H₂O), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el dióxido de carbono (CO₂). Por esta razón, a continuación se abunda un poco en torno de los procedimientos para el control de estas tres impurezas que están presentes en el biogás arrojado por la DA de materia orgánica.

III.4.6.1 - Remoción del vapor de agua

A medida que el biogás sale del digestor y se adentra en las tuberías de conducción, el vapor de agua que viaja con él tiende a condensar. De no ser evacuado este vapor condensado,

puede llegar a obstruir los conductos ocasionando la interrupción del suministro de biogás. Una manera sencilla de remover el vapor de agua presente en el biogás es condensándolo a voluntad. Para tal efecto, se emplea un arreglo conocido como trampa de condensación.

Tabla III.9 – Opciones para el post-tratamiento de los efluentes de la digestión
(Adaptado de Díaz y col., 2010)

Objetivo	Proceso	Principio de operación
Reducción de volumen por espesamiento	Espesamiento por gravedad	<i>Sedimentación en tanques o balsas.</i>
	Por centrifugación	<i>Tambor perforado de alta velocidad de rotación, retiene en su interior a los sólidos de mayor tamaño.</i>
	Filtros banda	<i>Banda permeable que transporta los biosólidos hacia unos rodillos para ser aprisionados.</i>
Reducción de volumen por deshidratación	Filtro a vacío	<i>Se provoca un vacío en la superficie interior de un medio filtrante; el agua pasa a través del medio y los sólidos se depositan en la superficie exterior.</i>
	Filtro prensa	<i>Comprime los biosólidos en un contenedor contra una matriz.</i>
	Camas de secado	<i>Superficie al aire en que se provoca secado natural.</i>
Reducción de peso y volumen por secado	Instantáneo	<i>Pulverización de los biosólidos seguida de una exposición a gases calientes para finalizar con la separación de vapor y sólidos en un ciclón.</i>
	Horno rotativo	<i>Cámara rotativa en la que se ponen en contacto los biosólidos con gases calientes.</i>
	Horno de pisos múltiples	<i>Contacto a contracorriente de biosólidos pulverizados con aire caliente.</i>
Reducción de volumen con recuperación de energía	Horno de lecho fluidizado	<i>Fluidización de un lecho de biosólidos con una corriente ascendente de aire caliente captando la energía de los gases de salida.</i>
	Incineración con otros residuos (co-incineración)	<i>Mezcla de los biosólidos con otros residuos.</i>
	Oxidación vía húmeda	<i>Mezcla de los biosólidos con aire a elevadas presión y temperatura. Se aprovechan los gases de salida.</i>
	Reactor vertical de pozo profundo	<i>Los biosólidos se inyectan en un pozo a gran profundidad y gracias a la presión se alcanzan temperaturas muy elevadas.</i>
Estabilización	Estabilización con cal	<i>Incremento del pH por encima de 12 para evitar actividad biológica.</i>
	Tratamiento térmico	<i>Transformación en materia inerte (cenizas).</i>
	Compostaje	<i>Obtención de un producto orgánico estable con distintos usos posibles.</i>
Acondicionamiento	Acondicionamiento químico	<i>Con ayuda de sustancias químicas se mejoran las propiedades de los biosólidos.</i>
	Tratamiento térmico	<i>Empleo de procesos térmicos para modificar las características de los biosólidos.</i>
Desinfección	Pasteurización	<i>Supresión de patógenos a 70 °C durante 30 minutos.</i>
	Almacenamiento a largo plazo	<i>Se mantienen resguardados durante lapsos de 60 días a 20 °C ó 120 días a 4 °C.</i>

La trampa de condensación puede valerse de un ensanchamiento abrupto de la tubería para crear así una cámara de expansión que propicie el descenso de la temperatura y con ello la condensación del vapor de agua. Existen otras alternativas para la eliminación del vapor de agua que acompaña al biogás. Una de ellas consiste en colocar una válvula para el drenado del vapor condensado en el punto más bajo de la línea de conducción. Es recomendable colocar esta válvula lo más próxima al o los digestores, ya que de este modo el biogás saturado en humedad recorrerá menor distancia al interior del sistema de tuberías.

Apelando igualmente al fenómeno de condensación, el vapor de agua puede removerse por medio de la compresión y enfriamiento del biogás. Ocurre que al aumentar la presión, la capacidad del biogás para retener vapor de agua decrece, de tal forma que si se comprime un volumen dado de biogás saturado en humedad y luego de ello se disminuye su temperatura

hasta retomar el nivel inicial, la cantidad de agua excedente se condensará y podrá entonces eliminarse con facilidad.

Otra vía para el control de la humedad del biogás, es la adsorción⁵⁴ del vapor de agua en compuestos tales como óxido de aluminio (alúmina), carbón activado, bauxita, sales de sílica y silicatos, estos últimos en la forma de tamices o cribas moleculares. Si bien suelen ser sistemas de diseño poco complicado y operación sencilla, la principal limitante con la adsorción del vapor de agua yace en los sustantivos costos de inversión y mantenimiento (López, 1996).

Finalmente, la absorción⁵⁵, física y también química, del vapor de agua ofrece la posibilidad de tratar volúmenes considerables de biogás a costos relativamente modestos. En la absorción física se emplean solventes como glicoles, etilen, dietilen, trietilen y tetraetilen, aunque tienen un grado comparable de efectividad las soluciones concentradas de litio y sodio (López, 1996). En la absorción química se hace uso principalmente del óxido de calcio (CaO) como solvente (López, 1996). El mayor de los inconvenientes de los procesos de absorción reside en el empleo de solventes químicos que generan residuos tóxicos cuya disposición final tiende a ser problemática.

III.4.6.2 - Remoción del sulfuro de hidrógeno

Entre los principales problemas asociados al sulfuro de hidrógeno (H₂S) destacan su toxicidad y su efecto altamente corrosivo sobre tuberías y demás instalaciones en contacto directo y permanente con el biogás. Asimismo, cuando el H₂S se quema se liberan óxidos de azufre (SO_x). Al tiempo que corroen componentes metálicos, los SO_x son responsables puntuales del fenómeno adverso de la lluvia ácida.

Por tanto, la obligación de reducir al mínimo posible la presencia de H₂S en el biogás viene no tanto de cuestiones asociadas a una merma en sus propiedades combustibles, sino más bien por su acción corrosiva sobre las instalaciones y su nivel de toxicidad así como la de sus compuestos derivados. Cabe mencionar que la generación de H₂S no puede ser totalmente evitada, a no ser que el proceso de descomposición de suscite bajo condiciones aerobias (Díaz y col., 2010). Dado que ello no es posible en virtud de las condiciones que demanda la digestión misma, sólo queda remover el H₂S del biogás una vez que éste sea generado. La disminución del contenido de H₂S en el biogás es posible consumarla mediante diversos procedimientos. En algunos casos se utilizan sustancias absorbentes en fase líquida, mientras que en otros el H₂S es retirado con ayuda de absorbentes en estado sólido.

En los procesos de absorción acuosa se emplean diversos compuestos que una vez disueltos en agua son capaces de absorber de manera un tanto selectiva al H₂S. Dentro de las opciones disponibles para la absorción del H₂S por esta vía, destacan las soluciones elaboradas a partir

⁵⁴ La adsorción se refiere a la transferencia de un material en estado líquido o gaseoso a una superficie sólida a la cual se adhiere creando una capa denominada adsorbato. La adsorción puede ser física o química, dependiendo de la naturaleza de las fuerzas intermoleculares que mantienen unidos al adsorbato y al adsorbente. Si las fuerzas actuantes son las de Van der Waals, la adsorción es de tipo físico, pudiéndose superponer varias capas de adsorbato sobre la superficie del adsorbente. La adsorción química, por otra parte, implica una asociación del adsorbente con el adsorbato a nivel de electrones, ello limita a una sola la capa de adsorbato que puede depositarse sobre el adsorbente.

⁵⁵ La absorción es un fenómeno de separación en donde uno o más elementos en estado gaseoso, los cuales se consideran como solutos, se transfieren a un solvente. Se distingue tres variantes de absorción. Una es la absorción física con solvente líquido, en la cual no existe una interacción química entre soluto y solvente de manera que es posible separarlos a fin de reutilizar el solvente a lo largo del proceso. Otra es la absorción química con solvente líquido, que implica una reacción química del soluto con el solvente, siendo muy difícil recuperar el solvente para utilizarlo de nueva cuenta. Finalmente, la absorción química con solvente sólido, en donde igualmente el soluto y el solvente se combinan a nivel químico, lo que en algunos casos hace imposible la reutilización del solvente para una nueva corrida además de generar subproductos que demandan un manejo especial.

de ciertas variedades de compuestos tales como etanolaminas, carbonatos de sodio y potasio, hidróxidos, dióxidos de azufre, sulfatos férrico y de amoníaco (López, 1996). Muchos de los absorbentes previamente nombrados pueden regenerarse, ya sea con vapor de agua y aire o con gases inertes calientes. Sin embargo, existen también algunos que son difíciles de regenerar o bien no tienen posibilidad de serlo. Aunado a lo anterior, la mayoría de las soluciones usadas en la absorción acuosa del H_2S son costosas, al igual que el equipamiento indispensable para llevarla a cabo. Por tanto, esta vía de eliminación del H_2S es, en todo caso, una opción a considerar en complejos de producción de biogás a gran escala; para los de menor capacidad, en cambio, los procesos de absorción en seco son los más indicados (Walsh y col., 1988).

Por otra parte, los procesos englobados bajo el nombre genérico de absorción o desulfuración seca en donde, por ejemplo, el H_2S es absorbido por hidróxido de hierro (III) [$Fe(OH)_3$] u óxido férrico [Fe_2O_3], para transformarlo en sulfuro de hierro (FeS) y agua. En esta clase de procesos, el biogás se alimenta a baja presión y temperatura, entre 15 y 50° C, de preferencia saturado en humedad. Para la regeneración del hierro, que dicho sea de paso se trata de un proceso exotérmico, se debe permitir la entrada de aire al dispositivo donde se realiza la adsorción, o bien retirar y exponer al aire el material del lecho de absorción. Al hacer esto, azufre elemental se va depositando en la superficie del material absorbente, con lo cual va disminuyendo de manera progresiva su área efectiva de absorción. La regeneración del Fe_2O_3 puede efectuarse en promedio de 3 a 5 ocasiones, siendo necesaria la renovación del material absorbente luego de ese periodo (Walsh y col., 1988).

La adsorción sobre carbón activado constituye una más de las opciones para la remoción del H_2S . Conviene apuntar que este proceso reporta mejores resultados cuando se tiene oxígeno involucrado de por medio, pudiendo bastar aquel presente de forma natural en el biogás. Bajo ese supuesto, el carbón activado no sólo absorbe el H_2S , sino que además lo oxida, convirtiéndolo en azufre elemental (S). Para tal efecto, el biogás se hace circular a través de dos o más camas compactas de carbón activado. Cualidades del carbón activado como su notable relación superficie-volumen, su diversidad de tamaños de poro y la atracción que de forma natural ejerce sobre compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, son capitalizadas a la hora de remover el H_2S del biogás. En esta misma tónica, una eficiencia superior se consigue cuando el carbón activado se impregna con catalizadores que incrementan la velocidad de oxidación del H_2S a azufre elemental, el cual se va depositando sobre la superficie del carbón activado. Una vez saturado, el lecho de carbón activado puede ser regenerado con ayuda de gas caliente y vapor sobresaturado a temperaturas por encima de los 450° C, de no ser posible, debe reemplazarse el lecho viejo por uno nuevo.

Otra de las alternativas para plantas de pequeñas dimensiones, es la combinación química con zinc, no obstante, esta opción está restringida a aquellos casos en que la concentración de H_2S en el biogás sea particularmente baja. En este método, el H_2S reacciona con el óxido de zinc (ZnO) para producir sulfuro de zinc (ZnS) y agua. Por lo regular, el ZnO se encuentra en cartuchos, los cuales deben ser sustituidos de manera periódica.

Para la remoción del H_2S también está permitido usar tamices o cribas moleculares. En su forma más elemental, los tamices moleculares se valen de la interacción entre moléculas por causa de fuerzas electrostáticas asociadas a la polaridad de los enlaces que las mantienen unidas, o bien de la molécula misma. De esta manera, los tamices son capaces de remover de forma selectiva impurezas como el H_2S , agua y otras tantas que acompañan al biogás. Una vez saturados, la superficie de las cribas se regenera con vapor a alta temperatura, en torno de los 200 y 315° C.

Una técnica más para el retiro del H_2S es la desulfuración biológica, también conocida como biodesulfuración. Ésta consiste en la absorción en agua del H_2S el cual es luego asimilado biológicamente por microorganismos que tienen la capacidad de degradarlo y convertirlo en azufre elemental. Hay que mencionar que el proceso requiere un aporte de oxígeno, ya que se busca oxidar al H_2S . Dentro de las opciones que utilizan la biodesulfuración se encuentran los filtros percoladores y los lavadores biológicos, por citar dos ejemplos.

La reducción del contenido de H_2S puede llevarse a cabo, lógicamente, impidiendo en la medida de lo posible su formación durante el proceso mismo de digestión. Esto se consigue a través de un pre-tratamiento de la biomasa orientado a disminuir de forma drástica su contenido de azufre. Ello comprende la eliminación de los compuestos azufrados, como los sulfatos, o, ya dentro del digestor, las técnicas de precipitación del H_2S con sales de hierro y la utilización de sustancias que reduzcan la actividad de los microorganismos relacionados con la reducción de los compuestos de azufre (Díaz y col., 2010).

III.4.6.3 - Remoción del dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es, junto con el metano, de los componentes mayoritarios del biogás. La proporción del CO_2 en el biogás depende de multitud de factores, desde la composición de la materia orgánica a degradar, hasta la configuración y condiciones de operación del sistema anaerobio (López, 1996). La disminución o eliminación del CO_2 presente en el biogás puede conseguirse por medio de técnicas de absorción y adsorción, así como haciendo uso de membranas selectivas.

En cuanto a la absorción química del CO_2 , ésta se realiza con ayuda de solventes químicos, tanto sólidos como líquidos, siendo el óxido de calcio o cal viva (CaO) el solvente sólido más usado para este propósito. En tanto, los solventes líquidos más populares para la remoción del CO_2 del biogás son las soluciones formadas a partir de compuestos como hidróxido de sodio ($NaOH$), hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$], carbonato de sodio (Na_2CO_3) y carbonato de potasio (K_2CO_3). Los productos de la reacción de la solución con el CO_2 son agua y un carbonato o bicarbonato que depende del compuesto en solución. Debido a los requerimientos operativos y de mantenimiento ligados al proceso de regeneración de algunas de esas soluciones, la utilización de éstas como medio para la remoción del CO_2 se asume viable sólo en aquellas situaciones donde los volúmenes de biogás a tratar sean considerables (López, 1996). Dentro de inconvenientes asociados a la utilización de la absorción química del CO_2 , por igual con solventes sólidos y líquidos, el principal tiene que ver con las cantidades demandadas por unidad de biogás a tratar⁵⁶, junto con los problemas vinculados a la disposición de los subproductos generados.

Con relación a la absorción física del CO_2 , uno de los agentes útiles para este propósito es el agua, la cual asimismo tiene la habilidad de absorber al H_2S . No obstante, para ese fin se consumen grandes cantidades de agua, pese a elevar externamente la solubilidad del CO_2 . Por tanto, no es una opción recomendable para el acondicionamiento del biogás generado en digestores de pequeña y mediana escala.

En cuanto a la adsorción del CO_2 , cabe apuntar que ésta se efectúa haciendo pasar el biogás a través de cribas o tamices moleculares constituidos por materiales adsorbentes como carbón, zeolita natural y aluminosilicatos, por mencionar a los más destacados, los cuales poseen una estructura porosa selectiva que permite el tránsito de ciertas moléculas en razón

⁵⁶ López (1996) estima que el tratamiento de 1 m³ de biogás con 30% de CO_2 demanda 750 g de CaO . Evidentemente, si el contenido de CO_2 en el biogás es superior, los requerimientos estimados de CaO para llevar a cabo su remoción se verán modificados al alza.

de su tamaño, forma y polaridad. El empleo de cribas moleculares permite la obtención de biogás con porcentajes de metano de entre 91 y 99% en volumen (López, 1996).

Asimismo, existen membranas para la separación del CO₂, las cuales consisten en delgadísimas películas de polímeros como el acetato de celulosa o polisulfonato, colocadas de distintas maneras según convenga. Para su correcto funcionamiento, las membranas exigen que el biogás se suministre a presiones elevadas, típicamente entre 15 y 75 bar. A la salida de la membrana, el biogás exhibe una concentración de metano que puede llegar inclusive al 95% (López, 1996).

III.4.7 - Indicadores de desbalance del proceso

En general, un sistema anaerobio desbalanceado es aquel que registra un desempeño inferior al esperado bajo condiciones normales de operación (McCarty, 1964b). Para determinar si esto sucede, no basta con monitorear el comportamiento de un solo parámetro, es recomendable dar seguimiento al mayor número posible de variables de control para de esta manera dilucidar las probables causas de tal desequilibrio y plantear alternativas para remediarlo. Las señales más comunes que advierten una situación de desbalance en la operación de un sistema anaerobio son las siguientes (McCarty, 1964b):

a) Incremento en la concentración de ácidos grasos volátiles - La acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), producidos en fases intermedias de la DA, puede ser indicativo de una deficiencia cuantitativa o cualitativa en la población de microorganismos productores de metano, que vienen a ser los consumidores naturales de los AGV. Asimismo, una presencia excesiva de AGV se asocia también con un aumento extremo en el ritmo o volumen de alimentación con respecto a los valores regulares. Cabe apuntar, sin embargo, que una concentración alta de AGV por sí misma no es nociva, se trata más bien de una alerta que advierte sobre la existencia de un factor que perturba la actividad normal de las bacterias metanogénicas.

b) Descenso del pH - Consecuencia directa del aumento en la concentración de AGV en el medio en descomposición. El descenso en el pH debe ser frenado y revertido a la brevedad posible, ya que de proseguir, se produciría una afectación severa al sistema anaerobio difícil de resarcir.

c) Disminución en producción total de biogás - Puede llevar a suponer la presencia de sustancias tóxicas en concentraciones que resultan intolerables para las bacterias, en particular para las productoras de metano. Sin embargo, esta posibilidad es admisible sólo cuando tanto el régimen de alimentación como la generación de biogás se hayan venido dando de manera consistente.

d) Aumento en el contenido de CO₂ en el biogás - Una mayor presencia de CO₂ en el biogás se corresponde con un decremento en su porcentaje de metano, lo cual a su vez, se conecta con un desempeño deficiente, por razones como las arriba mencionadas, de los microorganismos productores del metano.

e) Disminución de la eficiencia - Como consecuencia del efecto combinado de los fenómenos adversos antes descritos, la eficiencia del sistema anaerobio comienza a menguar de manera notoria. La eficiencia del proceso de DA puede ser medida a través del volumen de metano producido por unidad de sólido volátil añadida, o bien, en términos de la presencia de estos últimos en el efluente residual, lo que es un claro indicativo del grado de estabilización conseguido de la materia orgánica sometida a DA.

De ser posible, deberá registrarse la evolución de todos los indicadores asociados a los escenarios de desbalance previamente expuestos. Sin embargo, la medición de la concentración de AGV por sí sola tiene mayor preponderancia (McCarty, 1964b), dada su enorme influencia sobre el resto de las situaciones anómalas de la DA.

Ahora bien, una vez que se tienen indicios que apuntan a que el sistema anaerobio está operando de manera inapropiada, se debe actuar para revertir esta situación lo antes posible. Así, podrá evitarse un deterioro severo del sistema en cuestión, que puede llegar inclusive a ser irremediable. A este respecto, McCarty (1964b) aconseja llevar a cabo una serie ordenada de cuatro pasos para contrarrestar una situación de desbalance en la DA: 1) Mantener el pH lo más neutro posible; 2) Identificar la probable causa del desbalance; 3) Corregir la causa del desbalance; y 4) Proseguir con el control del pH hasta que se tenga evidencia de que el sistema ha retornado a la normalidad. A manera de complemento, la Tabla III.10 presenta una lista de recomendaciones a tomar en cuenta para enfrentar y corregir una situación de desbalance en la operación de un sistema anaerobio.

Tabla III.10 – Recomendaciones para remediar una situación de desbalance en un proceso anaerobio
(Elaboración a partir de McCarty, 1964b)

Recomendación	Observaciones	Acciones a considerar	Tiempo de respuesta
Mantener el pH lo más neutro posible	<i>El incremento en la concentración de AGV reduce drásticamente el pH del medio.</i>	Reducir el ritmo de alimentación del digestor. <hr/> Utilizar sustancias neutralizantes (hidróxido de calcio, bicarbonato de sodio, otros).	Días o semanas
Identificar y corregir la causa del desbalance	<i>Lo que provoca el desbalance puede ser de naturaleza temporal o prolongada. Un desbalance temporal puede ser consecuencia de cambios súbitos en las condiciones de operación. En tanto, un desbalance prolongado resulta de, por ejemplo, la entrada de sustancias tóxicas, una caída abrupta del pH o una población insuficiente de bacterias metanogénicas al momento del arranque del sistema.</i>	Para sortear un desbalance temporal, se recomienda dar tiempo suficiente para la aclimatación de las bacterias. <hr/> Si se atribuye a la presencia de sustancias tóxicas, éstas deberán ser removidas o controladas. Si no se detectan sustancias tóxicas, la caída del pH puede ser corregida con un control de pH.	Semanas a meses
Proseguir con el control del pH hasta que el sistema retorne a la normalidad	<i>Es necesario continuar con el control del pH puesto que el sistema aún no tiene la capacidad para regularlo por sí mismo.</i>	Moderación en la alimentación del digestor. <hr/> Utilizar sustancias neutralizantes (hidróxido de calcio, bicarbonato de sodio, otros).	Semanas a meses

III.4.8 - Ventajas e inconvenientes

De manera recurrente, la DA se contrasta con los procesos aerobios para el tratamiento de la biomasa residual húmeda, incluida por supuesto la FORSU. Aunque por lo regular ambos procesos se emplean de manera conjunta para lograr un tratamiento cabal y efectivo de la

materia orgánica. No obstante, la selección de uno u otro proceso quedará en función del volumen y características de la biomasa a tratar. También deberán tomarse en cuenta los objetivos que se persiguen con el tratamiento, sea la depuración, la estabilización, el reciclado de nutrientes o la obtención de energía.

Las bondades de los procesos anaerobios están sustentadas mayormente en la biología de los microorganismos involucrados en la degradación de la biomasa. Así, debido a su lento ritmo de reproducción, se generan menos microorganismo por unidad de materia orgánica tratada. De ahí que, en principio, los lodos digeridos de la DA se encuentren más estabilizados y su disposición no resulte demasiado problemática. A lo anterior se añade el hecho de que su demanda de nutrientes a base de nitrógeno, fósforo y potasio, principalmente, es modesta en términos generales, lo hace prescindir del aporte externo de los mismos.

En contraste con los procesos aerobios, los sistemas anaerobios poseen una mayor capacidad para degradar la materia orgánica presente en el flujo entrante de sustrato. Esto quiere decir, en términos simples, que tienen la habilidad de procesar a mayor velocidad cantidades sustantivas de materia biodegradable y con un porcentaje de remoción comparable al alcanzado en los más eficientes tratamientos aerobios (Díaz, 2010).

Probablemente, el atractivo de mayor peso de los procesos anaerobios consiste en la obtención del biogás. Como ya fue dicho, el biogás es una mezcla gaseosa donde el metano es uno de sus principales constituyentes, condición que lo convierte en un subproducto con aplicaciones energéticas muy diversas, desde suministro directo de energía térmica, hasta generación de energías motriz y eléctrica. A menudo se señala como otra de las grandes ventajas de la DA el hecho de que prescinde de la aireación permanente del sustrato, lo cual repercute en el consumo de energía de la instalación donde se lleve a cabo. Sin embargo, conviene precisar que el proceso de la DA también demanda energía para distintas tareas en cantidades que pueden llegar a ser considerables. Estas tareas comprenden la preparación misma del sustrato a degradar, su bombeo, mezclado y calentamiento, así como el funcionamiento normal de los reactores, que pueden contar con sistemas de calentamiento y agitación. Si bien, lo que a menudo sucede es que estos requerimientos queden compensados con el volumen de producción y el subsecuente aprovechamiento energético del biogás.

En relación a los inconvenientes de la DA, debe señalarse que dada la lentitud con que proliferan los microorganismos, en especial las bacterias que sintetizan el metano, la puesta en marcha de todo sistema anaerobio requiere un tiempo considerable, varios meses como mínimo. Asimismo, las distintas familias de microorganismos implicados en la DA son extremadamente sensibles a cambios en las condiciones de operación. En este punto como en el anterior, las bacterias metanogénicas son las más perjudicadas con las modificaciones en los parámetros de funcionamiento de la DA. Asimismo, todas las especies de microorganismos son afectadas, inhibidas e inclusive aniquiladas por diversos compuestos inorgánicos a partir del instante en que éstos alcanzan ciertas concentraciones. En el momento en que ingresa aire al tanque de digestión, como puede suceder por razones de mantenimiento, el proceso anaerobio también se interrumpe, si bien puede reanudarse sin mayores complicaciones una vez extraído el aire u oxígeno.

Para que la digestión se lleve a cabo en tiempos corto, se requieren temperaturas de operación por arriba de los 35°C, esto es, en la parte alta del rango mesofílico o dentro de los límites termofílicos. Esta situación que conlleva, no obstante, un consumo importante de energía, y con ello el encarecimiento de los sistemas. No se debe pasar por alto el hecho de que la composición y características de la biomasa a tratar, tienen un peso significativo en la viabilidad y rentabilidad de los procesos anaerobios. En este punto conviene apuntar que

tratándose de biomasa residual muy diluida, la DA no es una alternativa económicamente viable (Price y Cheremisinoff, 1981). Para determinar la viabilidad del tratamiento anaerobio y la recuperación de energía mediante el biogás generado, es pertinente tener presente factores como los a continuación listados (Price y Cheremisinoff, 1981):

- a) La cantidad, disponibilidad y características de la biomasa a ser tratada.
- b) La logística implícita en el aprovechamiento de dicha biomasa.
- c) Las necesidades de pre-tratamiento de la biomasa, por ejemplo frente a la existencia de materiales tóxicos.
- d) El tipo, número y configuración apropiada de los reactores anaerobios, sus consumos energéticos y de otros insumos.
- e) Los procesos de post-tratamiento para estabilizar y valorizar los efluentes de la digestión.
- f) La generación esperada de biogás, su volumen y composición así como los requerimientos de los procedimientos para remover sus principales impurezas.
- g) La aceptación o rechazo social.
- h) La disponibilidad de capital para construir, operar y dar mantenimiento a las instalaciones que resulten necesarias.

III.6 - Tecnologías para la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Desde hace ya cerca de medio siglo se han venido desarrollando y perfeccionando los procesos y las tecnologías para la DA de la FORSU. Gracias a ello, la DA se consolida como opción para el tratamiento de múltiples clases de desechos materiales, maximizando la recuperación y el reciclaje de buena parte de sus componentes. De manera paralela, la DA cobra relevancia en el terreno de las fuentes renovables de energía, cuya utilización constituye una reacción ante las limitaciones y los efectos adversos derivados del uso desmedido de los energéticos fósiles convencionales.

Las tecnologías actualmente disponibles a nivel comercial para el tratamiento anaerobio de la FORSU se enlistan en la Tabla III.11. El surgimiento de estas tecnologías partió desde las etapas de ciencia básica y de la realización de pruebas en laboratorios. Se continuó luego con la construcción y la operación de plantas a nivel prototipo. De ahí se pasó a la puesta en marcha de los primeros complejos comerciales para el tratamiento anaerobio de la FORSU, mismos que entraron en operación a principios de la década de los 90's del siglo pasado. El progreso a sido tal, que hoy día, en términos industriales, la DA de residuos sólidos, FORSU incluida, es percibida como una tecnología madura (Riggie, 1998). A este respecto, conviene mencionar algunas cifras que dan cuenta de la aceptación creciente de la DA como opción para el tratamiento de la biomasa residual y la obtención de biogás. Se tiene registro de un aumento de casi 10 veces de la capacidad instalada mundial para el tratamiento de la FORSU en una sola década. En efecto, se pasó de 122,000 t/año en 1990, a más de 1,000,000 t/año a comienzos del año 2000, con un ritmo de expansión promedio de 150,000 t/año en los últimos cinco años de dicho periodo (De Baere, 2000).

Tabla III.11 – Parámetros de operación relevantes de las tecnologías comerciales para el tratamiento anaerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
(Elaboración a partir de Ostrem y Themelis, 2004)

Tecnología	Materia prima	Condiciones de operación	Configuración	Pre-tratamiento	Producción específica de biogás Nm ³ /t _{substrato}
<i>Kompogas</i>	FORSU separada de origen	-Digestión termofílica -23-28% ST -15-20 días TRH	Reactor horizontal con accionamiento tipo flujo pistón	Separación de contaminantes y reducción de tamaño	100
<i>Valorga</i>	-FORSU -RSU mezclados	-Digestión mesofílica y termofílica -25-32% ST -18-25 días TRH	Reactor vertical con accionamiento tipo flujo pistón	Eliminación de componentes no biodegradables	80-160
<i>BTA</i>	-RSU mezclados -FORSU separada de origen	-Digestión mesofílica -<15% ST -12-17 días TRH	Procesos de una o dos etapas	Eliminación de componentes no biodegradables y reducción de tamaño	85-95
<i>Dranco</i>	FORSU Separación mecánica y de origen	-Digestión termofílica -20-50% ST -20 días TRH	-Reactor vertical con accionamiento tipo flujo pistón y alimentación continua -Una etapa	Retiro de materiales no biodegradables	100-200

En la gran mayoría de las planta pioneras en el ámbito de la digestión de la FORSU, la DA de esa biomasa residual se llevaba a cabo de manera conjunta con algún otro tipo de desechos orgánicos, entre los que se cuentan subproductos pecuarios y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Con el correr del tiempo ha sido posible entender con mayor profundidad el fenómeno de la digestión, y hacerse de los medios científicos y técnicos para tratar individualmente a la FORSU, obtenida ya sea por separación de origen o por segregación mecánica en una instalación centralizada. Lo anterior, sumado a la configuración y condiciones de operación particulares de cada tecnología, dan como resultado tasas de producción específica de biogás de distinta magnitud. En general, las plantas donde se lleva a cabo el tratamiento anaerobio de la FORSU operan, en proporciones prácticamente iguales, en condiciones mesofílicas, 60% del total de plantas instaladas a nivel mundial, y termofílicas, 40% de esa cifra (De Baere, 2000). En cambio, la digestión de la FORSU en el rango psicrófilico, en ocasiones denominada digestión fría, no figura de momento en el panorama global, no al menos en plantas de gran capacidad como las existentes en número importante en los países desarrollados.

CAPÍTULO IV

PLANEACIÓN Y DISEÑO DE LA PLANTA PROTOTIPO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Tal como se mencionó en el capítulo precedente, mediante el tratamiento anaerobio es posible degradar, en principio, cualquier tipo de materia orgánica. No obstante, este proceso es mucho más eficiente y económico si dicha materia exhibe una biodegradabilidad rápida. En este sentido, muchas de las formas de biomasa residual, tanto líquida como sólida, no sólo cumplen con ese requisito, sino que ofrecen ventajas adicionales. Se trata de materia de desecho que bien puede catalogarse como un pasivo ambiental. Su tratamiento oportuno y adecuado reporta beneficios a la población y al entorno, al tiempo que su costo de adquisición es mínimo y en muchos casos nulo.

Dentro de la biomasa residual sólida, destaca la utilización en procesos anaerobios de los desperdicios agrícolas, pecuarios, industriales, de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) (Chernicharo, 2007). La FORSU despierta mucho interés como materia prima para procesos anaerobios tanto por su abundancia, como porque reúne características físicas y químicas que en cierta forma favorecen dichos procesos y, por ende, la síntesis de biogás. Asimismo, al someter a la FORSU a un tratamiento como el de tipo anaerobio, se evitan las graves problemáticas ambientales y de salud pública derivadas de su disposición incorrecta.

En los párrafos subsecuentes se describe el proceso teórico-experimental que tuvo como propósito esbozar las bases generales para la planeación y el diseño de una planta a nivel prototipo para la obtención de biogás. Este combustible resulta de la descomposición anaerobia de la porción orgánica de los residuos sólidos que se generan diariamente en un restaurante localizado al interior del *campus* central de la UNAM. La Figura IV.1 detalla las principales actividades correspondientes a cada una de las distintas fases en las que se decidió dividir el proceso de desarrollo de la mencionada planta de biogás. El proceso se inicia con la identificación y selección del restaurante de donde procederían los residuos sólidos orgánicos para alimentar al sistema anaerobio. A continuación, el registro de la generación de residuos y su caracterización orientada a la medición de propiedades físicas y químicas que revisten importancia para el tratamiento anaerobio. Ambas tareas constituyen la fase que tuvo a bien llamarse de planeación de la planta de biogás. Luego sigue la etapa de diseño, la cual comprende desde el planteamiento del procedimiento para la obtención del sustrato de

alimentación, hasta el cálculo de la inversión inicial necesaria y los indicadores de rentabilidad. La determinación de la capacidad y características adecuadas para la unidad de tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos, es parte esencial en la etapa de diseño junto con la configuración y especificaciones de los sistemas para el manejo y el suministro del biogás. La construcción de la infraestructura necesaria así como la colocación y conexión de los distintos componentes que conforman la planta, fueron objeto de la última fase de su proceso de desarrollo. Esta fase, que naturalmente recibió el nombre de fase de instalación, será abordada no en este capítulo, sino en el siguiente. Durante todo el proceso fue necesaria, pero a la vez esclarecedora, la consulta de bibliografía a fin de dotarlo de mejor y mayor sustento.

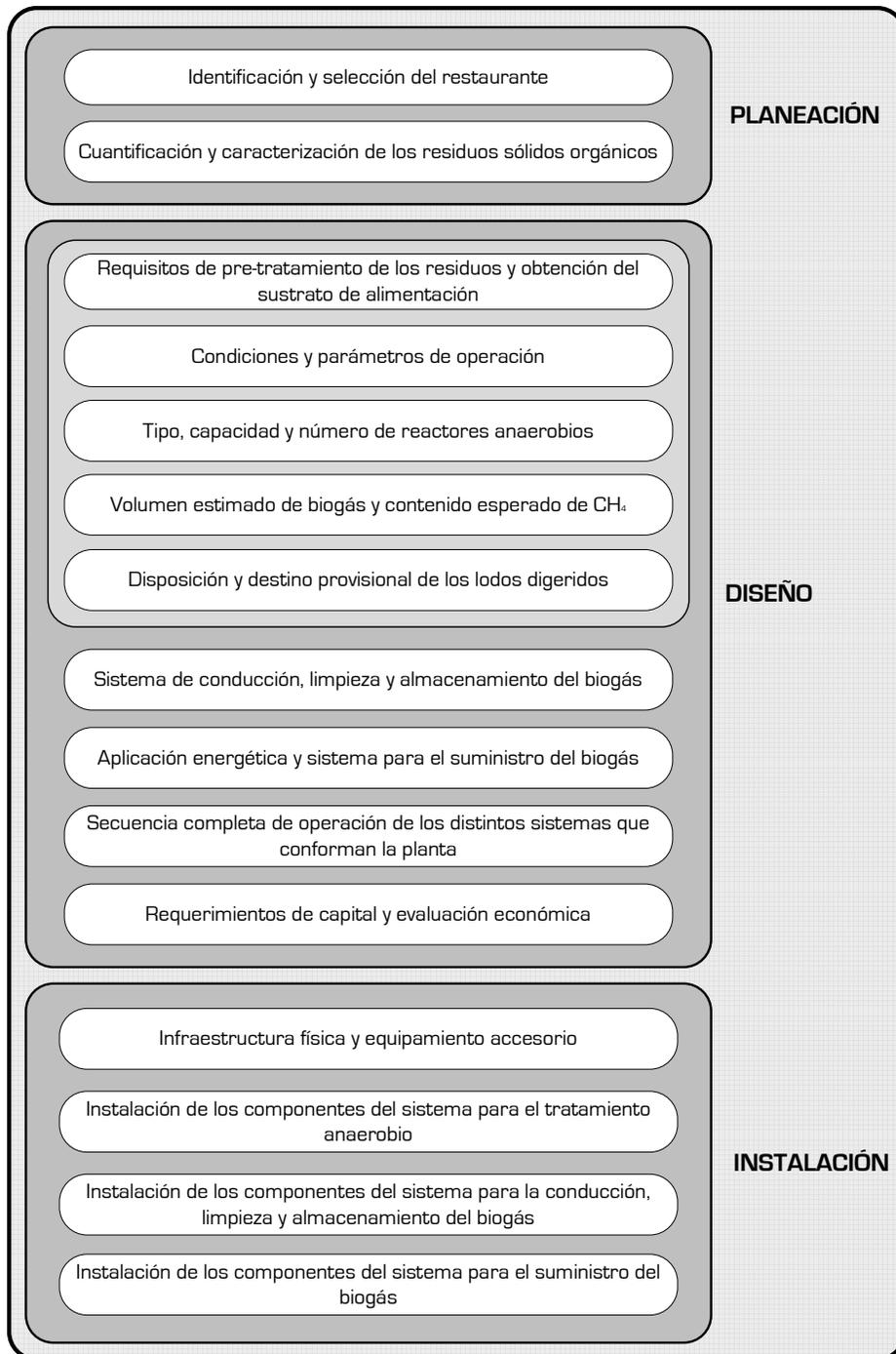


Figura IV.1 – Actividades comprendidas en las distintas fases del desarrollo de la planta de biogás

IV.1 - Procedencia de la biomasa

El restaurante seleccionado para proveer la biomasa residual fue el que lleva por nombre *Cibarium*, adscrito formalmente a la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Figura IV.2). La elección de dicho establecimiento responde al hecho de que, además de su vínculo institucional con la FI-UNAM, es uno de los más concurridos dentro de toda Ciudad Universitaria (C.U.) (Juárez, 2009). De ahí que su nivel de generación de residuos sólidos orgánicos producto de sus actividades rutinarias sea considerable. Los desechos proceden esencialmente de la preparación de los alimentos que se expenden en el restaurante, así como de los sobrantes que de los mismos acostumbrar dejan los comensales.



Figura IV.2 - Vistas del restaurante seleccionado

Otro elemento a favor de dicha elección, es el hecho de que los residuos son segregados de origen, esto es, desde el momento mismo en que son depositados en los cestos de basura. Gracias a ello se facilita su procesamiento en el marco de un tratamiento anaerobio, a la vez que hace prever atractivos resultados en términos de volumen de producción de biogás (Cecchi y col., 2002). No obstante, la segregación no es del todo efectiva. Cantidades importantes de residuos orgánicos se encuentran íntimamente mezclados con materiales no biodegradables cuya eliminación se anticipa complicada, dado su tamaño, número y por la diversidad de la misma. Convendría entonces insistir a futuro en la importancia de la correcta separación de los residuos como una práctica cotidiana y permanente a observar tanto de parte de los empleados del establecimiento como, con mayor énfasis, en su clientela.

IV.1.1 - Generación estimada

La generación diaria de tales residuos se registró durante un periodo de cerca de 2 meses, con la intención de observar su comportamiento y disponer de un valor medio de generación que fungiera como referente para cálculos posteriores. De esta manera, la Figura IV.3 muestra las cantidades diarias de residuos sólidos orgánicos (RSO) generadas en el comedor a lo largo de 7 semanas, que representan 42 días en el entendido de que el establecimiento opera normalmente 6 días por semana. Es importante aclarar que en el sitio se genera una cantidad mayor de RSO, pero se decidió excluir ciertos residuos en virtud de que algunas de sus características fisicoquímicas no los hacen candidatos idóneos para el proceso anaerobio, en especial en las fases iniciales del mismo.⁵⁷

⁵⁷ Por esta razón, no se contabilizaron residuos orgánicos como las cáscaras de naranja y las cortezas de la piña. La acidez característica de tales residuos se convertiría en un serio inconveniente en el momento de pretender estabilizar el pH del sustrato de alimentación y del medio en descomposición, el cual debe estar próximo a neutro (pH = 7). Desperdicios como los huesos también se excluyeron debido a la complicación que supone su trituración. Por otra parte, los residuos consistentes

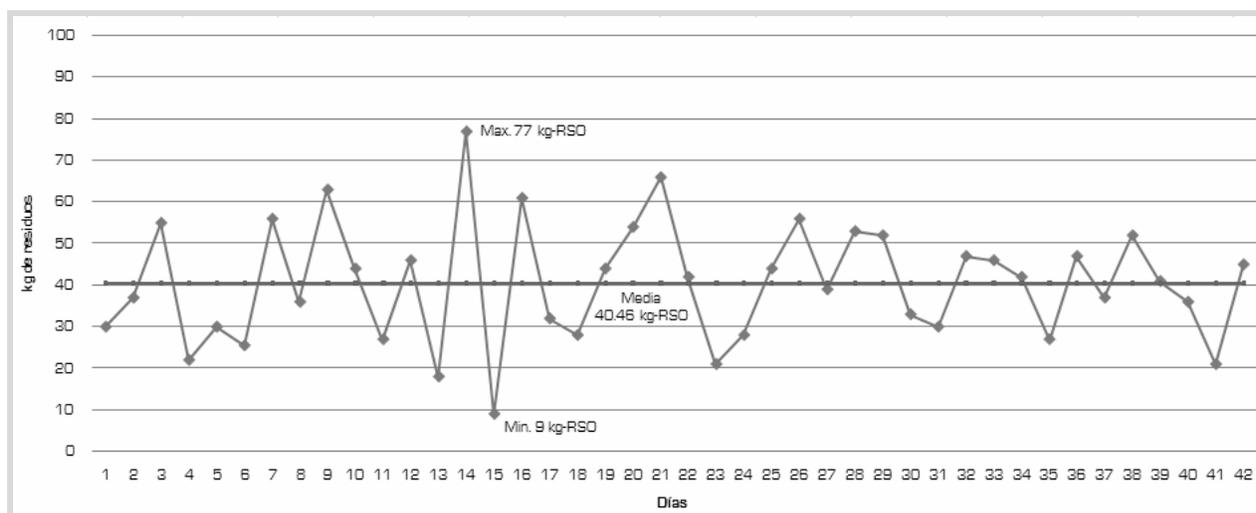


Figura IV.3 - Comportamiento de la generación de residuos sólidos orgánicos en el caso de estudio

Tomando en cuenta lo antes mencionado, el nivel medio de generación resultó de 40.46 kg-RSO/día, con un valor máximo de 77 kg-RSO/día y un mínimo de 9.0 kg-RSO/día, en tanto que la desviación estándar fue de 14.35 kg-RSO/día, el cual es un valor alto que manifiesta la notoria variabilidad de la generación diaria de RSO, tal como se constata en la Figura IV.3. Esta situación podría tener consecuencias durante la operación del sistema, puesto que los procesos anaerobios son particularmente sensibles a cambios en su régimen de alimentación, tanto desde el punto de vista cuantitativo como cualitativo. Para sortear este inconveniente valdría la pena analizar la posibilidad de fijar como máximo un volumen de RSO a procesar, que sea a lo más igual al volumen diario promedio de generación de RSO. De esta manera se tendría mayor oportunidad de mantener un nivel constante de alimentación.

IV.1.2 - Características fisicoquímicas relevantes

Con la finalidad de determinar la aptitud de cualquier tipo de materia orgánica biodegradable para ser tratada por la vía anaerobia, es indispensable conocer algunas de sus características físicas y químicas que son de especial interés en el ámbito de la degradación anaerobia. La valoración preliminar de dichas características es de suma importancia, puesto que tiene repercusiones en cuestiones técnicas, operativas y económicas. Así, por ejemplo, se tendrán las bases para justificar la elección de un determinado tipo de proceso, los materiales y capacidades de los equipos y sus accesorios. Además, se identificarán las necesidades de pre-tratamiento, los volúmenes tentativos de influente y efluentes y el nivel de generación, la composición y las prestaciones energéticas del biogás.

En ese contexto, resulta especialmente valioso conocer la concentración en la biomasa de los compuestos orgánicos susceptibles de ser degradados. Como se recordará, el proceso anaerobio se acelera cuando dichos compuestos orgánicos son de fácil descomposición. De manera que prácticamente cualquier microorganismo anaerobio es capaz de desintegrarlos, aun sin una fase previa de adaptación. En cambio, tratándose de los denominados sustratos complejos, en donde predomina materia orgánica de difícil degradación, se debe conceder a las colonias bacterianas contenidas en el inóculo, un periodo de aclimatación. Esto con la finalidad de permitir que se repliquen y establezcan los microorganismos aptos para degradar

en carne fue descartados por su importante contenido de nitrógeno, precursor de un diversos de compuestos inhibidores del proceso anaerobio.

dichos compuestos. También hay que atender la existencia de compuestos orgánicos inertes, los cuales son resistentes a la acción biológica promovida por los procesos anaerobios.

Para caracterizar a los residuos del restaurante, se tomó diariamente una muestra representativa de los mismos durante un periodo de 2 semanas (lunes a sábado) (Figura IV.4). Las pruebas realizadas, de acuerdo a las metodologías aplicables en la materia⁵⁸, abarcaron la determinación de la densidad, pH, contenido de Sólidos Totales (ST), de Sólidos Totales Volátiles (STV) y de Sólidos Totales Fijos (STF) (Tabla IV.1).⁵⁹ Estos tres últimos parámetros son los que definen, para el caso de biomasa sólida, el contenido de materia orgánica del residuo y, por ende, su potencial como materia prima para un proceso anaerobio. Gran parte del contenido de STV son los compuestos biodegradables susceptibles de ser consumidos y transformados por los microorganismos anaerobios. Son los compuestos a partir de los cuales se sintetiza el metano y el resto de los componentes habituales del biogás. De ahí que entre más alto sea el contenido de STV, mayores posibilidades hay de generar cantidades sustantivas de biogás.



Figura IV.4 - Selección de muestras representativa para la ejecución de pruebas

Las diferencias que se aprecian en los resultados responden lógicamente y esencialmente a cambios en la composición del residuo. Así, por ejemplo, en las muestras donde predominaban los desechos de frutas y vegetales, el porcentaje de ST disminuye debido al alto contenido de agua de esos desechos. Por otro lado, las muestras con mayor presencia de residuos secos, como pan, tortilla y pastas, exhiben valores más elevados de concentración de ST. No obstante, cabe apuntar que la dispersión de los valores aquí obtenidos no es tan pronunciada como ocurre con el nivel de generación de residuos. Esto sin duda constituye una ventaja al asegurar un cierto grado de uniformidad en el contenido de materia orgánica del sustrato que se tiene previsto emplear en el proceso anaerobio.

⁵⁸ Para la preparación de las muestras y la determinación del pH se consultaron las Normas Mexicanas NMX-AA-052 y NMX-AA-25, respectivamente. Para la medición del contenido de ST, STV y STF se siguieron los procedimientos establecidos en APHA (1995).

⁵⁹ Los sólidos totales (ST) aluden al contenido de materia seca, tanto orgánica como inorgánica, de una muestra determinada. En tanto, los sólidos totales volátiles (STV) o simplemente sólidos volátiles (SV), son la porción de materia sólida que puede ser oxidada y volatilizada al exponerla a una temperatura de 550° C; básicamente se trata de la porción orgánica de los ST. La porción restante de los ST corresponde a la materia inorgánica o inerte, y constituye los sólidos totales fijos (STF) o sólidos fijos (SF).

Tabla IV.1 - Valores obtenidos en la caracterización de la biomasa

Parámetro	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo	No. de eventos	Desviación estándar
Densidad, kg/m ³	715.41	1,090.54	459.52	12	194.33
pH	5.74	6.49	3.77	11	0.97
%ST	22.96	32.66	13.18	24	6.36
%STV con respecto a los ST	94.21	96.30	92.32	24	1.18
%STF con respecto a los ST	5.79	7.68	3.70	24	1.18

La media del contenido de ST fue de 22.96%, valor que está dentro del rango reportado para los residuos de comida acopiados en cafeterías, que comprende de 21.4 a 27.4%, con un valor típico de 25.6% [Cecchi y col., 1997]. El promedio correspondiente a los STV, como porcentaje de los ST, fue de 94.21%, que también está dentro del intervalo reportado que va de 91.3 a 99.7%, con un valor típico de 96.5% [Cecchi y col., 1997]. En tanto, se encontró que el pH de los residuos tiende a ser ácido. Ello obligaría a adicionar sustancias alcalinas durante el pre-tratamiento de los residuos a modo de neutralizar dicha acidez antes de que ingresen al sistema anaerobio para así no alterar drásticamente el pH del medio en descomposición. Tales sustancias alcalinas siempre deberán ser las mismas para usar en el control del pH al interior de los digestores (véase Capítulo III).

Hubiese sido deseable extender del periodo de muestreo y caracterización de los residuos a cuando menos un año. De esta manera la valoración de las características y del volumen de generación de los residuos hubiese arrojado resultados más fidedignos, a la par de robustecer del acervo de datos para futuras referencias. Además, habría permitido observar la influencia de factores de lenta incidencia, como los cambios estacionales, que pueden afectar tanto el nivel de generación como la composición de los desechos. No obstante, aun cuando las muestras recavadas no fueron muy numerosas, los valores antes presentados constituyen una estimación aceptable de la cantidad y características de los residuos. Es información útil y suficiente para establecer las bases generales de diseño y configuración de los elementos de un sistema anaerobio para el tratamiento de los residuos y conversión energética del biogás.

IV.1.3 - Preparación y características de la alimentación del sistema anaerobio

En la búsqueda por hacer más eficiente el proceso de digestión, es práctica común someter a los RSO a una fase de pre-tratamiento. Al término de esta fase se obtiene el sustrato que ingresa al reactor anaerobio para dar inicio a su proceso de descomposición anaerobia. Para el caso aquí reportado, el pre-tratamiento comprende la eliminación, en un inicio de forma manual, de los componentes no deseados como plásticos, madera, metales y vidrio. Asimismo, se prevé el retiro de aquellos residuos que pese a ser de tipo orgánico, de momento no se considera pertinente su incorporación en el proceso de tratamiento anaerobio. Luego de ello se procede a una reducción de tamaño mediante trituración, al tiempo que se añade agua en la cantidad necesaria para lograr la concentración adecuada de ST. Por último, se registra, y de ser preciso se neutraliza, el pH del sustrato obtenido a modo de dejarlo en un valor lo más cercano a 7.

Para la preparación del sustrato de alimentación, se optó por la modalidad de digestión húmeda, esto es, un %ST en el sustrato inferior a 15%. La razón de esta decisión responde fundamentalmente a consideraciones de carácter técnico (Tabla IV.2). Un sustrato con un contenido no muy elevado de ST se maneja con relativa facilidad al tiempo que existe mayor oferta de equipos de costo accesible para trabajar con un sustrato de tal consistencia. Así pues, a fin de determinar la proporción residuos:agua con la cual obtener un porcentaje de ST adecuado para la digestión húmeda, se llevaron a cabo pruebas de cuantificación de ST.

Dichas mediciones se efectuaron a diversas mezclas preparadas con distintas cantidades de agua y residuos. Los resultados obtenidos de tales pruebas se presentan en la Tabla IV.3.

Tabla IV.2 - Rasgos distintivos de la modalidad de digestión húmeda
(Vandevivere y col., 2002)

Ámbito	Ventajas	Desventajas
<i>Técnico</i>	Es una modalidad que tiene su origen en procesos técnicamente maduros (estabilización anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales)	-Parte del sustrato entrante puede permanecer en el reactor tan sólo una fracción del TRH de diseño (cortocircuito) -Aglomeración de la materia flotable y sedimentación de la más densa -En ocasiones se torna difícil el pre-tratamiento de la biomasa
<i>Biológico</i>	Disminución de la concentración de sustancias inhibitoras gracias a la disolución con agua	-Pérdidas de materia orgánica durante el pre-tratamiento -Si un compuesto inhibitor ingresa al reactor, se disemina con gran rapidez
<i>Económico y ambiental</i>	-Los equipos apropiados para el manejo del sustrato son de menor tamaño y más asequibles en contraste con los de digestión seca	-Consumo de agua para la dilución del sustrato -Reactores por lo general de grandes dimensiones

Tabla IV.3 - Concentración de sólidos totales en mezclas con distintas proporciones residuos:agua

RSO:H ₂ O	Valor promedio %ST	Valor máximo %ST	Valor mínimo %ST	No. de eventos	Desviación estándar, %
1:1	12.40	16.57	7.64	7	3.19
1:1.5	9.35	11.09	5.94	7	1.87
1:2	8.21	11.21	4.90	7	2.31
1:2.5	6.40	8.25	3.65	7	1.61

De acuerdo con las cifras obtenidas, la mezcla preparada en la proporción 1:1 es la más indicada para la elaboración del sustrato. En las otras mezclas el porcentaje de ST resulta sumamente bajo. Sobre todo si se considera el hecho de que ya dentro del reactor anaerobio, existe un efecto diluyente debido al inóculo, lo que se traduce en una disminución del contenido de ST pudiendo tener repercusiones negativas en la síntesis de metano (McCarty, 1964b). Aunado a ello, en tales mezclas el contenido de agua es mayor, lo que supone un consumo más alto de agua y la necesidad de contar con reactores anaerobios de mayor volumen.

Entonces, si se elige la proporción 1:1 para la obtención del sustrato de alimentación, con los 40.46 kg/día de residuos orgánicos generados en promedio se tendrían en torno de 69.16 L/día de sustrato.⁶⁰ Su concentración de ST sería cercana a 0.1342 kgST/L [13.42% de ST] y de STV de 0.1265 kgSTV/L [12.65% de STV].⁶¹ Por tanto, en función de la disponibilidad de diaria de sustrato, al sistema anaerobio ingresarían 9.29 kgST/día, que representan a su vez 8.75 kgSTV/día (Tabla IV.4). Contrario a que ocurriría con mezclas más diluidas, la concentración de ST al interior del digestor con el sustrato preparado en la proporción 1:1 estaría en torno del 8%, previendo la disminución que acarrea la incorporación del inóculo.

⁶⁰ Considerando una densidad del sustrato de alimentación igual a 1,170 kg/m³.

⁶¹ Cifras calculadas con base en los valores obtenidos durante la fase de caracterización de los residuos (véase Tabla IV.1).

Tabla IV.4 – Preparación y características de la alimentación del sistema anaerobio

Características del sustrato de alimentación				Disponibilidad diaria para alimentación	
Preparación: Proporción RSO:H ₂ O	Volumen producido	Concentración de ST	Concentración de STV	Cantidad de ST	Cantidad de STV
1:1	0.0691 m ³ /día	134.2 kgST/m ³	126.5 kgSTV/m ³	9.29 kgST/día	8.75 kgSTV/día

IV.2 - Consideraciones para el diseño del sistema anaerobio

Una de las consideraciones a tomar en cuenta para la implementación de un proceso anaerobio de biomasa residual, consiste en definir si se prioriza la optimización de la estabilización de la materia orgánica, o bien se maximiza la producción de biogás. La estabilización de los residuos orgánicos puede ser entendida como la destrucción de gran parte de sus compuestos biodegradables. Este proceso se inserta pues más claramente en la lógica de un esquema para el manejo integral de la materia orgánica residual. Con la estabilización de la biomasa residual se mitiga muchos de sus nocivos efectos sobre el ambiente y le otorga cualidades específicas para un proceso o aplicación posterior.

Por otra parte, la producción de metano aparece vinculada a la generación, aprovechamiento e inclusive comercialización de un recurso energético con múltiples aplicaciones posibles. Sin embargo, puesto que tanto la estabilización de la materia orgánica como la síntesis de biogás están estrechamente relacionadas, se antoja plausible atender simultáneamente ese par de objetivos. Esto quiere decir lograr un nivel óptimo de producción de metano en conjunto con una remoción considerable del contenido orgánico de los desechos.

Cabe apuntar, además, que el factor que incide mayormente en el cumplimiento de tales objetivos, es la composición de la biomasa a tratar [García-Heras, 2002]. En este sentido, el potencial de la FORSU depende en alto grado de su procedencia, por ejemplo, si se obtiene de un proceso de segregación mecánica o de una recolección con separación de origen. En este último caso, el potencial de producción de biogás es sobresaliente en comparación con el reportado para la FORSU separada por medios mecánicos [Cecchi y col., 2002].

Sin embargo, si la cantidad de biomasa disponible no es cuantiosa, como aquí ocurre, el volumen de biogás a que podría dar lugar es limitado, lo que achica sensiblemente su espectro de aplicaciones viables. En todo caso, para contar con un aproximado razonablemente aceptable del nivel de generación de biogás, conviene establecer primero algunos lineamientos preliminares en relación a las condiciones del entorno y a los parámetros de corte operativo del proceso.

IV.2.1 - Temperatura de operación

Como se subrayó en el capítulo anterior, la temperatura es uno de los factores que más influencia tienen sobre el desempeño del tratamiento anaerobio. Entre otras cuestiones, incide en la subsistencia y expansión de las poblaciones bacterianas, así como en la ejecución de los un buen número de los procesos fisicoquímicos relacionados con las distintas etapas de la digestión. Conviene recordar, también, que la producción de metano por vía microbiológica puede darse en un intervalo amplio de temperaturas, que comprende desde los 0° hasta los 97° C [Chernicharo, 2007].

Para el caso aquí a discusión, se pretende que la digestión de los residuos orgánicos suceda a temperatura ambiente, deseando sacar provecho de la no tan baja temperatura que predomina espacial y temporalmente en la Ciudad de México. Otra razón que motivó esta elección radica en simplificar al máximo el sistema anaerobio, a la vez de evitar los costos de inversión y de operación y mantenimiento que implicarían dispositivos para modificar y regular a voluntad la temperatura al interior del digestor. Lo anterior, considerando la producción modesta de biogás que se pronostica, encarecería el costo de la energía eventualmente obtenida a través de dicho combustible. Entonces, para la ejecución de los cálculos involucrados en el diseño del sistema anaerobio, la temperatura de digestión se fijará en 20° C, un valor típico que se registra en la zona centro del país (SMN, 2012).

Partiendo de lo antes estipulado y atendiendo a la nomenclatura de los diversos rangos de temperaturas, el proceso anaerobio podrá acontecer tanto en la porción superior del rango psicrófilico (5 a 20 °C), como en límite inferior del mesófilico (20 a 40 °C). Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que en casos esporádicos la temperatura se acerque al valor óptimo del intervalo mesófilico, que está en dentro de los 30 a 35 °C. Aunque difícilmente perdurará dicha temperatura más allá de algunas horas. En consecuencia, se asumirá que la temperatura de operación del sistema anaerobio se ubicará la mayor parte del tiempo en el rango psicrófilico.

IV.2.2 - Reactor anaerobio

El volumen o capacidad efectiva⁶² del reactor anaerobio que se precisa para la digestión, está en función del criterio adoptado para su determinación. Básicamente existen dos criterios, si bien de alguna manera están correlacionados entre sí. El primero de ellos fija un parámetro de diseño denominado tiempo de residencia hidráulico (TRH), en tanto que el segundo, hace lo propio con otra variable llamada velocidad de carga orgánica (VCO).

IV.2.2.1 - Criterio del tiempo de residencia hidráulico

El tiempo de residencia hidráulico (TRH) expresa el tiempo que idealmente el sustrato permanece en el interior del reactor anaerobio para que ocurra su descomposición. El TRH se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$THR = \frac{V}{Q} \quad \dots(IV.I)$$

Donde:

V: Volumen del digestor, m³

Q: Flujo esperado de sustrato, m³/día

Así entonces el TRH queda expresado en días. El inverso del TRH se conoce como la carga hidráulica volumétrica (CHV) e indica la cantidad de sustrato, en m³, aplicada por unidad de volumen del reactor en un tiempo dado. La CHV se determina con la siguiente expresión:

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad \dots(IV.II)$$

⁶² La capacidad útil o de trabajo de un reactor anaerobio se define sencillamente como el volumen que toma para sí el medio en descomposición (sustrato y microorganismos). La capacidad total del reactor debe considerar un volumen adicional, entre 15 y 25% de la capacidad efectiva, el cual se deja libre a fin de mantener siempre despejadas las salidas por donde se evacua el biogás.

El criterio consiste entonces en establecer un TRH acorde con la naturaleza del sustrato y la temperatura a la que se prevé se llevará a cabo el proceso. Ese valor de TRH luego se multiplica por el flujo Q para obtener así el volumen estimado V del reactor. Para el buen desempeño del proceso anaerobio es crucial seleccionar un TRH apropiado. Éste debe ser tal que garantice que tanto el porcentaje de remoción de materia orgánica, como la producción de metano se encuentren dentro de rangos satisfactorios. Para la selección del TRH es posible recurrir a modelos matemáticos que intentan describir, explicar y predecir el fenómeno de la descomposición anaerobia. Igualmente válido es el conocer de experiencias previas reportadas en torno al diseño de digestores en condiciones análogas de operación y materia prima. En cualquier caso, de lo que se trata es de allegarse información que oriente en la elección del valor apropiado del TRH.

IV.2.2.2 - Criterio de la velocidad de carga orgánica

La velocidad de carga orgánica (VCO) se define como la cantidad de materia orgánica aplicada o suministrada al sistema por unidad de volumen del digestor en un tiempo dado, usualmente un día. La fórmula para la obtención de la VCO se muestra a continuación:

$$VCO = \frac{Q \cdot S_0}{V} = \frac{S_0}{TRH} \quad \dots[IV.III]$$

Donde:

Q: Flujo esperado de sustrato, m³/día,

S₀: Concentración de materia orgánica, kgST/m³, kgSTV/m³, kgDQO/m³ ó kgDBO/m³

V: Volumen del digestor, m³.

De esta forma la VCO queda indicada en términos de kgST/m³_{reactor}·día, kgSTV/m³_{reactor} ·día, kgDQO/m³_{reactor} ·día ó kgDBO/m³_{reactor} ·día. Una vez que se ha seleccionado la VCO adecuada en función del tipo de sustrato, las condiciones de operación y el rendimiento esperados, y conociendo con anterioridad Q y S₀, es posible entonces estimar el volumen V del digestor. La ecuación (IV.III) también muestra la relación que existe entre la VCO y el TRH, lo que revela la comunión entre los dos criterios aquí discutidos someramente. Esto permite que sea posible fijar tanto un TRH como una VCO, para luego definir la S₀ correspondiente, o al contrario, definir S₀ para conocer el TRH.

A menudo se establece como un lineamiento de diseño que el criterio que debe adoptarse para la estimación del volumen del reactor anaerobio depende de la concentración de materia orgánica en el sustrato o influente a tratar. Así, para influentes con muy baja concentración de materia orgánica se recomienda seguir el criterio del TRH. En tanto, para influentes con una concentración de materia orgánica de moderada a alta, la sugerencia es recurrir al criterio de la VCO. En vista de lo anterior, en este caso se empleará el criterio de la VCO para la estimación del volumen del digestor.

Como ya se dijo, un elemento de suma importancia a tener presente en el diseño de sistemas anaerobios es la temperatura a la que sucederá el proceso de digestión. Para el caso aquí analizado, el sistema se tiene previsto que opere a temperatura ambiente, lo que supone una digestión predominantemente en condiciones psicrófilas (5° a 20° C). Ahora bien, a diferencia de lo que sucede con la digestión mesófila y termófila, la digestión en condiciones psicrófilas ha sido estudiada a detalle con menor frecuencia. Entre las razones que podrían explicar esta preferencia, está el hecho de que la digestión mesófila y termófila ostentan ventajas en términos de carga orgánica admisible y volumen de los reactores. Así pues ha habido mucho mayor interés por profundizar en su entendimiento y en su implementación

práctica. En cambio, la digestión psicrófila ha recibido menor atención, no sólo en lo que respecta al tratamiento de la FORSU sino de otras clases de biomasa residual potencialmente apta. Por fortuna, existe información proceden de algunas investigaciones realizadas sobre ciertos tipos de materia orgánica de desecho que puede arrojar luz sobre los parámetros operativos idóneos para la digestión en condiciones psicrófilas de la FORSU.

Sutter y Wellinger (1988) reportaron que la producción neta de biogás para un digestor que trabaja con residuos pecuarios y que opera a 20° C con TRH de 40 a 50 días, es equiparable a la correspondiente a un digestor en condiciones mesófilas pero con un TRH hasta 50% menor. Asimismo, Heukelekian (1933) y Maly y Fadrus (1971), de manera independiente, señalan que para el rango de temperaturas de entre 10° y 50° C, las diferencias en temperaturas de operación pueden compensarse a través de ajustes en el TRH. De tal forma que el volumen de biogás generado de la descomposición anaerobia de una cantidad dada de materia orgánica sea el mismo en ambos casos.

Derivada de una propuesta metodológica para el diseño de lagunas anaerobias psicrófilas para el tratamiento de diversos efluentes pecuarios, Safley y Westerman (1990) introdujeron una ecuación que relaciona las cargas orgánicas de digestores que operan a distintas temperaturas. Los investigadores parten de la ecuación de van't Hoff-Arrhenius, empleada muy a menudo en la predicción del rendimiento de procesos biológicos a distintas temperaturas. De ella deducen una expresión para estimar la carga orgánica en condiciones psicrófilas tomando como referencia datos conocidos de digestores operando en otros rangos de temperatura. La carga orgánica así determinada permitirá, en principio, que en un ambiente psicrófilo se alcance la misma razón de producción específica de metano (B, m³CH₄/kgSTV) que se registra bajo las condiciones de referencia. La expresión antedicha se muestra a continuación:

$$\frac{VCO_2}{VCO_1} = \exp\left[\frac{E(T_2 - T_1)}{RT_1T_2}\right] \quad \dots\text{[IV.IV]}$$

Donde:

VCO₁, VCO₂: Velocidad de carga orgánica a una temperatura dada, kgSTV/m³_{reactor}·día

T₁, T₂: Temperatura absoluta, K

E: Constante de energía de activación, 15,175 cal/mol (Ashare y col., 1977)

R: Constante de gas ideal, 1.987 cal/K·mol

Es importante precisar que para hacer uso de la ecuación anterior se estipulan un par de condicionantes. Primero, una concentración de STV de baja a moderada en el influente, y segundo, un TRH prolongado (por arriba de 20 días). De manera complementaria, los mismos investigadores dan cuenta de una segunda expresión surgida de suposiciones en torno a un estado estacionario. Esta segunda ecuación de igual modo cumple con el cometido de aproximar la carga orgánica en función de la temperatura de operación del digestor:

$$\frac{VCO_2}{VCO_1} = e^{p(T_2 - T_1)} \quad \dots\text{[IV.V]}$$

En la expresión de arriba, el término *p* es una constante cuyo valor se ha estimado en 0.1° C⁻¹, esto para el intervalo de temperaturas de 10° a 30° C (Henze y Harremoos, 1983). Como bien lo destacan Safley y Westerman (1990), en ambas ecuaciones está implícita la necesidad de reducir la carga orgánica. Ello conlleva necesariamente un aumento en el TRH, en cierta medida proporcional al descenso previsto en la temperatura de digestión. De esta manera se logra asegurar un desempeño satisfactorio del sistema anaerobio y, lo que puede

resultar más importante en caso de que el sistema esté pensado para suministrar energía a través del biogás, conservar la tasa de producción específica de metano.

Si bien las ecuaciones anteriores son utilizadas para estimar los parámetros de digestores que tratan desechos pecuarios, no parece existir objeción mayor a emplearlas para el mismo propósito pero referidas ahora al tratamiento de la FORSU. Cabe decir que al igual que las excretas de animales, la FORSU es considerada una variante más de residuos orgánicos complejos. Dicho lo anterior, la utilización de las ecuaciones anteriores precisa de valores de referencia a partir de los cuales estimar un valor de velocidad de carga orgánica para condiciones psicrófilas. En la Tabla IV.5 se muestran los principales parámetros operativos reportados para distintas instalaciones que emplean FORSU como materia prima. De ellos, los valores que se elegirán son los correspondientes a la planta piloto de la Universidad de Venecia, Italia. Dicha planta se alimenta con la componente orgánica de los residuos sólidos urbanos seleccionada de forma manual, siendo ésta una similitud a destacar con el caso aquí abordado (Tabla IV.6).

Tabla IV.5 – Parámetros operativos de plantas que emplean la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
(Elaboración a partir de Cecchi y col., 1988)

Instalación	Materia prima	Tipo de reactor anaerobio	%ST en el sustrato	Velocidad de carga orgánica, kgSTV/m ³ -día	Tiempo de residencia hidráulico	Tasa de producción específica de biogás, m ³ /kgSTV
Planta comercial en Bellaria, Italia	FORSU y lodos de PTAR	2 digestores convencionales de 850 m ³ c/u	11 -12	8	Mínimo 10 días	0.38*
Planta piloto en Broni, Italia	FORSU y lodos de PTAR	Digestor de 2,000 m ³	10.7 (7-8% dentro del digestor)	5	10 días	0.43-0.53
La Buisse, Francia (Valorga)	FORSU	Diseño híbrido: flujo-pistón y de mezcla completa (mesofílico)	35	13.7	15 días	0.35 (65% CH ₄)
Planta piloto de la Universidad de Ghent, Bélgica, y Arbios SA (DRANCO)	RSU seleccionados en planta	Flujo-pistón vertical (mesofílico)	25-35	15	12-18 días más 2-3 días en post-digestor	n.d.
KWU-Fresenius, planta piloto en Alemania	RSU seleccionados en planta	Reactor con tornillo de mezclado	40	10	10 días	0.5 (60% CH ₄)
Planta piloto proceso BIOMET, Suecia	RSU seleccionados en planta	Convencional de 20 m ³ (13.6 m ³ volumen de trabajo)	7-10	1.6	27 días	0.51 (57% CH ₄)
Planta escala laboratorio de la Universidad de Louvain, Bélgica	RSU seleccionados manualmente	Mezcla completa (mesofílico)	3-5.6	4	14-20 días	0.35 m ³ CH ₄ /kgSTV
Planta piloto de la Universidad de Aix Marseille, Francia	RSU separados en planta	Flujo-pistón (termofílico)	25-40	3.9-18.8	8-30 días	0.2- 0.4 (60% CH ₄)
Planta piloto de la Universidad de Venecia, Italia	FORSU seleccionada manualmente	Mezcla completa (mesofílico)	6.4	2.1-6.9	9-25 días	0.65 (56-63 %CH ₄)
Planta escala laboratorio de Warren Spring Laboratory, R.U.	RSU separados en planta	Mezcla completa (mesofílico)	10.4-66	2.9-3.9	16-100 días	0.43-0.46 (60-65% CH ₄)

*Valor calculado con base en la información reportada en Cecchi y col. (1988).

Tabla IV.6 - Especificaciones del digestor y condiciones de operación de la planta piloto de la Universidad de Venecia, Italia
(Cecchi y col., 1986)

Tipo de sustrato	Tipo de digestor	Volumen del digestor, m ³	Tiempo de residencia hidráulico, días	Temperatura de digestión, ° C
Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos seleccionada manualmente	Reactor anaerobio continuo de mezcla completa	3.0	9 - 25	35±2
Velocidad de carga orgánica, kgSTV/m ³ ·día	Tas de producción específica de CH ₄ , m ³ /kgSTV	Razón de producción de biogás, m ³ /m ³ _{reactor} ·día	Contenido de CH ₄ en el biogás, %	Remoción de STV, %
2.1 - 6.9	0.39	1.3 - 3.6	56 - 63	63 - 69

Se emplearán, entonces, como referencia los valores de 35° C en temperatura de digestión y en velocidad de carga orgánica 6.9 kgSTV/m³·día, la más elevada a fin de limitar el volumen del reactor que de por sí resultará de gran tamaño. La temperatura T_z se establece en 20°C. Las VCO calculadas con las ecuaciones (IV.IV) y (IV.V) resultan de 1.94 kgSTV/m³·día y 1.54 kgSTV/m³·día, respectivamente. De nueva cuenta, se optará por la más alta ya que supone un volumen menor del reactor anaerobio. Con la VCO seleccionada, 1.94 kgSTV/m³·día, y los valores de Q, 0.06916 m³/día, y S₀, 126.5 kgSTV/m³, el volumen del reactor anaerobio resulta de 4.51 m³. En consecuencia, el TRH estimado es de 65 días, un tiempo bastante largo (Tabla IV.7). Aunque, el largo TRH puede favorecer la producción de biogás y la remoción de materia orgánica en las circunstancias psicrófilas que se tienen previstas.

Tabla IV.7 - Condiciones y parámetros de operación preliminares del sistema anaerobio

Temperatura de digestión, T	Flujo esperado de sustrato, Q	Concentración de STV en el sustrato, S ₀	Velocidad de carga orgánica, VCO	Volumen estimado de reactor anaerobio, V	Tiempo de residencia hidráulico, TRH
20° C	0.0691 m ³ /día	126.5 kgSTV/m ³	1.94 kgSTV/m ³ ·día	4.51 m ³	65 días

Luego, asumiendo la utilización de inóculo por un total de hasta 30% del volumen antes citado, el reactor anaerobio deberá tener una capacidad de trabajo no menor a 5.86 m³. De modo que será suficiente con un volumen efectivo de alrededor de 6.0 m³. Es importante mencionar que tal requerimiento no necesariamente debe cubrirse con un único reactor, es posible contar con dos o más conectados en serie hasta totalizar el volumen deseado. La configuración propuesta va ese sentido, emplear dos digestores conectados entre sí para que en conjunto sumen un volumen de 6.0 m³.

Dicho esquema se asemejaría entonces a un sistema anaerobio de dos etapas, es decir, aquel en el que las fases de la digestión acontecen en dos reactores distintos. Habitualmente en el primer reactor las condiciones están dadas para acelerar la hidrólisis, la acidogénesis y la acetogénesis. Mientras, en el segundo reactor se procura mantener un entorno favorable para las bacterias productoras de metano las cuales para ello transforman el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono. En este segundo reactor se recomienda que el TRH sea más largo que aquel para el reactor de la primera etapa. Esto con el fin de permitir que las bacterias metanogénicas completen el proceso de conversión de los compuestos intermedios, que como ya se ha dicho es una labor lenta y delicada. El mayor TRH en el segundo digestor se traduce en un volumen superior al del digestor de la primera etapa.

Para el sistema anaerobio en diseño, se propone que el primer reactor (R-I) sea del tipo semi-continuo de mezcla completa con agitación mecánica por medio de aletas y un volumen útil de 1.25 m^3 (1.45 m^3 volumen total) (Figura IV.5). Este reactor será el primero en recibir los residuos orgánicos tan pronto como concluya su fase de pre-tratamiento. Ello supone que en R-I se desarrollarán las fases de hidrólisis y, al menos parcialmente, la acidogénesis. Para desempeñar esas funciones el tipo seleccionado de reactor es el adecuado, ya que los reactores de mezcla completa son elegidos la mayoría de las veces para efectuar procesos de hidrólisis (Bolzonella y col., 2005).

El R-I contará con salidas para el muestreo del medio a distintas alturas, mismas que podrán utilizarse también para la colocación de instrumentos de medición para la lectura de la temperatura y el pH, por ejemplo. Los orificios de entrada y salida del sustrato dispondrán de "cuellos de ganso" como medio para evitar en la medida de lo posible el *cortocircuito* del influente. En la parte inferior del R-I se localizarán dos salidas, éstas de mayor diámetro, para purga y limpieza del reactor. Asimismo, se le instalará una mirilla para observar el aspecto del medio en descomposición, una característica además de enorme valor didáctico. Una vez lleno, el efluente del R-I se depositará en un segundo reactor (R-II) con el que estará comunicado.

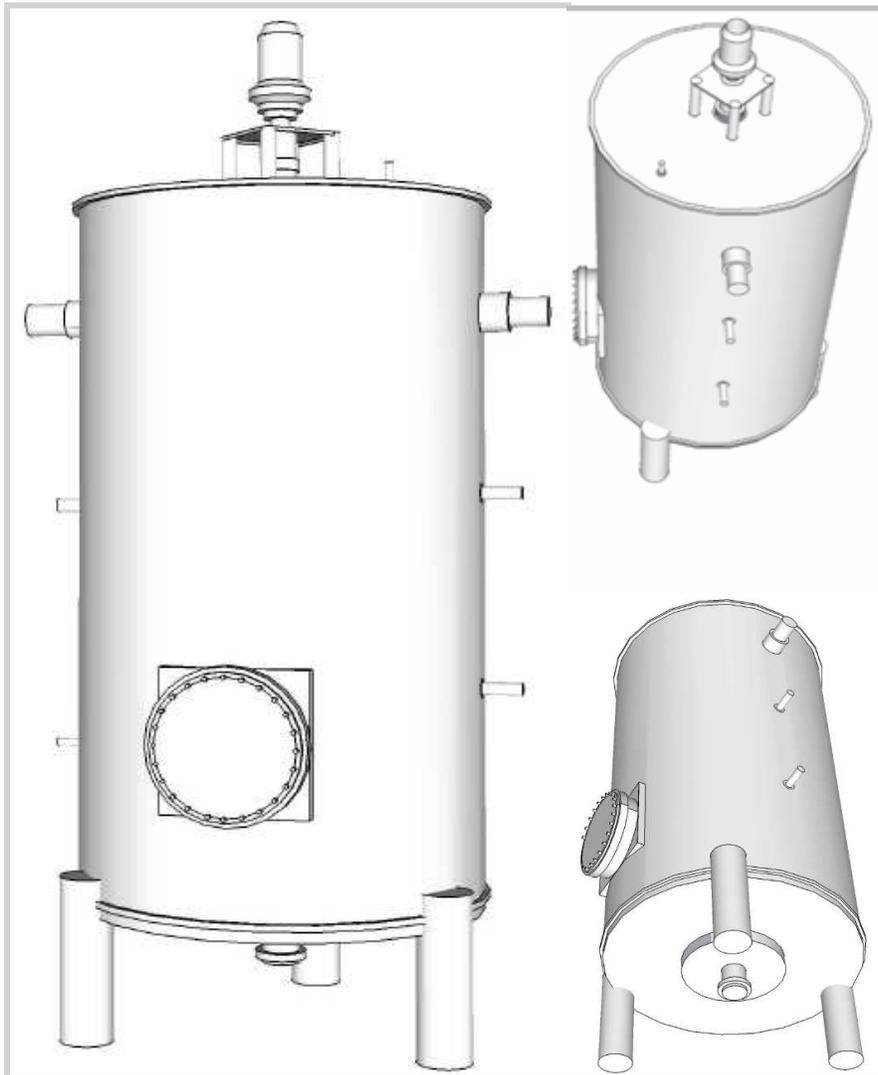


Figura IV.5 - Diferentes vistas preliminares del reactor R-I (El dibujo no está a escala)

Para el segundo reactor (R-II) se propone uno del tipo convencional con una capacidad de trabajo de 5.0 m³, un punto de muestreo en su base y también con “cuellos de ganso” en la entrada y salida principales (Figura IV.6). Para homogeneizar el medio en descomposición en este reactor se empleará una bomba externa que lo recirculará, por los conductos de entrada y salida, el tiempo necesario de acuerdo al gasto nominal de la bomba. Tanto este reactor como el primero no tendrán mecanismos especiales para retención de biomasa (microorganismos), lo cual es de suponer que se compense sin problemas con el prolongado tiempo de residencia. En R-II culminará la descomposición anaerobia de los residuos, con la consecuente producción de biogás con un importante contenido de metano. El volumen comparativamente mayor de R-II respecto del de R-I asegura un TRH más largo, aumentando las probabilidades de conseguir una tasa específica de producción de biogás (m³_{biogás}/kgSTV) más próxima al valor límite.

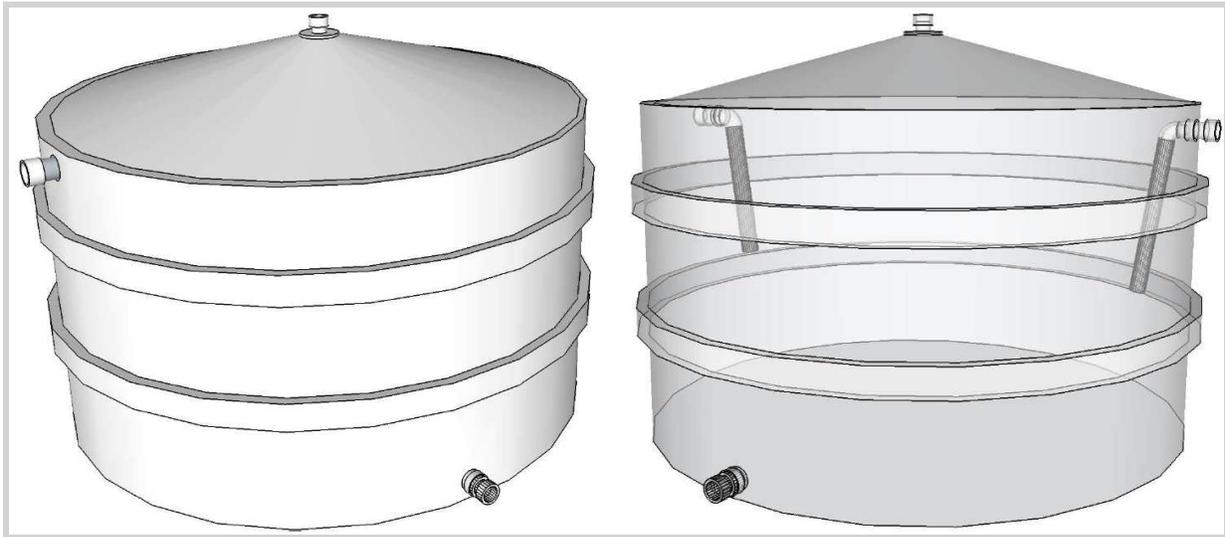


Figura IV.6 – Diferentes vistas preliminares del reactor R-II (El dibujo no está a escala)

Uno de los rasgos distintivos de los sistemas anaerobios de dos o más etapas es el establecimiento de condiciones de operación diferenciadas en cada uno de los reactores. Ello con la intención de fomentar la actividad de colonias microbianas específicas partícipes en la digestión. En esta lógica, se seleccionan los valores de variables como temperatura, pH y velocidad de mezclado en concordancia con los recomendados para crear un entorno idóneo para la actividad de las bacterias y su diseminación. No obstante, esta condición no la cubriría del todo la configuración aquí propuesta, ya que ambos reactores operarán formalmente en idénticas condiciones. A este respecto, la temperatura, por ejemplo, que es una variable de enorme influencia en las diferentes fases de la digestión, será la misma para los dos reactores.

No obstante, podrán presentarse divergencias en los valores de pH entre ambos reactores. El reactor R-I al tener un menor volumen, condiciona el tiempo de permanencia del sustrato a sólo una fracción del TRH de diseño (65 días), con lo cual lograrán completarse las primeras etapas de la digestión, hidrólisis y acidogénesis. Ésta última provocaría un descenso en el nivel de pH debido a la síntesis y acumulación de ácidos orgánicos. En cambio, en el reactor R-II, de mayor capacidad y, por consiguiente, mayor TRH, los ácidos serán consumidos íntegramente por las bacterias metanogénicas, colocando el pH del medio en un valor cercano a neutro. De suceder así, el sistema sí podría ser catalogado como una configuración de dos etapas, aun cuando otras variables operativas no difieran significativamente entre los dos reactores.

IV.2.3 - Producción de biogás

Existe un parámetro que especifica el volumen de metano, o bien biogás, que se obtiene de la descomposición anaerobia de materia orgánica en condiciones adecuadas a un TRH infinito, esto es, cuando los microorganismos han consumido ya toda la cantidad posible de compuestos biodegradables presentes de inicio en el sustrato. Este parámetro, que además es independiente de la temperatura, se conoce con los nombres de producción última de metano o potencial último de biodegradación, y se simboliza con la literal B_0 . El rango de valores de B_0 reportado en la literatura para el caso de los residuos orgánicos provenientes de los desechos sólidos urbanos es de 0.45 - 0.49 $m^3CH_4/kgSTV_{destruido}$, es decir, 0.81 - 0.89 $m^3_{biogás}/kgSTV_{destruido}$, asumiendo un porcentaje de metano de 55% (Cecchi y col., 2002).

Si bien el volumen de metano o biogás que se obtiene en realidad de un digestor en funcionamiento no es igual a B_0 . El volumen producido es una fracción de B_0 cuyo magnitud varía con las condiciones de operación del sistema, la naturaleza y facilidad de descomposición del sustrato, el tiempo de residencia, entre otros factores. En este sentido, la influencia del tiempo de residencia es notoria, pues a medida que éste sea más largo, la producción de biogás, puesta en términos de $m^3CH_4/kgSTV_{destruido}$ (producción específica de metano), tenderá a aproximarse a la B_0 . Lo anterior se corrobora al analizar la siguiente expresión (Mata-Alvarez, 2002):

$$PEM = \frac{B_0}{1 + \frac{1}{k \cdot TRH}} \quad \dots[IV.VI]$$

Donde:

PEM: Producción específica de metano, $m^3CH_4/kgSTV_{destruido}$

B_0 : Producción última de metano, $m^3CH_4/kgSTV_{destruido}$

k: Constante cinética de primer orden, 1/día

TRH: Tiempo de residencia hidráulico, días

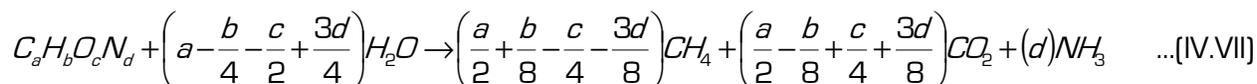
Como se ha venido insistiendo, el TRH está estrechamente relacionado con la temperatura de digestión. Ello se debe a que la cinética de las reacciones englobadas en la descomposición anaerobia se ve favorecida con una temperatura elevada.⁶³ De manera que aun con TRH cortos pero bajo altas temperaturas, es plausible lograr niveles considerables de producción de biogás, aunque con una composición cambiante. Mientras que a temperaturas bajas, las reacciones suceden en general con mayor lentitud, lo que obliga a incrementar el TRH. De esta manera puede conservarse el nivel de generación de biogás y también la eficiencia del proceso anaerobio.

Existen múltiples métodos para estimar la generación de biogás, o en particular de metano, resultante de la degradación anaerobia de una cantidad dada de biomasa. A este respecto, enseguida se expone un procedimiento para calcular la cantidad teórica de metano extraíble de residuos orgánicos sobre la base de su composición química aproximada. Asimismo, como un segundo método, se emplea el valor de la producción específica de metano reportada para la planta de biogás cuyos parámetros de operación se eligieron como referentes (Tabla IV.6). De este modo podrá estimarse la cantidad de biogás que se pronostica obtener de manera regular luego de la entrada en operación de la planta de biogás.

⁶³ La cinética de las reacciones se refiere las velocidades con las cuales ocurren los procesos que dan origen a los productos a partir de los reactivos, así como el efecto que sobre dichos procesos tienen variables físicas como temperatura, luminosidad, concentraciones, entre algunos otros.

IV.2.3.1 - Estimación de la producción de metano a partir de la composición química del residuo

Un método que permite calcular la cantidad de metano que resultaría de la descomposición anaerobia de materia orgánica biodegradable, se basa en la composición química del sustrato. A partir de esta información se determina la máxima cantidad estequiométricamente⁶⁴ obtenible de metano, como uno y muchas veces el principal de los constituyentes del biogás. Para tal propósito, se recurre a la siguiente ecuación química [Campos y col., 2005]:



El término $C_aH_bO_cN_d$ simboliza la fórmula química aproximada o empírica del sustrato orgánico biodegradable que fungirá como materia prima para la digestión. En el caso de biomasa residual como la FORSU, formada esencialmente por sobrantes de comida, para comenzar se necesita la composición elemental promedio de la mezcla de materiales en ella presentes. Esta información permite determinar luego el equivalente en número de átomos de C, H, O y N representados en los subíndices del término $C_aH_bO_cN_d$. Para tal efecto, se emplearán los valores asentados en la Tabla IV.8, que corresponden a las proporciones típicas en que se encuentran los elementos antes mencionados en los residuos de comida.

Tabla IV.8 - Composición elemental típica de los residuos de comida
(Reinhart, 2004)

Residuos de comida	% en peso (base seca)						
	Humedad	C	H	O	N	S	Cenizas
	70.0%	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0

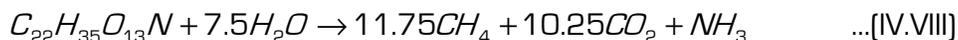
Ahora, partiendo de una masa inicial de 1 kg, la fórmula química empírica de los residuos de comida se deduce siguiendo los pasos a continuación descritos:

- a)** Se obtiene la masa seca de la muestra, restando de la masa inicial el contenido de humedad. Puesto que en este caso la humedad se supone del 70%, el contenido de materia seca es del 30%, esto significa que hay 0.3 kg de materia seca en un 1 kg de residuos.
- b)** Para determinar las cantidades de C, H, O, N, S y cenizas presentes en los 0.3 kg de materia seca se utilizan las concentraciones porcentuales que aparecen en la Tabla IV.6. Los valores que así resultan son: C, 0.144 kg; H, 0.0192 kg; O, 0.1128 kg; N, 0.0078 kg; S, 0.0012; cenizas, 0.015 kg.
- c)** Las cantidades expresadas en kg se dividen entre la masa atómica de cada elemento para determinar el número equivalente de átomos. Las cifras así obtenidas quedan como sigue; C, 12 mol; H, 19.2 mol; O, 7.05 mol; N, 0.55 mol; S, 0.0375 mol.
- d)** Finalmente, para hallar la fórmula química aproximada (con agua y sin azufre), las moles previamente calculadas se normalizan tomando como base el elemento presente en menor cantidad, excluyendo al S, que en este caso es el N. Las moles de cada elemento se dividen entre el número de moles de N para de este modo obtener

⁶⁴ La estequiometría en las reacciones químicas se refiere a las proporciones en las cuales los reactivos, elementos o compuestos, forman productos.

los subíndices de la fórmula aproximada. Llevando a cabo lo antes mencionado, la fórmula química empírica de los residuos de comida es $C_{22}H_{35}O_{13}N$.

Sustituyendo la fórmula química antes encontrada en la expresión (IV.VII) se llega a lo siguiente:



Por tanto, observando los coeficientes estequiométricos, por cada mol de residuo de comida, cuya masa molecular aproximada es de 521 g/gmol, se obtiene un máximo teórico de 11.75 mol de CH_4 , esto es 188 g de CH_4 . Haciendo uso de la ecuación de gas ideal, los 188 g de CH_4 representan 0.278 m³ de CH_4 a condiciones normales.⁶⁵ La tasa máxima de producción de CH_4 por kg de residuo (materia seca) es entonces de 0.534 m³ CH_4 /kgST asumiendo un contenido de humedad en los residuos del 70%. Con tales cifras y teniendo presente que se producen en promedio 40.46 kg/día de residuos con un porcentaje de ST de 22.96%, el volumen máximo de CH_4 que de acuerdo con la estequiometría de la reacción podría obtenerse de su desintegración anaerobia asciende a 4.96 m³ de CH_4 . Esta cantidad sería equivalente a 8.86 m³ de biogás, considerando que el contenido de CH_4 fuese del 56% en vol. (Tabla IV.9).

Tabla IV.9 – Producción máxima teórica de metano en la descomposición anaerobia de los residuos

Tasa máxima de producción de CH_4 calculada	<i>Cifras obtenidas según la disponibilidad de residuos disponible</i>			
	Cantidad de residuos sólidos orgánicos	Concentración de ST	Volumen máximo de CH_4	Volumen máximo de biogás
0.534 m ³ CH_4 /kgST (humedad, 70%)	40.46 kg/día	22.96%	4.96 m ³ CH_4	8.86 m ³ (56% de CH_4)

IV.2.3.2 - Estimación de la producción de metano a partir de la tasa de producción específica

Una segunda vía para estimar la cantidad de metano consiste en recurrir a la tasa de producción específica de metano (PEM), esto es, el volumen producido de dicho gas por cada kilogramo de sólido total volátil introducido al digestor. Recuérdese que el valor de la PEM se obtuvo de la información reportada concerniente a los parámetros de operación de la planta de biogás de la Universidad de Venecia (Tabla IV.6). Por tanto, considerando nuevamente los 40.46 kg/día de residuos orgánicos que según se sabe poseen 8.75 kgSTV, y la tasa PEM igual a 0.39 m³ CH_4 /kgSTV_{destruido}, el volumen de CH_4 que se tendría entonces alcanzaría 3.41 m³ CH_4 . Si se asume que el CH_4 conforma el 56% del biogás, la producción de biogás rondaría los 6.10 m³. Serán precisamente estas últimas cifras sobre las cuales se efectuarán las valoraciones subsecuentes, toda vez que se trata de cantidades registradas en condiciones reales de operación en la planta de biogás tomada como referente.

Cabe apuntar que dicha PEM está reportada para un reactor anaerobio de distinta capacidad y régimen de operación, en particular lo concerniente a temperatura de digestión, de los aquí propuestos para la planta de biogás objeto del presente trabajo. No obstante, conviene tener en cuenta la serie de ajustes hechos con anterioridad en relación a la velocidad de carga orgánica y, por añadidura, al tiempo de residencia y volumen de digestión. Como se dijo, el principal de los propósitos de tales ajustes fue el de conservar la tasa de producción de 0.39 m³ CH_4 /kgSTV_{destruido} registrada en las condiciones de referencia. De este modo, esa tasa de

⁶⁵ Condiciones normales: Temperatura de 15 °C y presión de 1 atm.

producción se espera observar ahora en un reactor anaerobio funcionando a 20° C, a un TRH estimado de 65 días y con una VCO de aproximadamente un 25% de la de referencia.

IV.2.3.3 - Composición del biogás

Las condiciones de operación del reactor anaerobio junto con las características de la materia orgánica a degradar, son dos de los factores que tienen incidencia directa sobre variables cuantitativas y cualitativas del biogás. De esta manera, el biogás producido en el transcurso del arranque del sistema anaerobio y el generado durante episodios de desequilibrio en la operación, difieren en composición de aquel producido cuando la digestión se lleva a cabo de manera correcta. Debido a su escasa solubilidad en agua, el metano resultante de la degradación anaerobia de materia orgánica muda rápidamente a fase gaseosa, facilitando su extracción del digester.

Típicamente, el biogás se compone de las siguientes sustancias en los rangos que las acompañan: Metano (CH₄), 48-65%; dióxido de carbono (CO₂), 36-41%; nitrógeno (N₂), >17%, oxígeno (O₂), <1%, sulfuro de hidrógeno (H₂S), 0.005-0.5%; y cantidades traza de otros gases (Muñoz, 1981; Chynoweth e Isaacson, 1987; Rivard, 1994; Ward y col., 2008). En el caso bajo estudio, además del metano, componente de mayor relevancia desde el punto de vista energético, se pondrá especial atención en el contenido de H₂S y vapor de agua (H₂O). Si bien se trata de dos constituyentes minoritarios del biogás, su presencia acarrea serios inconvenientes para el manejo y eventual aprovechamiento energético del biogás.

El CO₂, segundo constituyente en importancia después del metano, además de mermar la calidad del biogás al reducir su poder calorífico, actúa como agente corrosivo debido al ácido carbónico que engendra al combinarse con agua (Deublein y Steinhauser, 2008). Pese ello, su reducción o eliminación sólo son admisibles cuando se producen grandes volúmenes de biogás, ya que es la única manera de hacer frente a los elevados costos que su remoción comporta (López, 1996). Los componentes restantes, hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂) y monóxido de carbono (CO), no suponen inconvenientes merecedores de consideración. Esto en razón de su naturaleza y las concentraciones en que regularmente están presentes en el biogás: 0.01 - 1.2% en vol., 0.02 - 6.5% en vol. y 0.001 - 2.1% en vol., respectivamente (Muñoz, 1981; Chynoweth e Isaacson, 1987; Rivard, 1994).

Así pues, para la realización de cálculos posteriores se tomarán en cuenta únicamente los siguientes componentes del biogás, en las concentraciones que los suceden: CH₄, 56% en vol.; H₂S, 0.5% en vol., y H₂O, 20 g/m³ biogás (0.025 m³H₂O/m³ biogás @ 25° C y 1.0871 atm). Disponer de cifras, cuando menos tentativas, respecto de estos tres constituyentes del biogás es de suma importancia. Permite conocer, por un lado, el valor energético del biogás, y por otro, los requerimientos básicos para los procedimientos de limpieza del mismo.

IV.2.4 - Remoción de materia orgánica y producción de lodos digeridos

La remoción de materia orgánica alude a la reducción del contenido de compuestos orgánicos biodegradables del influente con respecto al efluente, luego de un tiempo determinado. La remoción se explica tanto por la labor microbiana como por el resultado de fenómenos físicos y químicos tales como la precipitación, la adsorción y la retención. Para el caso aquí analizado, se asumirá una remoción de STV del 63%, cifra que corresponde a la reportada en la experiencia de la planta que sirve de referencia (Tabla IV.5). El hecho de que la digestión tendrá lugar a temperatura ambiente, puede repercutir negativamente en el ritmo de ejecución de las reacciones involucrada en la descomposición. Sin embargo, lo prolongado del TRH hace pensar que en efecto será posible alcanzar el porcentaje de remoción establecido.

Con respecto a los lodos digeridos, constituidos por remanentes de la digestión tanto sólidos como líquidos, conviene apuntar lo siguiente. Una vez llenos los reactores anaerobios, el volumen de sustrato de alimentación que ingresa y el volumen de lodos digeridos que abandona el sistema, idealmente serán iguales. Esto significa que si la disponibilidad diaria de sustrato es de 0.06916 m³/día, se espera entonces que cada día se evacuen 0.06916 m³/día de lodos digeridos. Estos lodos digeridos tendrán un aspecto y una composición completamente distintas a las del sustrato original.

Abundando un poco en la correspondencia de cifras. Si el sustrato presenta concentraciones de 0.1342 kgST/L y 0.1265 kgSTV/L, implica que con cada carga ingresan 9.29 kgST/día, que se componen a su vez de 8.75 kgSTV/día y 0.54 kgSTF/día. Luego entonces, partiendo de una remoción de STV del 63%, en los lodos de salida se tendrán 3.78 kgST/día, integrados por 3.24 kgSTV/día y 0.54 kgSTF/día. Considerando un volumen de lodos próximo a 0.06916 m³/día, las concentraciones correspondientes serían de 0.0545 kgST/L [5.45%] y 0.0468 kgSTV/L [4.68%] [Tabla IV.10].

Tabla IV.10 – Comparativa de las características de la alimentación y los lodos digeridos

Sustrato de alimentación			Lodos digeridos		
Producción: 0.0691 m ³ /día			Producción: 0.0691 m ³ /día		
Concentración de ST	Concentración de STV	Concentración de STF	Concentración de ST	Concentración de STV	Concentración de STF
134.2 kgST/m ³	126.5 kgSTV/m ³	7.7 kgSTF/m ³	54.5 kgST/m ³	46.8 kgSTV/m ³	7.7 kgSTF/m ³

En la Figura IV.7 se muestra un muy simplificado balance de masas del proceso anaerobio conforme a la composición promedio de los residuos de entrada, la producción predicha de biogás y la fracción removida de STV antes mencionados. Cabe hacer notar que parte de la sencillez de este balance radica en que se asume que no hay pérdida de microorganismos con la extracción de los lodos digeridos. Ello implica que la población bacteriana se mantiene constante al interior de ambos reactores.

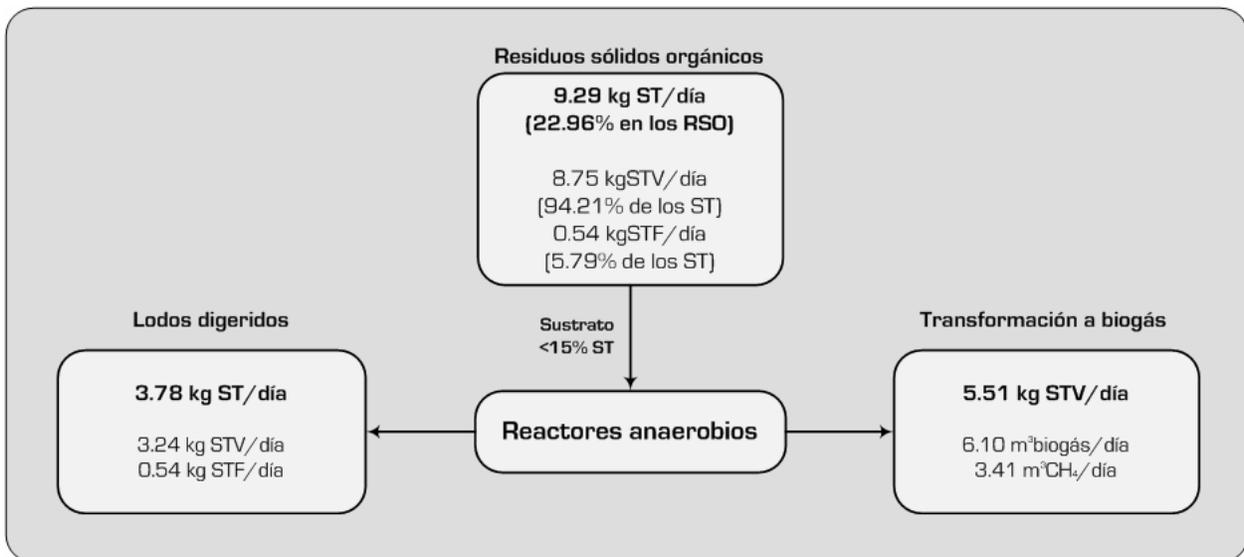


Figura IV.7 – Balance de masas del proceso anaerobio

Es necesario advertir que probablemente los valores reales, esto es, los registrados cuando el sistema se ponga en marcha, discrepen de los antes estimados. Lo anterior como

consecuencia de un sinnúmero de sucesos que pueden incidir, por ejemplo, en el conteo de ST y en la presencia de células (microorganismos) que se reflejaría en la concentración de STV en los lodos digeridos. No obstante, las estimaciones obtenidas no dejar de ser de utilidad en la medida en que bosquejan un panorama preliminar del rendimiento y requerimientos asociados al proceso de degradación anaerobia.

Como parte de una estrategia para la gestión de los lodos digeridos, se propone el contar con un depósito para su almacenamiento temporal. El depósito deberá propiciar además la separación de las componentes sólida y líquida, ambas con distintos usos potenciales. Para la componente sólida se propone utilizarla a manera de acondicionador de suelos con objeto de acrecentar la fertilidad de los mismos. Si dichos suelos están dedicados, por ejemplo, a la jardinería ornamental, es muy probable que no se requiera de un tratamiento posterior para adecuar las cualidades del lodo digerido. Toda vez que el largo TRH hace pensar que se logrará el grado suficiente de estabilización de la materia orgánica. En cambio, si se deseará emplear el lodo digerido como sustrato o bien aplicarlo sobre suelos para cosechar vegetales para consumo humano, sería pertinente someterlo a un post-tratamiento para garantizar su inocuidad. Con bastante frecuencia se recurre a tratamientos aerobios para complementar los procesos de digestión con la intención de estabilizar e higienizar los efluentes emanados de estos últimos (Chernicharo, 2007).

Por lo bajo de la temperatura de operación (en torno de los 20° C) resulta muy probable que subsistan microorganismos patógenos en el medio en descomposición. Estos organismos podrían introducirse no tanto a través del sustrato de alimentación, sino muy probablemente durante el procedimiento de inoculación de los reactores. Ante ello se precisaría de un método para la desinfección de los lodos digeridos, acompañado de otro para la reducción y estabilización de su contenido orgánico. De esta manera se tendrá la certeza de que no se suscitarán inconvenientes a raíz de su utilización en la producción de alimentos.

Por otro lado, la componente líquida, o sobrenadante, servirá en la preparación de la alimentación para obtener el nivel adecuado de concentración de sólidos (menor a 15% ST). La reutilización del sobrenadante de la digestión reporta, cuando menos, dos beneficios de importancia:

- a)** Abate el consumo de agua fresca, que tratándose de sistemas de digestión húmeda es significativo.
- b)** Permite una pre-inoculación del sustrato, lo cual contribuye a su degradación y al mantenimiento de una población bacteriana copiosa al interior del digestor.

Sin embargo, es necesario hacer la observación de que el empleo de este líquido residual en la disolución del sustrato modificaría el balance de masas antes presentado. Ello se debe a que en ese líquido estará presente materia biodegradable no asimilada durante el tratamiento. Esta materia se sumaría a la que se suministra con cada carga a los reactores, incrementando así la disponibilidad de estos compuestos a partir de los cuales se sintetiza el biogás. Tal situación podría conducir a un aumento en el nivel de generación de biogás y, consecuentemente, de metano con respecto a lo pronosticado haciendo presumir un mayor porcentaje de remoción en todo el proceso anaerobio.

La reutilización del sobrenadante puede tener, no obstante, efectos adversos sobre el desempeño del proceso de digestión. Si se añade el sobrenadante al sustrato de alimentación, la materia orgánica que aún contiene el primero se sumaría a la aportada por el segundo. De tal forma que la VCO se incrementaría lo que podría repercutir en la estabilidad bioquímica del

sistema anaerobio. A este respecto conviene apuntar que cuando ingresa al digestor una cantidad mayor de materia orgánica de la habitualmente suministrada, se altera la proporción sustrato:microorganismos. Esta situación que puede ocasionar la acumulación de sustancias inhibitoras, particularmente de la acción metanogénica, como por ejemplo los ácidos grasos volátiles (AGV). En todo caso, se deberá precisar en qué proporción es viable utilizar el sobrenadante en la preparación del sustrato sin que ello perturbe de forma notoria la eficiencia de la digestión.

Será necesario entonces analizar con detenimiento la composición de los lodos digeridos cuando el sistema anaerobio se encuentre ya en operación estable. De esta forma podrá evaluarse con suficiencia la pertinencia de utilizarlos tanto como acondicionador o mejorador de suelos, como en la dilución del sustrato de alimentación. De momento esas son las alternativas para el aprovechamiento de los lodos digeridos que reportan los mayores beneficios. Esto no impide que una vez que el sistema entre en funcionamiento surjan opciones más idóneas para el destino de los lodos digeridos.

A manera de resumen, la Tabla IV.11 recoge los valores previamente estimados del conjunto de atributos operativos del sistema anaerobio propuesto para tratar la FORSU producida como resultado de las actividades diarias en el restaurante seleccionado. Conviene recalcar que las cifras ahí mostradas son enteramente preliminares, susceptibles por tanto de diferir de los valores que se registren una vez que el sistema comience a operar. Aunque, vale subrayar que en la formulación del procedimiento arriba expuesto se intentó en todo momento inyectar una dosis de certidumbre en los resultados presentados. En todo momento se buscó el soporte del más amplio y variado acervo elementos teóricos y experiencias reportadas en relación al diseño de sistemas análogos al aquí expuesto.

IV.3 - Acondicionamiento del biogás

La complejidad del tratamiento del biogás está determinada por el uso o aplicación final a la cual se destinará dicho subproducto de la degradación anaerobia. Por ejemplo, puede optarse únicamente por la destrucción del metano presente en el biogás a través de su combustión (oxidación). Esto con objeto de evitar su liberación directa a la atmósfera, donde desplegaría su potencial de calentamiento decenas de veces superior al del dióxido de carbono. En tal caso no sería necesario implementar un tratamiento profundo para la limpieza del biogás. Sería suficiente, en todo caso, la remoción del H_2S a modo de impedir la formación de óxidos de azufre (SO_x), compuestos corrosivos asociados al fenómeno de la lluvia ácida.

Por el contrario, si el biogás obtenido pretende ser utilizado como insumo para la generación de energía eléctrica, se hace indispensable un tratamiento del biogás de mayores alcances. Éste deberá contemplar la eliminación de los agentes corrosivos, vapor de agua y H_2S , así como de aquellos otros compuestos que menguan el poder calorífico del combustible, esencialmente el CO_2 y el N_2 . Un tratamiento de iguales características deberá aplicarse si el biogás pretende ser usado como combustible vehicular o bien para ser inyectado y distribuido a través de las mismas redes que abastecen de gas natural a industrias y hogares.

En este sentido, el tratamiento al que es sometido el biogás obtenido de la digestión persigue dos finalidades primordiales. Por una parte, incrementar el poder calorífico del biogás, el cual se encuentra disminuido debido a la presencia de gases como CO_2 , N_2 y vapor de agua. Por otra, la reducción o eliminación del contenido de sustancias con efecto corrosivo, fundamentalmente vapor de agua y H_2S , a modo de prevenir el deterioro acelerado de componentes y equipos, en particular de aquellos fabricados con materiales metálicos.

Tabla IV.11 – Síntesis de parámetros de operación del proceso anaerobio propuesto

Parámetro	Definición	Cálculo	Valor estimado
Disponibilidad diaria de materia orgánica, G_{FORSU}	Cantidad diaria promedio de residuos orgánicos generada en el comedor	Se determina como parte de la etapa de caracterización de los residuos	40.46 kg/día
Propiedades de la materia orgánica	Conjunto de propiedades fisicoquímicas de trascendencia para el proceso anaerobio	Se determinan como parte de la etapa de caracterización de los residuos	22.96% ST 94.21% STV (como %ST) 5.79% STF (como %ST) pH, 5.74 ρ, 715.41 kg/m³
Temperatura de digestión	Temperatura a la cual acontece la degradación de la materia orgánica	Se establece como variable de diseño	Cercana a los 20° C
Flujo diario de sustrato, Q	Volumen diario de sustrato administrado al digestor	$Q = \frac{m_{sustrato}}{\rho_{sustrato}}$ $m_{sustrato}$: flujo másico de sustrato, kg/día $\rho_{sustrato}$: densidad del sustrato, kg/m ³	0.0692 m³/día
Concentración de STV en el sustrato, S_0	Cantidad de STV por unidad de volumen de sustrato	$S_0 = \frac{G_{FORSU} \cdot \%STV}{Q}$ G_{FORSU} : residuos disponibles, kg/día %STV: porcentaje de STV en los residuos Q : flujo diario de sustrato, m ³ /día	126.5 kgSTV/m³ (12.65% STV)
Volumen del digestor, V	Capacidad efectiva del reactor anaerobio	$V = TRH \cdot Q$ TRH: tiempo de residencia hidráulico, días	4.51 m³ ($V_{efectivo} = 6.0 \text{ m}^3$)
Tiempo de residencia hidráulico, TRH	Tiempo que el sustrato permanece dentro del reactor	$TRH = \frac{V}{Q}$	65 días
Velocidad de carga orgánica, VCO	Cantidad de sustrato que se suministra al sistema por unidad de volumen del reactor en un tiempo dado	$VCO = \frac{Q \cdot S_0}{V}$	1.94 kgSTV/m³-día
Producción específica de biogás, PEG	Volumen de biogás producido por unidad de STV añadido	$PEG = \frac{Q_{biogás}}{Q \cdot S_0}$ $Q_{biogás}$: flujo diario de biogás, m ³ /día	0.6968 m³ biogás/kgSTV
Tasa de producción de biogás, TPG	Cantidad de biogás producida por unidad de volumen de reactor en un tiempo dado	$TPG = \frac{Q_{biogás}}{V}$	1.3525 m³ biogás/m³ reactor-día
Remoción de materia orgánica, %STV	Proporción de STV del sustrato eliminados a través del proceso anaerobio	$\%STV = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100$ Siempre que $Q_0 = Q_1$ S_0 : concentración de STV en el influente, kgSTV/m ³ S_1 : concentración de STV en el efluente, kgSTV/m ³	63.0%

Sin embargo, conviene puntualizar que la remoción tanto del CO_2 como del N_2 con objeto de incrementar el poder calorífico del biogás, sólo es pertinente y viable bajo ciertas consideraciones. Por ejemplo, tratándose de plantas de biogás de gran envergadura cuyo propósito puede ser la distribución del biogás por gasoductos, su empleo como combustible vehicular u otra aplicación donde el volumen ocupado adquiere particular relevancia. Ello en virtud de los altos costos fijos y variables que implica la eliminación de ese par de constituyentes del biogás.⁶⁶

En el caso de pequeños sistemas de producción de biogás, se pueden omitir los procesos de remoción del CO_2 y N_2 en razón de los usos finales usuales que se le dan al biogás, combustión directa para obtención de energía térmica, y de consideraciones de corte económico. Para esta clase de unidades de producción de biogás, la recomendación es dotarlas de dispositivos para el control del H_2S y del vapor de agua. Esto implica que el biogás se aprovecha con su poder calorífico definido por la concentración de origen de CH_4 .

IV.3.1 - Remoción del sulfuro de hidrógeno

De no retirar el H_2S del biogás, sería necesario hacerse de equipos y componentes fabricados con materiales con alta resistencia a la corrosión, como el acero inoxidable, por ejemplo. O bien, asumir los costos que conllevarían planes de reinversión y mantenimiento más amplios y recurrentes. Es por ello que resulta más prudente remover de la corriente de gases dicho componente toda vez que para tal propósito existen técnicas que no son ni muy complejas ni muy costosas, pero sí razonablemente efectivas.

Como quedó asentado líneas arriba, el H_2S representa entre 0.005 y 0.5% en vol. del biogás producido por degradación anaerobia de biomasa. Para el caso objeto del presente trabajo, conviene presumir el porcentaje más alto en razón de que una temperatura oscilante de la digestión está ligada a una tasa errática de generación de H_2S (Rivard, 1994). Asimismo, al emplear ese nivel de concentración de H_2S se operará con cierto margen de seguridad, ya que el H_2S pudiera estar presente en el biogás en proporciones menores a la presupuestada.

La generación de biogás se estimó en $6.10 \text{ m}^3/\text{día}$, por tanto, el volumen de H_2S ascendería a $0.0305 \text{ m}^3/\text{día}$ (@ 25°C y $1.0871 \text{ atm}_{\text{abs}}$), esto es alrededor de $46.2 \text{ g H}_2\text{S}/\text{día}$. Tratándose de pequeñas y medianas unidades productoras de biogás, el método que se prefiere para la remoción del H_2S es la adsorción o desulfuración seca.⁶⁷ Según consta en el capítulo previo, la vertiente más difundida de la adsorción seca hace uso de un lecho formado a base de óxido de hierro (Fe_2O_3) para lograr, al término del proceso, la conversión del H_2S en azufre elemental (S). Este método de eliminación del H_2S destaca por su efectividad y simplicidad, que redundan en mínimos costos de inversión y de operación y mantenimiento. Los dispositivos para la remoción del H_2S mediante adsorción seca en Fe_2O_3 tiene la ventaja de que pueden ser elaborados de forma manual, con materiales fácilmente disponibles y de bajo costo.

La eliminación del H_2S a través de adsorción seca en Fe_2O_3 ocurre de manera satisfactoria a presión y temperatura ambientes. Siendo ésta una de las razones por las que el método es muy socorrido en unidades de producción de biogás sencillas a pequeña escala. Del mismo modo, la regeneración del lecho de Fe_2O_3 no supone, en principio, mayores dificultades: Basta

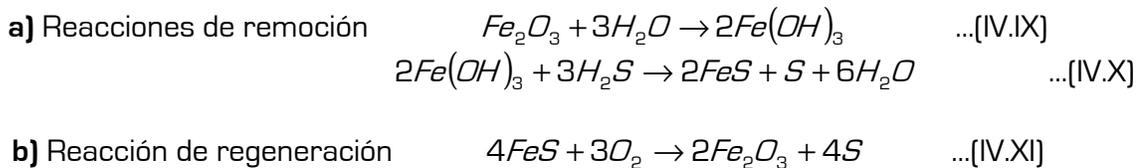
⁶⁶ A este respecto, puede consultarse un análisis comparativo presentado por Walsh y col. (1988) donde se reúnen los principales costos asociados a procesos de acondicionamiento de biogás con distintos alcances. En dicho análisis, el tratamiento consistente en la deshidratación acompañada de la remoción de CO_2 y N_2 es el más oneroso, hecho que se refleja en el costo por unidad de energía producida. Asimismo, reporta las mayores pérdidas de biogás, entre un 71 y 75% del originalmente introducido.

⁶⁷ También suele conocerse como oxidación seca. Este nombre alternativo hace referencia a los óxidos de azufre que se obtienen luego del proceso de regeneración del lecho usado para adsorción del H_2S .

con suministrar oxígeno al lecho o bien sustraer éste y exponerlo al aire. De esta forma la mayor parte del lecho de Fe_2O_3 estará listo para adsorber de nueva cuenta al H_2S del biogás.

En algunos casos, el lecho puede estar constituido por limadura de Fe_2O_3 mezclada con aserrín de madera y una cierta cantidad de agua, mismos que se depositan luego en un recipiente a través del cual circulará el biogás a una velocidad moderada. En otras configuraciones se emplean únicamente limaduras o mallas de Fe_2O_3 para la conformación del lecho de remoción. En casos como éstos, dado que el lecho no está humedecido de inicio conviene trabajar con el biogás saturado en vapor de agua, con la intención de favorecer la acción de remoción (López, 1996). Debe prestarse atención a las dimensiones del lecho de Fe_2O_3 puesto que deben ser tales que permitan un tiempo de residencia del biogás de cuando menos 1 minuto a fin de que el contacto y posterior reacción entre el Fe_2O_3 y el H_2S ocurran de manera apropiada.

A través del método de adsorción en Fe_2O_3 , el azufre del H_2S y el hierro del Fe_2O_3 interactúan químicamente produciendo agua, azufre elemental (S) y sulfuro de hierro (FeS). Este último es convertido posteriormente en S luego de concluido el proceso de regeneración del lecho. Como ocurre en toda reacción química, la proporción de H_2S susceptible de sustraerse mediante este procedimiento está limitada por la cantidad de hierro presente en el lecho. A este respecto, las proporciones estequiométricas en el proceso de remoción de H_2S por adsorción seca en Fe_2O_3 , están dados por los coeficientes de las reacciones químicas siguientes (López, 1996):



Se deduce entonces que por cada 3 moles de H_2S presentes en el biogás se necesita de 1 mol de Fe_2O_3 , es decir, poniendo las cantidades correspondientes en gramos, 156.19 g de Fe_2O_3 por cada 100 g de H_2S . Puesto en otros términos, el biogás a $25^\circ C$ y $1.0871 \text{ atm}_{\text{abs}}$, que posee una concentración de H_2S del 0.5% en vol. requiere para su desulfuración de $11.83 \text{ g } Fe_2O_3 / m^3_{\text{biogás}}$. Ahora bien, si se considera que la eficiencia del proceso de absorción es del 80%, la cantidad del Fe_2O_3 por unidad de volumen de biogás asciende entonces a cerca de $15 \text{ g } Fe_2O_3 / m^3_{\text{biogás}}$.

Con tales cifras, la desulfuración de los $6.10 \text{ m}^3/\text{día}$ de biogás precisaría de por lo menos 91.5 g de Fe_2O_3 , mismos que, considerando un ciclo de regeneración de dos semanas (12 días), da un total de 1.10 kg de Fe_2O_3 . Transcurridas las dos semanas se efectuaría la regeneración del lecho para restaurar su capacidad adsorbente. El reemplazo del lecho de Fe_2O_3 tendría que programarse en un periodo que no exceda los 60 días, dado que el procedimiento de regeneración puede repetirse, en promedio, un máximo de 5 veces para un mismo lecho (Walsh y col., 1988). Si bien esa restricción depende de la concentración de H_2S en el biogás, así como de la pericia con que se ejecute dicho procedimiento. Cautela debe tenerse al efectuar la regeneración del lecho, pues se trata de una reacción exotérmica, que alcanzada cierta temperatura, emite vapores de los que es menester protegerse (Walsh y col., 1988).

Es importante también definir el tamaño adecuado del lecho de Fe_2O_3 para conseguir un tiempo de residencia del biogás no menor a 60 segundos. Partiendo de un área transversal de sección circular con diámetro interior de 10 cm y con el flujo diario de biogás pronosticado, esto es $6.10 \text{ m}^3/\text{día}$, la altura mínima del lecho para asegurar el tiempo de permanencia es

de 54 cm. Evidentemente, entre más tiempo esté en contacto el biogás con el lecho de Fe_2O_3 , mejor remoción del H_2S se percibirá. El reemplazo del lecho puede hacerse con distintos materiales que contengan hierro. La viruta de los centros de maquinado de piezas e incluso las fibras o esponjillas metálicas con las que regularmente se asean los trastos, son opciones de bajo costo para dicho propósito. La Tabla IV.12 reúne las cifras y otros aspectos relevantes mencionados con anterioridad en relación al procedimiento propuesto para la remoción del H_2S del biogás.

Tabla IV.12 – Particularidades del proceso propuesto para la remoción del H_2S

Producción estimada de biogás	Concentración esperada de H_2S	Método de remoción del H_2S	Requerimientos de Fe_2O_3
6.10 m ³ /día	0.5% en vol.	Adsorción seca en Fe_2O_3	15 g Fe_2O_3 /m ³ de biogás
Tiempo de residencia del biogás	Dimensiones mínimas del lecho de Fe_2O_3	Regeneración del lecho de Fe_2O_3	Reemplazo total del lecho de Fe_2O_3
Mínimo 60 s	$\varnothing_{\text{inc}} = 10$ cm Altura = 54 cm	Cada 12 días	Al cabo de 60 días

IV.3.2 - Remoción del vapor de agua

El biogás trae consigo vapor de agua originado por las condiciones acuosas donde tiene lugar la descomposición anaerobia. El vapor de agua afecta el rendimiento del biogás como combustible al incidir sobre parámetros tales como temperatura de flama, límites de inflamabilidad, poder calorífico y relación aire-combustible (Walsh y col., 1988). A lo anterior deben añadirse los problemas de corrosión en equipos y tuberías, así como la eventual obstrucción de estas últimas por el vapor condensado, interrumpiendo tanto la evacuación como el suministro del biogás. A la salida del digestor el biogás puede llegar a registrar un contenido de vapor de agua (H_2O) de hasta 50 mg/L, no obstante el monto exacto está en función primordialmente de la temperatura de digestión (Perret, 1982).

En el caso que aquí se estudia, dada la temperatura prevista para la digestión (20° C), se anticipa un contenido de H_2O , de acuerdo con estimaciones reportadas por Perret (1982), cercano a 20 g/m³ biogás. Ahora bien, como se augura una producción de biogás de 6.10 m³/día, el vapor de agua totalizaría entonces 122 g H_2O /día, que corresponden aproximadamente a 0.1524 L H_2O /día [@ 25° C y 1.0871 atm_{abs}]. Así pues, el contenido de H_2O que se espera en el biogás es mínimo en comparación con el observado en biogás producido en digestores funcionando a temperaturas por arriba de los 35° C. Para remover los 122 g H_2O /día del biogás bastaría con emplear aditamentos de sencilla manufactura, como los que se describen a continuación.

La más sencilla forma de disminuir el contenido de vapor de agua del biogás es a través de un dispositivo denominado trampa de condensación o trampa de agua (Figura IV.8). La trampa de condensación puede valerse de un ensanchamiento y posterior contracción del diámetro de la tubería para crear así una cámara de expansión donde la temperatura y presión del vapor disminuyen, por lo que éste tiende a condensar. Otra configuración consiste en colocar una válvula de drenado en el punto más bajo de la línea de conducción del biogás. Conforme va condensando en su recorrido por la tubería, el vapor de agua se va depositando en la parte hundida de la línea de conducción. Se requiere que de manera periódica se abra la válvula para desalojar el líquido hasta ese momento acumulado. Es recomendable colocar la válvula de drenado lo más próxima al o los digestores, ya que de este modo el biogás saturado en humedad recorrerá la menor distancia posible al interior del sistema de tuberías.

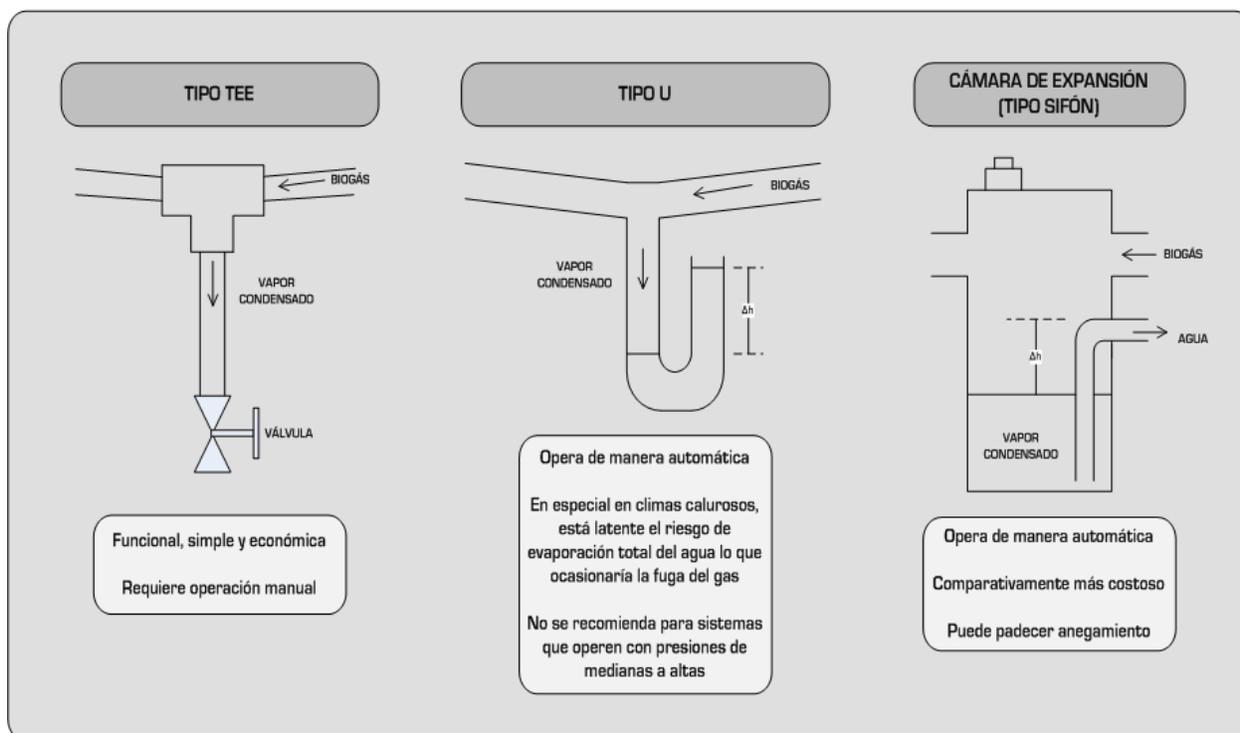


Figura IV.8 – Diferentes arreglos de trampas de condensación para remover vapor de agua del biogás
(Elaboración a partir de ESCAP, 1980; Khandelwal y Mahdi, 1986)

Igualmente importante es colocar la tubería de conducción biogás con un cierto ángulo de inclinación. Éste puede elegirse libremente, aunque se prefiere no demasiado pronunciado, sólo lo suficiente para provocar el movimiento inmediato del vapor condensado en dirección de la trama de agua. La inclinación de la tubería se sugiere que sea 1:100 m [Khandelwal y Mahdi, 1986]. De esta forma se evita que el agua condensada se acumule en alguna sección de la tubería, dirigiéndose en cambio a la trampa de condensación.

Cuando la distancia que existe entre el digestor y el punto probable de aprovechamiento del biogás es considerable, por ejemplo más de 50 m, no basta con colocar una sola trampa de condensación. Se necesitan colocar tres o más, obviamente en los extremos y también en puntos intermedios a lo largo de toda la tubería [Khandelwal y Mahdi, 1986]. Asimismo, no debe olvidarse colocar la tubería con la pendiente suficiente para permitir el movimiento del vapor condensado hacia los puntos donde se sitúen las trampas de condensación.

Tabla IV.13 – Particularidades del proceso propuesto para la remoción del vapor de H₂O

Producción estimada de biogás	Contenido esperado de vapor de agua	Cantidad total de vapor de agua	Método de remoción del vapor de agua
6.10 m ³ /día	20 g/m ³ de biogás	122 g H ₂ O/día (0.1524 L H ₂ O/día)	Trampas de condensación

IV.4 - Sistema de conducción y almacenamiento del biogás

IV.4.1 - Tuberías de canalización

El biogás generado durante la descomposición anaerobia de los residuos debe ser conducido hacia los diferentes componentes que forman parte de los subsistemas para su limpieza,

almacenamiento y, finalmente, suministro al punto probable de consumo. Un sistema para la conducción del biogás no sólo está formado por las tuberías, comprende también una variedad de elementos accesorios como válvulas, conectores, equipos de medición y protección. Asimismo, incluye los dispositivos para la condensación del vapor de agua y la remoción de impurezas como el H₂S. Lo anterior en función de las dimensiones y configuración de la instalación, del ritmo y volumen de generación de biogás y del uso final al cual éste será destinado.

Tratándose de tuberías para la canalización del biogás, las hay de diversos tamaños y materiales de fabricación. Algunos de los más representativos aparecen en la Tabla IV.14. Cuando la presión de funcionamiento del sistema es baja, el grosor de la pared de la tubería es considerablemente menor al que se requeriría de operar a presiones elevadas, lo cual sucede cuando se dispone de un compresor o soplador para el biogás. Los accesorios como conectores y válvulas también los hay en distintos materiales; si bien debe procurarse que sean compatibles con el tipo de tubería que sea seleccionado.⁶⁸

Tabla IV.14 – Opciones de tuberías para la conducción del biogás
(Elaboración a partir de EMCON, 1980; ESCAP, 1980; Khandelwal y Mahdi, 1986)

Material	Puntos a favor	Puntos en contra
Hierro galvanizado	-Alta resistencia mecánica. -Son tuberías enteramente comerciales.	-No es precisamente la opción más asequible. -Se corroen con relativa facilidad. -La instalación y reparación de averías pueden tornarse complicadas.
Plástico (PVC, CPVC)	-Tuberías económicas. -Sencilla instalación. -Fácil reparación de fugas y desperfectos.	-Se dañan con suma facilidad por la acción de agentes ambientales (radiación solar). -Algunos accesorios, como válvulas, pueden tener un costo superior en relación a los fabricados en otros materiales. -Frágiles y proclives a la ruptura accidental.
Polietileno de alta densidad (PEAD)	-Flexibles y resistentes a impactos y entes ambientales. -Conexiones simples y perfectamente herméticas, cuando son bien realizadas. -Reparación de fugas con relativa facilidad.	-Es una tubería más bien costosa. -Válvulas, conexiones, adaptadores y demás complementos no se encuentran con facilidad, en particular para instalaciones de escala reducida.

Con relación a las válvulas, es posible emplear aquellas del tipo compuerta, globo, mariposa o bola. Esta última es la que resulta más funcional, toda vez que tanto la apertura como el cierre se efectúan de forma ágil. Asimismo, se recomienda cubrir con al menos una capa de pintura los elementos metálicos presentes en la instalación con objeto de impedir su corrosión prematura y alargar así su vida útil (Walsh y col., 1988).

⁶⁸ Especial cuidado debe tenerse con los componentes fabricados a base de latón, dado que ocasionalmente pueden contener plomo el cual es atacado por el H₂S, deteriorando de manera severa la funcionalidad del componente.

Un elemento muy importante a tomar en cuenta para la selección correcta del material y tamaño de la tubería de canalización del biogás, es la presión de operación. En tanto no esté presente un compresor, la presión manométrica de operación de los sistemas para la conducción del biogás suele ubicarse en torno de los 900 mm H₂O (0.0871 bar) en el caso de plantas de biogás con digestores de domo fijo (Khandelwal y Mahdi, 1986; Walsh y col., 1988). Este último parámetro, la presión de operación, es indispensable a la hora de determinar la presión de diseño, que a su vez define los atributos idóneos de las tuberías y sus complementos. Generalmente, la presión de diseño se considera 1.5 veces la presión máxima de operación de la línea de canalización del biogás (Walsh y col., 1988).

El diámetro apropiado de la tubería de conducción de biogás puede determinarse a través de distintos procedimientos. Uno de ellos, práctico e inmediato, requiere de las cifras estimadas referentes a gasto de biogás, esto es volumen de biogás por unidad de tiempo, y la distancia a sortear desde la ubicación del digestor hasta el punto probable de consumo. Con los valores de dichos parámetros, se define el diámetro de la tubería haciendo uso de la gráfica presentada en la Figura IV.9. Como se recordará la generación esperada de biogás es de 6.10 m³/día, que son equivalentes a 8.98 pies³/h. La distancia al punto probable de consumo, el cual se encontrará dentro del propio restaurante, es indudablemente menor a 50 metros, esto es 164 pies. Por tanto, el diámetro adecuado de la tubería para la canalización del biogás, de acuerdo con la Figura IV.9, es 1/2".

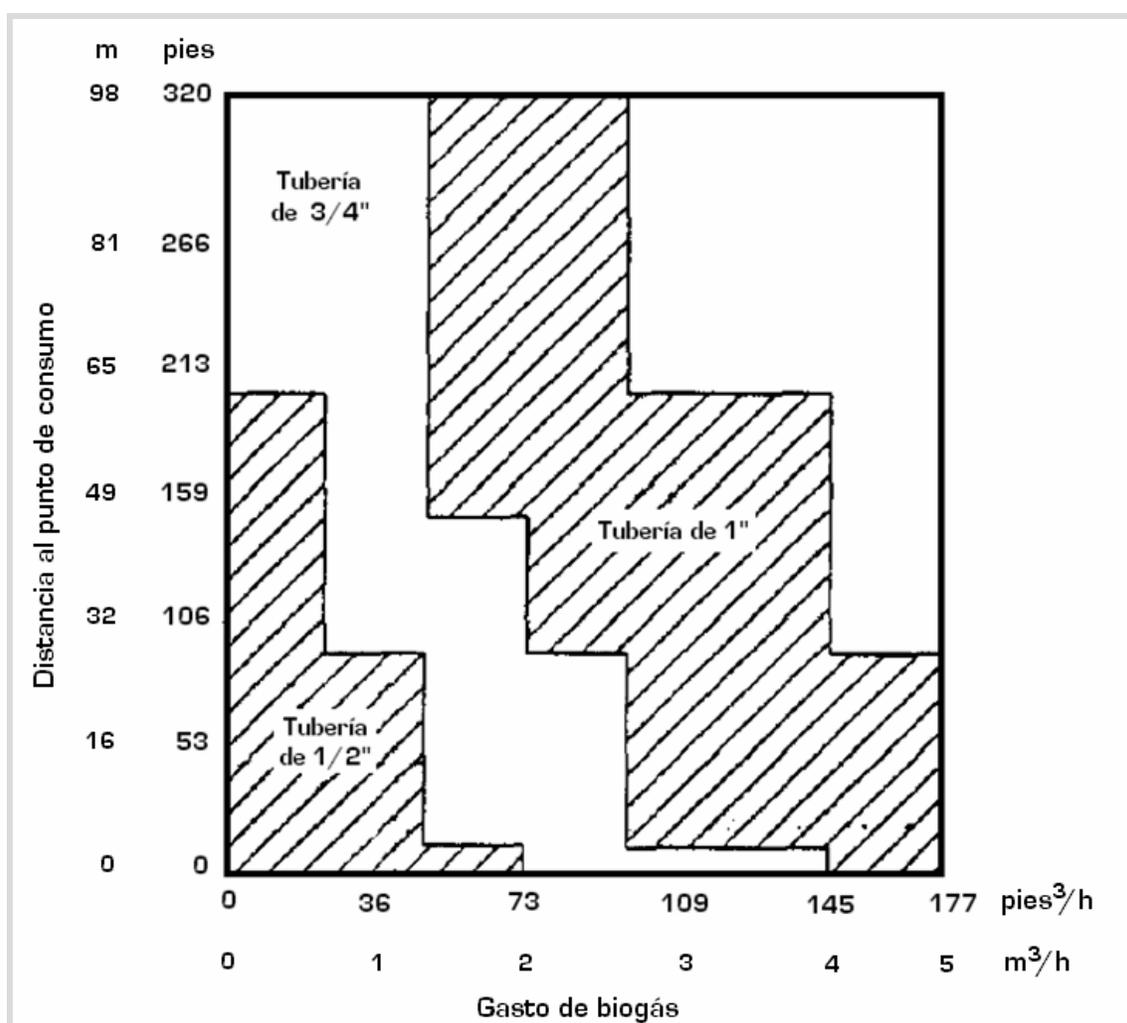


Figura IV.9 - Diámetro de la tubería en función del gasto de biogás y la distancia al punto de consumo (ESCAP, 1980)

Debido a sus ventajas en términos de durabilidad, tolerancia a la presencia del H_2S y H_2O , así como su resistencia a la radiación solar a la par de su flexibilidad y una instalación y mantenimiento que no exigen de mucha pericia, la tubería fabricada en polietileno de alta densidad (PEAD) es la opción idónea para la conducción del biogás. Para tal efecto, se propone una tubería de PEAD de 1/2" con una relación de dimensiones⁶⁹ (RD) de 9.0. Este último valor implica que la tubería es capaz de soportar presiones de trabajo de hasta 200 psi, claramente muy por arriba de la presión de operación prevista.⁷⁰ Quizá el inconveniente mayor al seleccionar la tubería de PEAD sea la disponibilidad en el mercado de conectores y demás accesorios como válvulas, más aún considerando el reducido diámetro de la tubería.

IV.4.2 - Elementos accesorios: Válvula de alivio

Especialmente para aquellos reactores anaerobios de estructura rígida, resulta conveniente la inclusión de un dispositivo que permita el control de la presión del biogás. El objetivo es que, de llegar a sobrepasar un límite preestablecido, se libere el exceso de biogás y retornar así al nivel de presión que asegure una operación segura. Dicho dispositivo funge entonces como una válvula de alivio cuya presión de activación debe corresponder con la presión máxima de operación del sistema. Esta presión máxima se define, entre otras cuestiones, tomando en cuenta los rangos de resistencia de los componentes más vulnerables de la instalación como son los digestores y, de existir, el depósito de almacenamiento del biogás.

Las válvulas de alivio convencionales en general no son apropiadas para los sistemas de manejo de biogás puesto que el vapor de agua en él presente en cierto momento interfiere con el libre accionamiento de los mecanismos de la válvula. Ante ello, en los sistemas de conducción de biogás de baja presión, o sea donde no se dispone de un compresor, regularmente se opta por válvulas de alivio que operan conforme a presiones hidrostáticas. A este respecto, la Figura IV.10 muestra dos variantes de válvulas de alivio muy socorridas en unidades de producción de biogás de pequeña y mediana escala.

El arreglo de la izquierda (Figura IV.10 - A) es sin duda uno de los más sencillos. Se utiliza un recipiente en donde se vierte una cierta cantidad de agua en la que luego se sumerge una derivación de la línea principal de conducción de biogás. En circunstancias normales, el biogás no escapa debido al tapón o sello hidráulico que se forma en la tubería. La profundidad a la que se introduce el conducto determina la presión de activación de la válvula, definida en base a la presión máxima de operación. En el instante en que se sobrepasa dicho umbral, el biogás comienza a burbujear en el agua y escapa a través de unos orificios situados en la parte superior del recipiente. Una vez que se ha liberado suficiente biogás, la presión retorna a un valor dentro del rango habitual y se crea nuevamente el sello hidráulico que bloquea la salida del biogás. Este tipo de válvula de alivio requiere de atención permanente para verificar que el nivel de agua sea el adecuado, toda vez que puede haber pérdidas por evaporación o a consecuencia del burbujeo del biogás.

El otro diseño (Figura IV.10 - B), además de cumplir la función de una válvula de alivio, es al mismo tiempo un manómetro que indica la presión a la que se encuentra el biogás al interior de las tuberías. En este caso la presión máxima de operación queda definida por el rango del

⁶⁹ La relación de dimensiones, RD, es un índice que resulta del cociente entre el diámetro exterior del tubo (D) y el espesor de la pared del mismo (e), expresados en unidades idénticas. Lo anterior queda expresado analíticamente como $RD = D/e$. La RD se emplea fundamentalmente para identificar las distintas presiones de trabajo que soportan las tuberías. La RD mantiene una relación inversamente proporcional con la presión de trabajo de la tubería. Así, conforme la RD va creciendo la presión de trabajo de la tubería va disminuyendo, y viceversa.

⁷⁰ En sentido estricto, no es que la elección de las características de la tubería responda a las necesidades específicas del proyecto, sino que se buscó sacarle provecho a un material que se tenía como sobrante de una instalación temporal efectuada tiempo antes de la realización del presente proyecto.

propio manómetro. Si la presión del biogás comienza a ascender, el líquido del manómetro va siendo empujado en dirección de un pequeño recipiente, que lo capta evitando que se derrame. Cuando la presión supera el nivel máximo preestablecido, el líquido del manómetro habrá sido desplazado por el biogás, y éste último será venteado a través de un segundo conducto con que cuenta el recipiente. Tan pronto como la presión descienda, el líquido almacenado en el recipiente regresará paulatinamente al manómetro y se restablecerán así las condiciones originales. Por las ventajas antes descritas, este diseño de válvula de alivio parece el más indicado para cubrir el requisito de la regulación de presión en la línea de conducción de biogás del sistema anaerobio que ha venido siendo bosquejado. Entonces, se fijará una presión [manométrica] de accionamiento de la válvula de alivio de 1,000 mmH₂O [0.0981 bar], en apego a lo recomendado para instalaciones de características análogas [Khandelwal y Mahdi, 1986].

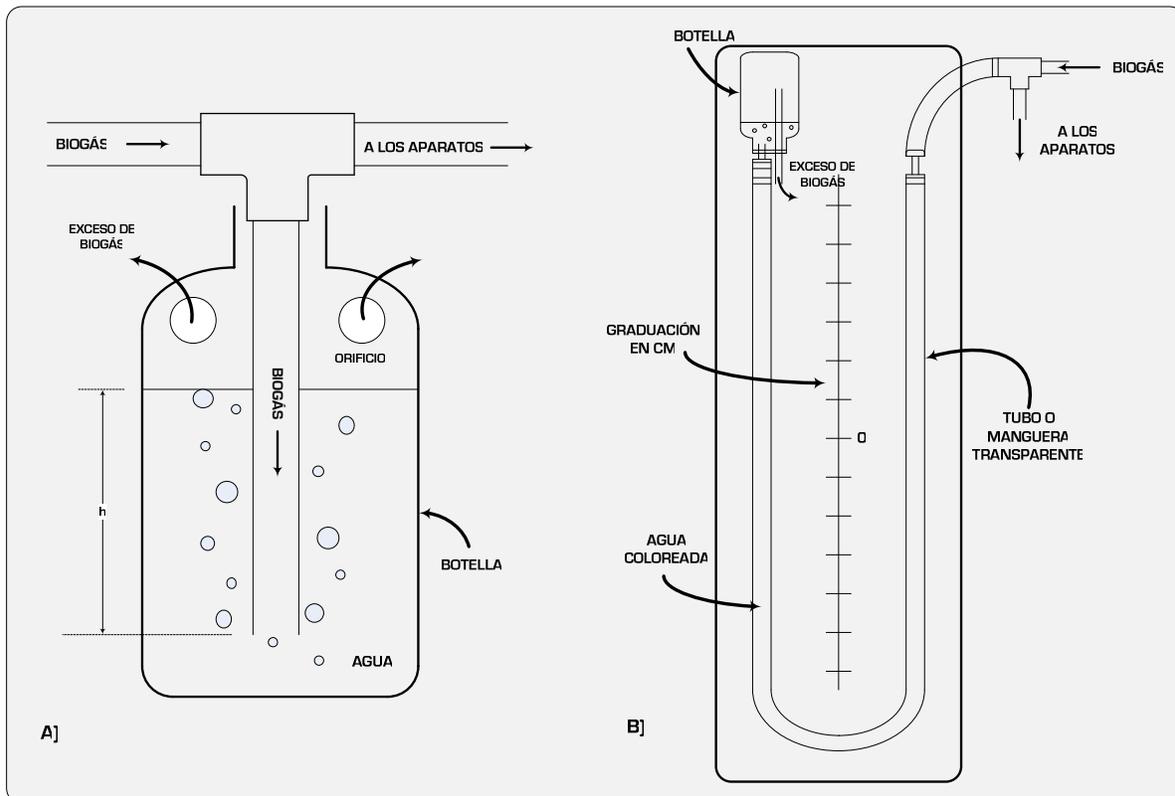


Figura IV.10 - Válvulas de alivio para unidades de producción de biogás a pequeña y mediana escala

4.4.3 - Elementos accesorios: Trampa de llama

Otro de los elementos esenciales de las instalaciones para la canalización y aprovechamiento del biogás, es el dispositivo comúnmente denominado trampa de llama o arresta-llamas. Es esencial en plantas productoras de biogás de cualquier envergadura, pero lo es más en aquellas de pequeña y mediana escalas con presiones de operación bajas. La función primordial de este dispositivo es impedir que, de manera inadvertida, una llama procedente desde el punto donde se quema el biogás, se propague a través de las tuberías hacia el reservorio o inclusive hacia el digestor. En cualquier caso se trata de escenarios de gran peligrosidad debido a la inminencia de una explosión.⁷¹

⁷¹ Cabe apuntar, no obstante, que para que ello suceda se requeriría la presencia de aire [comburente] en las tuberías mismas cuando menos en el mínimo porcentaje a fin de crear una mezcla inflamable con el biogás [combustible]. De ahí que, si tanto en las líneas de conducción como en el reservorio y en los reactores anaerobios, está presente únicamente el biogás,

Para plantas a gran escala se requieren arresta-llamas de dimensiones proporcionales, los cuales son fabricados y comercializados por compañías que atienden a los sectores del petróleo, del gas natural y gas LP. En cambio, si el sistema de producción de biogás es de capacidad módica, los arresta-llamas pueden ser inclusive confeccionados manualmente con materiales de fácil adquisición. Así por ejemplo, la Figura IV.11 da cuenta de los componentes, así como de su disposición, para ensamblar una trampa de llama para unidades de generación de biogás de pequeña escala.

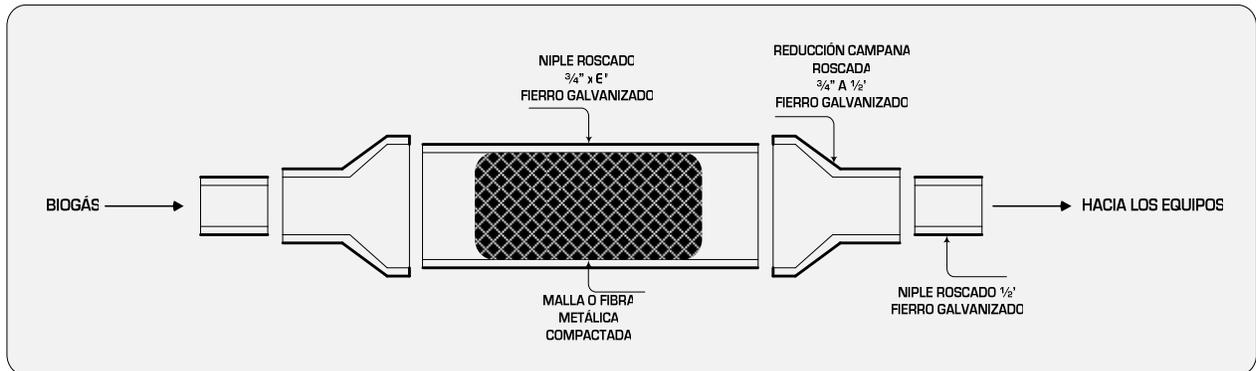


Figura IV.11 - Componentes para el armado de una trampa de llama
(Adaptado de Walsh y col., 1988)

Si bien en el diagrama las piezas indicadas están fabricadas en hierro galvanizado, es posible seleccionar para la construcción de la trampa de llama cualquier otro de los materiales listados en la Tabla IV.14. Asimismo, las medidas que aparecen en el esquema corresponden a las recomendadas para una tubería principal de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. Si dicha tubería fuese de 1", el diámetro correspondiente del cuerpo de la trampa de llama sería en tal caso de $1\frac{1}{4}$ ".

La trampa de llama impide el paso de la flama tanto por la presencia de su material de relleno, usualmente una fibra o esponjilla metálica medianamente compactada, como por el ensanchamiento en su sección central en relación al tamaño de la tubería principal. En este punto, conviene hacer notar que el lecho para la remoción del H_2S también opera como una trampa de llama, dado que está constituido de forma muy similar a esta última. Por ello es muy frecuente observar que, sobre todo en pequeños sistemas de producción y utilización de biogás, se prescinde de un arresta-llamas como tal, instalando únicamente el filtro de H_2S después del digestor y del reservorio de biogás.

Cuando el reactor anaerobio funciona simultáneamente como depósito de biogás, el arresta-llamas se coloca enseguida de la llave o válvula principal de evacuación del biogás. En caso de que se disponga de un reservorio específico para el almacenamiento del biogás, conviene entonces situar el arresta-llamas en algún punto de la línea posterior a dicho componente. De esta forma quedarán protegidos tanto el reservorio de biogás como el reactor anaerobio. De considerarse necesario es posible instalar un segundo arresta-llamas, pero éste deberá ir justo antes del dispositivo para el aprovechamiento del biogás.

IV.4.4 - Almacenamiento del biogás

La importancia de incorporar un medio para el almacenamiento del biogás reside en el hecho de que coadyuva a lograr un abasto oportuno, constante y suficiente del combustible para la

no es plausible, en principio, que pueda darse una penetración y propagación de la llama hacia el interior de las tuberías. No obstante, en cuestiones de seguridad conviene no eliminar de antemano cualquier situación posible, aunque se pronostique como poco probable.

aplicación a la cual sea destinado. Lo anterior se explica por el hecho de que al contar con un reservorio de biogás, se atenúa en alto grado el impacto negativo de las fluctuaciones en el ritmo de producción como también en el nivel de consumo. En este sentido, el almacenamiento del biogás contribuye en mucho a lograr y mantener un nivel de presión adecuado y estable para beneficio de los aparatos que se alimentan con dicho combustible.

El biogás generado a lo largo del proceso de degradación de los residuos orgánicos al interior de los reactores anaerobios se evacua mediante conductos acoplados en la parte superior de cada reactor. Dicha sección de los reactores se deja libre precisamente para ese propósito. De otro modo, el sustrato en descomposición obstruiría repetidamente los orificios de salida del biogás debido a las capas de escoria o espuma que luego de cierto tiempo tienden a formarse sobre la superficie. Así pues, las cúpulas de los digestores, tanto rígidos y más aún los de cubierta móvil, actúan como un depósito de biogás cuyas capacidades vienen a sumarse a la del reservorio principal, que opera ya sea a alta, media o baja presión. A este respecto, la Tabla IV.15 presenta información concerniente a diversas modalidades de almacenamiento del biogás. En la selección de la modalidad apropiada para el almacenamiento del biogás están implícitos los siguientes conceptos:

a) Presión – La presión se relaciona de manera directa con la capacidad de almacenamiento. Conforme aumenta la presión, el espacio que ocupa una cantidad dada de biogás va disminuyendo. El nivel adecuado de presión está parcialmente determinado por la presión a la que operan los equipos para aprovechar el biogás.

b) Capacidad – La capacidad del depósito de almacenamiento está supeditada a la generación proyectada de biogás y al patrón de consumo previsto. En unidades de producción de biogás a pequeña escala se recomienda que la capacidad de almacenamiento no sea mayor al volumen diario promedio de producción, sobre todo por razones de naturaleza económica [Heisler, 1981].

c) Fluctuaciones en la producción – Para encarar la inestabilidad en la generación de biogás es que se sugiere la incorporación de un sistema de almacenamiento. Las variaciones en la producción también inciden en el nivel general de presión del sistema, lo que en un momento dado repercute en el funcionamiento de los dispositivos para la utilización del biogás. No obstante, esta situación se sortea sin grandes dificultades con ayuda de dispositivos reguladores de presión acoplados a los reservorios.

d) Seguridad – El efecto corrosivo del H_2S se vuelve más pernicioso a medida que se incrementa la presión. De no ser sustraído, acorta sensible y rápidamente la vida útil de componentes metálicos, en detrimento de la seguridad de todo el complejo. El H_2S es un gas tóxico, razón por la cual el depósito de almacenamiento debe colocarse en un sitio bien ventilado a fin de no permitir la acumulación de biogás en caso de fuga. El riesgo de incendio o explosión se minimiza drásticamente cuando la instalación se sitúa en espacios abiertos, ya que por lo general el biogás es menos denso que el aire.⁷²

e) Ubicación – Largas y quebradas distancias desde el lugar donde se localiza el medio de almacenamiento de biogás hasta el punto de consumo, pueden propiciar pérdidas apreciables de presión. Esta situación puede acarrear dificultades para la operación de los equipos en que se aprovecha el biogás.

⁷² Este hecho depende fundamentalmente de las proporciones de CH_4 y CO_2 en el biogás. A medida que la presencia del CO_2 aumenta, el biogás se torna más pesado, razón por la cual tiende a acumularse en las zonas bajas. Por el contrario, si el contenido de CO_2 disminuye y el de CH_4 se incrementa, el biogás se vuelve más liviano que el aire, lo cual contribuye a una rápida dispersión en dirección ascendente.

Tabla IV.15 – Descripción y atributos principales de las modalidades de almacenamiento de biogás

(Elaboración a partir de Walsh y col., 1988)

Modalidad	Descripción	Variantes	Materiales de construcción	Ventajas	Desventajas
Uso directo	Plausible donde existe una compatibilidad entre los ritmos de producción y consumo del biogás	En ocasiones se instala un regulador de presión en la línea de suministro de biogás a fin de estabilizar la presión y flujo del combustible	No aplica	-Inversión mínima en componentes. -Es un esquema de abastecimiento sumamente sencillo.	-Se desaprovecha el biogás que no puede ser consumido en el momento en que es generado. -La eficiencia en la utilización del biogás suele ser bastante pobre.
Almacenamiento a baja presión	-El biogás alcanza presiones por lo regular dentro del rango de 25.4 a 100 cm H ₂ O; no obstante, pueden lograrse valores algo superiores. -Dichas presiones se consiguen sin la intervención de maquinaria.	Digestor con almacenamiento integrado: -Domo flotante. -Digestor de material flexible.	Hierro galvanizado, acero inoxidable; distintas clases de plásticos	-La presión se puede regular fácilmente colocando contrapesos. -Mínima inversión.	-Si la cubierta no se encuentra aislada, los cambios de temperatura pueden transmitirse al interior del digestor. -Vulnerables frente a vientos fuertes, pinchaduras.
		Bolsas fabricadas de material elástico e impermeable	Caucho, plástico reforzado, PVC, PEAD	-Representan una alternativa económica. -La presión puede modificarse mediante contrapesos.	-Susceptibles de sufrir pinchaduras. -Si no están cubiertas por un aislante, permiten disipación de calor.
		Desplazamiento de agua	Acero inoxidable	-La presión de operación también es regulable (suelen funcionar entre 15 y 25 cm H ₂ O). -Modalidad relativamente simple y de bajo costo.	-El agua puede congelarse, con lo cual el sistema no es capaz de operar
Almacenamiento a media presión	-Se recurre a este formato cuando se precisan presiones mayores a las del almacenamiento a baja presión, pero inferiores a 200 psi. El H ₂ S debe ser antes removido del biogás. -El gasto energético ligado a la compresión del biogás se traduce en hasta 3% de la energía química del mismo (1,000 pies ³).	Tanques rígidos	Acero inoxidable	-Los tanques, al ser de menores dimensiones, suelen tener un costo inferior al de los tanques de baja presión. -Los contenedores para gas LP suelen ser aptos para este propósito. -Aumenta la densidad energética del biogás.	-Los requerimientos de limpieza y compresión del biogás redundan en mayores costos. -La instalación se torna más compleja y es muy posible que precise de accesorios y permisos especiales. -De existir H ₂ S en el biogás, el compresor al igual que otros componentes metálicos se verían seriamente afectados.

Continuación Tabla IV.15 - Descripción y atributos principales de las modalidades de almacenamiento de biogás

(Elaboración a partir de Walsh y col., 1988)

Modalidad	Descripción	Variantes	Materiales de construcción	Ventajas	Desventajas
Almacenamiento a alta presión	<p>-El biogás, previamente tratado para eliminar H₂O, H₂S y CO₂, se comprime a varios miles de psi para luego ser depositado en tanques rígidos de tamaño reducido.</p> <p>-Una compresión a 2,000 psi supone un consumo energético proporcional al 8% de la energía contenida en el biogás (en 1,000 pies³).</p>	<p>-Sistemas con presiones de operación de entre 2,000 y 5,000 psi.</p> <p>-El biogás se deposita en tanques de acero, similares a los utilizados para almacenar gases comerciales como nitrógeno.</p>	Aleación de acero	<p>-A través de esta modalidad se incrementa de manera sustantiva la densidad energética del biogás.</p> <p>-Se eluden posibles limitaciones de espacio.</p>	<p>-La deshidratación y limpieza del biogás son más rigurosas que en el almacenamiento a media presión.</p> <p>-Los tanques y componentes adicionales, al reunir ciertos requisitos de manufactura y montaje, tienen un costo elevado.</p>
Almacenamiento por absorción	<p>El metano del biogás se disuelve y se absorbe en propano líquido (C₃H₈). Esta técnica requiere enfriamiento externo.</p>	No reportadas	Aleación de acero	<p>A un nivel de presión dado, la cantidad de biogás que puede ser almacenada mediante este método es de 4 a 6 veces superior</p>	<p>Las exigencias de purificación del biogás, sumadas al gasto en refrigeración, restringen el uso de este formato de almacenamiento a casos excepcionales</p>
Licuefacción	<p>-Sometido a cierta presión y temperatura, el biogás cambia de fase gaseosa a líquida, reduciéndose el volumen que ocupa.</p> <p>-A diferencia de otros gases combustibles como el propano y el butano, la licuefacción del biogás a presión atmosférica requiere una temperatura de -50.5° C.</p>	No reportadas	Aleación de acero	<p>-No es indispensable remover el CO₂ del biogás; el CO₂ se solidifica a una temperatura de -23.8° C.</p> <p>-Si se incrementa la presión, la licuefacción ocurre a mayor temperatura.</p>	<p>Elevados costos de inversión y operación</p>

En cuanto a los materiales para el confeccionamiento de reservorios de biogás, hoy día se dispone de una gran variedad que va desde distintas clases de plásticos y concretos, hasta hierro y acero. La elección de uno u otro depende básicamente del volumen y la presión a la que se desee resguardar el biogás. Los contenedores de baja presión suelen fabricarse a partir de materiales como hierro galvanizado, concreto o, más económico aún, de diferentes clases de plásticos (caucho, plástico reforzado, el policloruro de vinilo y el polietileno de alta densidad). El acero es muy socorrido para la construcción de depósitos de media y alta presión. Todos los materiales nombrados ostentan ventajas y desventajas. De ellas, las de mayor relieve se exponen con cierto detalle en la Tabla IV.16. En unidades de pequeña producción de biogás, muy a menudo se recurre a reservorios de baja presión elaborados principalmente a base de materiales plásticos que son durables, siempre y cuando se les proporcionen los debidos cuidados.

Tabla IV.16 - Materiales utilizados para la fabricación de reservorios de biogás
(ESCAP, 1980)

Material	Ventajas	Desventajas
Acero	Vida útil prolongada, cuando es debidamente pintado y procurado	Proclive a la oxidación, mucho más si se encuentra a la intemperie
Hierro galvanizado	Material de bajo costo. Su vida útil se extiende cuando está pintado y se le da el mantenimiento oportuno	De no ser pintados, su tiempo de vida es a lo sumo de un lustro
Concreto	Bajo costo y larga vida útil	Requiere un revestimiento especial para tolerar la presencia de H ₂ S y evitar la erosión
Ferrocemento (cemento reforzado con malla de alambre)	Costo equiparable e incluso inferior al los reservorios de acero	-Se requiere de mano de obra especializada para su armado. -Requiere impermeabilización, tanto al interior como al exterior.
Plásticos (PVC, PEAD; espesor menor de 3 mm)	Fácilmente disponibles y manipulables	-Se degradan por acción de los rayos UV solares. -Algunos son relativamente costosos.
Hypalon®	Tejido reforzado para dotarlo de mayor resistencia	Surgen inconvenientes al emplearlo como cubierta flotante
XR-5® (polímero reforzado con tejidos)	-Resistente a muchos químicos. -No absorbe agua.	En ocasiones se complica su sellado

Tomando en consideración lo antes expuesto, conviene optar, por economía, sencillez y funcionalidad, por el formato de almacenamiento a baja presión, específicamente por un reservorio fabricado con un material elástico e impermeable (Figura IV.12). Un material asequible que reúne tales características es una lona a base de poliéster con recubrimiento de PVC en ambas caras, cualidad que la hace más resistente a la intemperie y alarga su tiempo de vida útil. Por cuestiones de espacio y seguridad, se fijará una capacidad inicial de almacenamiento del reservorio próxima a 2.0 m³ de biogás (@ 25°C y 1.0871 atm_{abs}).

Si bien el reservorio propuesto tendría la capacidad para resguardar alrededor de $1/3$ de la generación diaria esperada de biogás, no debe olvidarse que las cúpulas de ambos reactores también actuarán como depósitos complementarios del biogás. En este sentido, de acuerdo a los volúmenes totales y útiles de los reactores seleccionados, se estima que en conjunto aportarían un espacio adicional para el almacenamiento de biogás de cerca de 1.0 m^3 . Por tanto, el volumen total de biogás que podría retenerse tanto en el reservorio como en las cúpulas de ambos reactores, es de aproximadamente 3.0 m^3 , volumen equivalente a la mitad de la producción diaria calculada. Esto supone que el volumen restante de biogás deberá ser consumido de manera casi simultánea con su generación a fin de evitar que sea expulsado a través de la válvula de alivio, sin ser aprovechado.

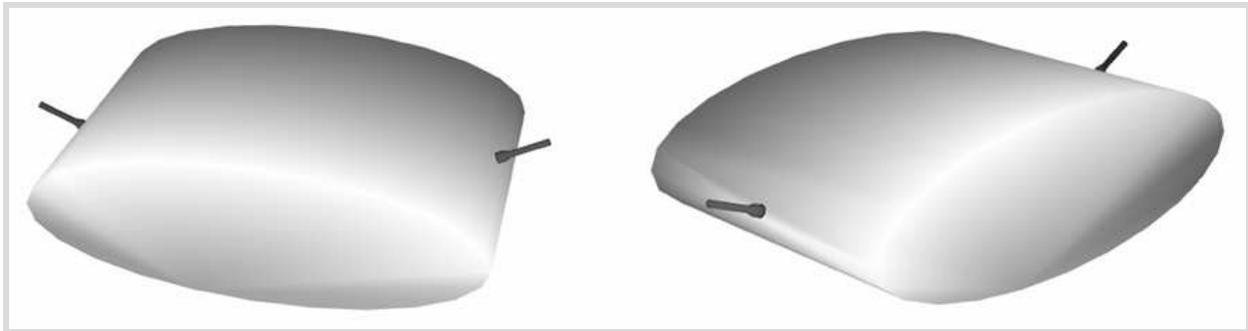


Figura IV.12 – Diferentes vistas preliminares del reservorio de biogás [El dibujo no está a escala]

El sistema de conducción y almacenamiento del biogás incluirá también un medidor para llevar un registro diario de la producción. Esta es información de suma importancia dado que permite advertir si el proceso anaerobio está llevándose a cabo de forma correcta y estable. Si se incluye una dimensión temporal en los registros de producción, se obtiene un valor que puede servir como referente del flujo volumétrico o gasto del biogás, m^3/h , por ejemplo). El valor así obtenido, sin embargo, no sería del todo confiable. Conforme a lo antes señalado, cabe recordar que la producción de biogás no es uniforme a lo largo del proceso de digestión, de manera que debe tomarse con ciertas reservas todo valor que haga referencia al ritmo de generación de biogás.

Entre las principales opciones para registrar la producción de biogás se encuentran los medidores por presión diferencial, los térmicos de flujo de masa, los de tipo turbina y los de desplazamiento positivo. Los medidores de presión diferencial debido a su principio de funcionamiento, son más adecuados para instalaciones donde el biogás es bombeado o comprimido, de lo contrario la medición se torna bastante difícil e imprecisa (Walsh y col., 1988). En los medidores térmicos de flujo de masa, el caudal se determina mediante la tasa de enfriamiento del fluido que pasa a lo largo de un transductor caliente, aunque también puede hacerse a través de la tasa de transferencia de calor. Los medidores tipo turbina o paleta rotativa contabilizan el flujo de gas mediante el movimiento que éste provoca en las alabes internas del mecanismo del medidor.

Por último, de entre los medidores de desplazamiento positivo, uno de los más populares es el de tipo diafragma. Estos artefactos cuentan con recipientes o cámaras de medición provistas, como su nombre lo manifiesta, de diafragmas (Figura IV.13). Las cámaras se llenan y vacían de manera periódica un determinado número de veces, mismo que es directamente proporcional al volumen de gas que ha circulado. El volumen medido se indica en una carátula numérica con que cuenta el propio medidor. Por ser una de las clases de medidores más conocida y confiable, se incluirá un medidor desplazamiento positivo tipo diafragma en la línea de conducción de biogás para monitorear el volumen generado.

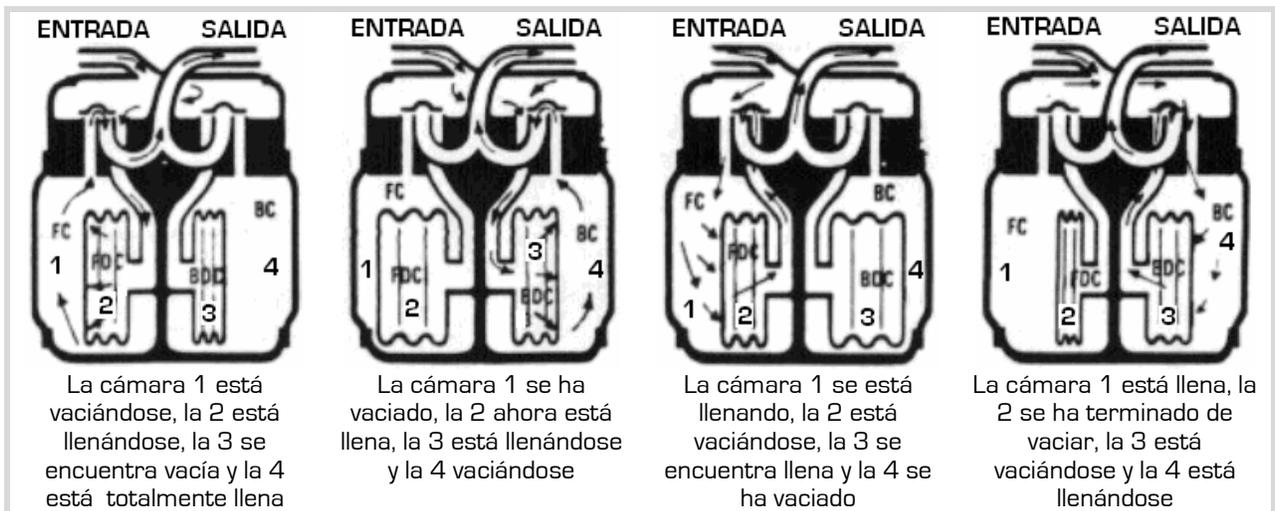


Figura IV.13 - Funcionamiento de un medidor de desplazamiento positivo tipo diafragma
 (Adaptado de Bennett, 2007)

IV.5 - Aprovechamiento energético del biogás

A consecuencia de la presencia de metano (CH_4) en altas proporciones, el biogás que se genera de la descomposición de materia orgánica en un entorno anaerobio y bajo otras condicionantes, es un gas combustible. En efecto, el biogás desde hace bastante tiempo se utiliza exitosamente como energético en el ámbito rural y, en fechas más recientes, en otros sectores e industrias como la eléctrica (Figura IV.14). La semejanza que guarda el biogás en términos de composición con el gas natural de origen fósil, ha servido para posicionar paulatinamente al biogás en los mercados residencial e industrial. En este último ámbito destaca su utilización para la generación de electricidad e inclusive también como materia prima para algunos procesos industriales.

Asimismo, el empleo del biogás se ha extendido también al campo de los combustibles para vehículos, tanto para automóviles particulares como para ciertos medios de transporte público. La participación del biogás en este sector es aún incipiente, en buena medida debido a los requisitos que esta aplicación impone, que incluyen depurar a profundidad el biogás y comprimirlo a altas presiones. Sin embargo, no cabe duda que son precisamente la diversidad de usos a nivel doméstico y su empleo como insumo para la generación de energía eléctrica, las dos aplicaciones de corte energético más relevantes que se le encuentran al biogás en el presente.

Si se presta atención al repertorio de posibles usos energéticos del biogás se advierte que en cualquiera de ellos está implícita su combustión con la intención de transformar y aprovechar su energía química. Esta transformación produce energía luminosa y térmica, una cantidad significativa de esta última con amplias posibilidades de ser convertida en otras formas útiles de energía. Por ejemplo, a través de las máquinas térmicas alimentadas con biogás puede obtenerse energía motriz, lo que supone una segunda conversión energética del biogás. Luego, mediante un tercer proceso de conversión, la energía motriz puede ser empleada para generar energía eléctrica.

Puede decirse que la conversión a energía eléctrica del biogás está restringida a proyectos de gran envergadura. Esto incluye plantas centralizadas de tratamiento de aguas residuales, rellenos sanitarios e instalaciones pecuarias de tamaño considerable. En general, se trata de proyectos donde la producción de biogás es de tal magnitud que compensa los costos de

inversión, dicho sea de paso son montos significativos, y de operación y mantenimiento de los equipos involucrados en la obtención de electricidad. En cambio, la utilización del biogás con fines térmicos es más apropiada para unidades de mediana y pequeña escala. Ello es consecuencia fundamentalmente del modesto nivel de producción de biogás alcanzado en instalaciones de este tipo. De ahí que resulte imposible amortizar los costos que implicaría la compra, puesta en marcha y mantenimiento del conjunto motor-generator y de los demás accesorios necesarios para la generación, conducción y suministro de la electricidad.

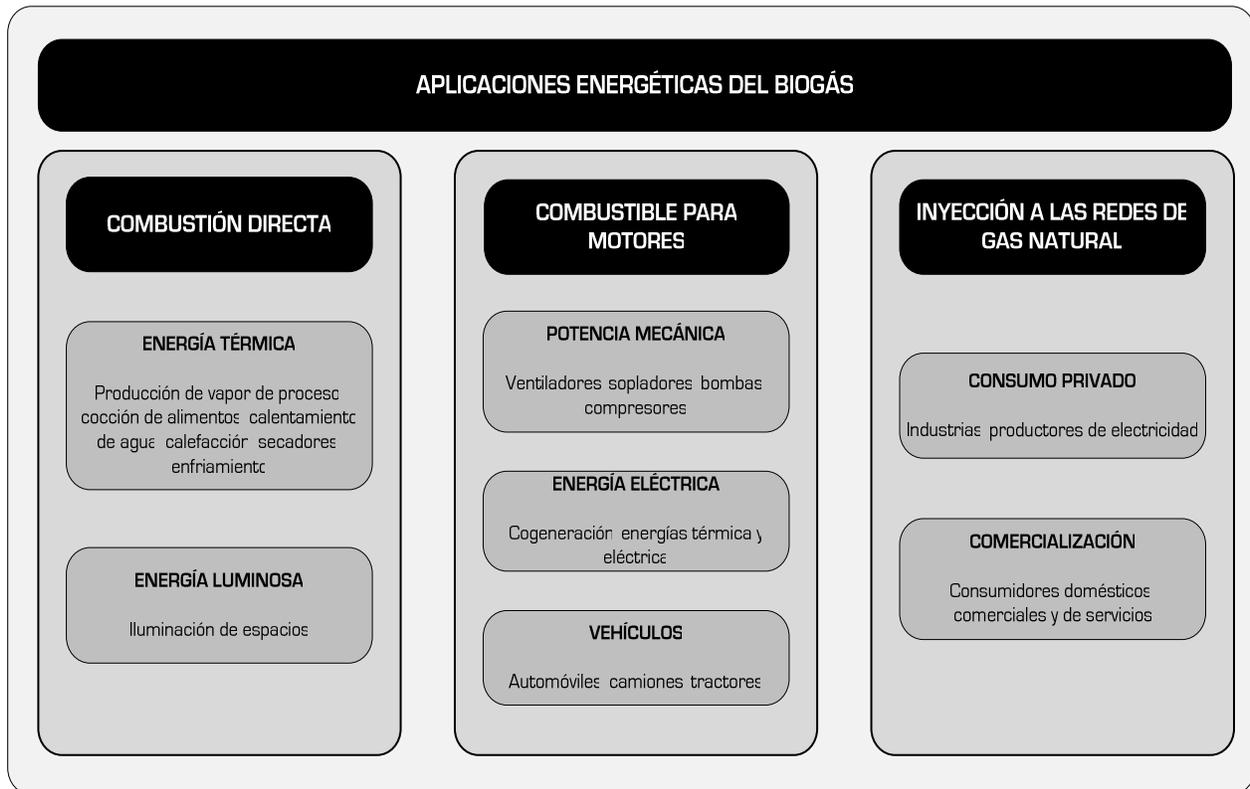


Figura IV.14 – Aplicaciones energéticas del biogás
(Elaboración a partir de Walsh y col., 1988)

Así pues, para el caso aquí examinado, la producción diaria de biogás se ha estimado en $6.10 \text{ m}^3/\text{día}$, con un contenido de metano del 56% en vol. y un poder calorífico inferior del metano de $35,700 \text{ kJ}/\text{m}^3$. Con base en las cifras antedichas, se obtiene una potencia equivalente a 1.4 kW , de la cual menos de la cuarta parte, esto es 0.315 kW , sería posible transformar efectivamente a electricidad, dado que la eficiencia total de conversión es del orden de 22.5% (López, 1996). No hay duda entonces que la potencia eléctrica resultante es ínfima, y dista enormemente de las capacidades típicas de equipos comerciales para la generación de electricidad a partir de biogás, las cuales están por arriba de 15 kW . Por lo tanto, en este caso particular, y a la luz de las cifras estimadas, no queda más que descartar el aprovechamiento del biogás por la vía de su conversión a energía eléctrica.

Quedan entonces las aplicaciones térmicas del biogás, las cuales consisten en el aprovechamiento directo de la energía calorífica y luminosa resultantes de la reacción de combustión del biogás con aire u oxígeno como comburente. Esas energías encuentran diferentes usos finales en distintos sectores, abarcando desde el calentamiento de agua y la generación de vapor, hasta la calefacción de espacios, la iluminación y la preparación de alimentos. Los usos del biogás están en función, claro está, del volumen disponible y la composición de la mezcla gaseosa. Como se advierte, se trata en mayor medida de usos

finales identificados con requerimientos propios del sector residencial, aunque también podrían hallarse en los ámbitos comercial e industrial. Para utilizar el biogás con la finalidad de obtener energía térmica, se requiere tener presentes aquellas de sus propiedades que rigen su comportamiento durante la reacción de combustión. Son factores que de algún modo restringen la cantidad de energía térmica realmente aprovechable por esta ruta. Es por ello que la Tabla IV.17 ofrece una síntesis de las más relevantes de dichas propiedades.

Si bien se precisan de algunas modificaciones, las semejanzas del biogás con otros energéticos muy populares, especialmente en el sector residencial, hacen posible que pueda ser utilizado en diversos equipos en igual número de aplicaciones. A este respecto, la Tabla IV.12 reporta algunas de las que son las aplicaciones principales del biogás en el ámbito doméstico en regiones rurales, aunque bien pueden hacerse extensivas a las regiones urbanas. La misma Tabla IV.18 muestra las especificaciones de los artefactos y sus correspondientes consumos aproximados de biogás. Lo bajo de las tasas de consumo de combustible, hace que esta opción de aprovechamiento energético del biogás sea pertinente, sobre todo en el caso de pequeños sistemas de producción de biogás.

Tabla IV.18 - Consumos aproximados de biogás en diversos equipos con distintas aplicaciones
(Khandelwal y Mahdi, 1986)

Aplicación	Especificaciones del equipo	Consumo estimado de biogás
Preparación de alimentos	Quemador de 2"	0.33 m ³ /h
	Quemador de 4"	0.47 m ³ /h
	Quemador de 6"	0.64 m ³ /h
	Por persona por día	0.24 m ³ /d
Iluminación	Lámpara equivalente a una bombilla de 60 W	0.10 m ³ /h
Motor dual biogás-diésel	Sustitución del 75 a 80% del diésel por b.h.p	0.42 - 0.50 m ³ /h

En razón del volumen de producción de biogás que se prevé obtener, la mejor alternativa para su aprovechamiento energético es la combustión directa para la obtención de calor útil. Esta energía térmica se destinaría a satisfacer parte de la demanda de energía para cocción de alimentos del mismo restaurante de donde proceden los residuos orgánicos. Así pues, los 6.10 m³/día de biogás representan 122 MJ/día, asumiendo una concentración de CH₄ del 56% en vol., cuyo poder calorífico inferior es de 35,700 kJ/m³. Puesto que el consumo semanal de energía para cocción de alimentos del restaurante se estimó en 12,122 MJ, los cuales provienen enteramente del gas LP que adquieren de proveedores comerciales, el aporte a este rubro que haría el biogás representa únicamente el 6% del total.⁷³

Se aprecia entonces que la sustitución del gas LP por biogás en el uso final de cocción de alimentos, sería únicamente parcial. Asimismo, el biogás deberá canalizarse a un equipo de combustión de prestaciones austeras y que se mantenga en funcionamiento por periodos más bien cortos. En este sentido, el restaurante dispone de una estufa mediana alimentada originalmente con gas LP (GLP) (Figura IV.15). Su función consiste en mantener calientes los alimentos que se sirven en una sección externa del comedor. Dicha estufa cuenta con un juego de tres quemadores de 5" de diámetro cada uno (Figura IV.16). A continuación se

⁷³ La estimación se realizó a partir de la factura semanal por concepto de suministro de gas LP, considerando en ese entonces un precio de \$5.51 por litro de gas LP y un poder calorífico de 4,248 MJ/bbl. El término "semanal" comprende seis días, de lunes a sábado. Se asume que el gas LP que consume el establecimiento se destina íntegramente al uso final de cocción de alimentos. El aporte energético semanal del biogás se calculó multiplicando los 122 MJ/día por los seis días de lo que aquí se considera una semana.

asienta el procedimiento utilizado para la estimación de la potencia térmica de los quemadores.

Tabla IV.17 - Propiedades físicas, químicas y combustibles del biogás

(Elaboración a partir de Daintith, 1985; Walsh y col., 1988; López, 1996; Deublein y Steinhäuser, 2008)

Composición, en volumen	Compuestos químicos predominantes en el biogás	55 – 70% CH ₄ 30 – 45% CO ₂ 0 – 0.5 % H ₂ S 0 – 5% N ₂ 1 – 5% H ₂ O (vapor) 0 – 0.05% NH ₃
Poder calorífico	Energía liberada por la combustión de una determinada masa o volumen de combustible	21.6 – 23.4 MJ/m ³ (6.0 – 6.5 kWh/m ³ , contenido de CH ₄ mayor al 60%)
Equivalencia energética con otros combustibles*	Correspondencia con relación a otros combustibles, de la energía contenida en un 1 m ³ de biogás	0.60 – 0.65 L de petróleo crudo 0.54 – 0.58 L de combustóleo 0.62 – 0.67 L de queroseno 0.60 – 0.65 L de diésel 0.67 – 0.73 L de gasolina 0.81 – 0.87 L de gas LP 0.64 – 0.69 m ³ de gas natural 1.49 – 1.62 kg de leña 3.06 – 3.32 kg de bagazo de caña
Masa molar	Suma ponderada de las masas moleculares de los distintos compuestos presentes en el biogás	24.4 kg/kgmol
Densidad típica	Cantidad de masa por unidad de volumen	1.2 kg/m ³
Temperatura de auto-ignición	Temperatura a la cual el biogás arde de manera espontánea sin la presencia de llamas o chispas	650° – 750° C
Temperatura y presión críticas	Temperatura y presión bajo las cuales se licua el biogás	-82.5° C y 75-89 bar
Velocidad de flama	Rapidez con la cual se propaga una flama en una mezcla combustible. La concentración de CO ₂ influye en este parámetro: A mayor cantidad, menor velocidad de flama	25 cm/s (biogás con un contenido de CH ₄ del 60%)
Límites de inflamabilidad	Se refiere las proporciones mínima y máxima de aire y combustible para obtener mezclas inflamables. La concentración de CO ₂ y vapor de H ₂ O en el biogás afectan este parámetro	9 – 17% biogás en aire
Corrosividad	Deterioro superficial y progresivo de componentes metálicos por acción química de sustancias como los ácidos	-El H ₂ S reacciona con metales, en especial con aleaciones de cobre. -El CO ₂ , en combinación con agua, da lugar a soluciones corrosivas.
Olor	Sensación perceptible a través del olfato	-Debido a la presencia de H ₂ S, el biogás no tratado tiene un olor a huevo podrido. -Luego de ser desulfurizado, el biogás se torna prácticamente inodoro.
Toxicidad	Sustancias presentes en el biogás cuyas propiedades químicas o físicas originan alteraciones orgánofuncionales e incluso la muerte. Los efectos dependen del tiempo de exposición así como de la concentración del agente tóxico	El H ₂ S es el componente de mayor toxicidad del biogás. La exposición prolongada a este gas se asocia con molestias tales como, pérdida del olfato, irritación en ojos y vías respiratorias, dolor de cabeza, hemorragias, pérdida del conocimiento y, en casos extremos, la muerte

*Valores calculados con base en los poderes caloríficos netos reportados en SENER (2010a).



Figura IV.15 – Diferentes vistas de la estufa exterior del restaurante



Figura IV.16 – Aspecto de los quemadores instalados en la estufa exterior del restaurante

IV.5.1 – Estimación de la potencia térmica de los quemadores

La Figura IV.17 muestra la forma y las dimensiones de uno de los tres quemadores instalados en la estufa exterior del restaurante ya antes mencionada. Conviene tener presente que los tres quemadores de la estufa son idénticos. Estos quemadores están fabricados en hierro ordinario, con un diámetro de aproximadamente 5", un tubo de mezclado de casi 1" de diámetro interno y longitud del mismo de 13.5 cm. Cada quemador posee 66 puertos de combustión de 1/8" (3.17 mm) de diámetro cada uno, lo que da un área total de los puertos de combustión de 5.22 cm² (5.22·10⁻⁴ m²).

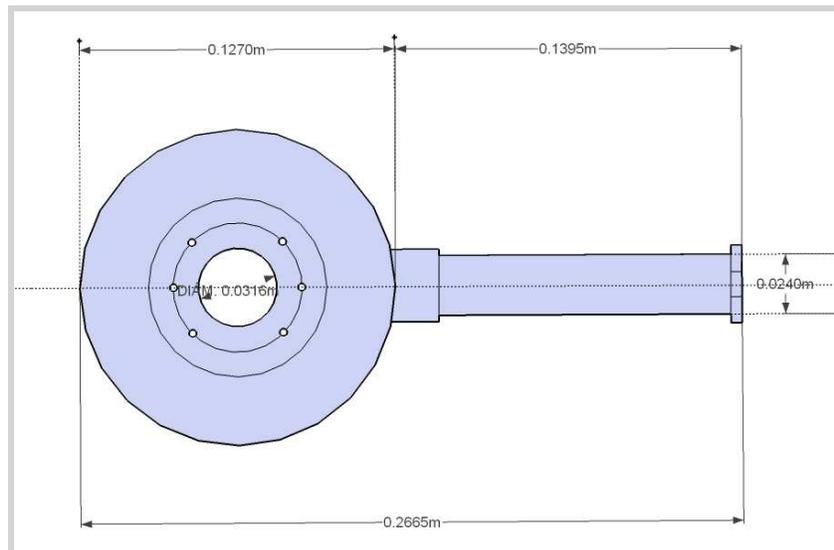
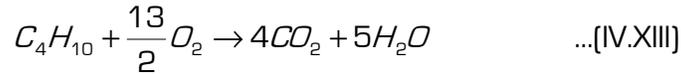
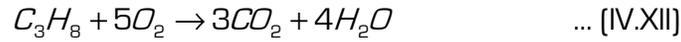


Figura IV.17 – Dimensiones del quemador instalado en la estufa exterior del restaurante

Puesto que los quemadores están diseñados para funcionar con GLP, deben ser las propiedades de este combustible las variables a emplear en la aproximación de su potencia térmica individual. Así pues, para conocer de los requerimientos de aire para la combustión completa del GLP es preciso definir su composición. En el caso del GLP nacional, los constituyentes son propano (C_3H_8) en un 60% y butano (C_4H_{10}) en un 40%, en volumen. Las reacciones de oxidación (combustión) completa de los alcanos anteriores son las siguientes:



La ecuación química [IV.XII] sentencia que para la oxidación de 1 mol de C_3H_8 se requieren 5 mol de oxígeno (O_2), es decir 23.80 mol de aire, considerando una concentración de O_2 en éste último de 21%. En tanto, de acuerdo a la expresión [IV.XIII], para la oxidación completa de 1 mol de C_4H_{10} son necesarias 6.5 mol de O_2 , o sea 30.95 mol de aire. De esta manera, se precisa de 26.66 mol de aire para la combustión completa de 1 mol de GLP. Esta proporción se conoce como relación estequiométrica aire:combustible. De acuerdo con los estándares tradicionales, para asegurar una estabilidad de flama en los quemadores el aire que ingresa al tubo de mezclado (aire primario) y se combina con el combustible corresponde a una fracción de entre 30 y 75% del requerido según la estequiometría, lo cual aplica a gases manufacturados como el GLP (Turns, 2000). Entonces, asumiendo que para el quemador bajo examen el aire primario equivale al 30% del demandado estequiométricamente, la relación GLP:aire en el tubo de mezclado es 1:7.99, en unidades mol. En consecuencia, las concentraciones molares del GLP (X_{GLP}) y del aire (X_{aire}) en la mezcla aire-combustible, son:

$$X_{GLP} = \frac{n_{GLP}}{n_{mezcla}} = \frac{1 \text{ mol}_{GLP}}{1 \text{ mol}_{GLP} + 7.99 \text{ mol}_{aire}} = 0.11 \quad \therefore X_{aire} = 0.89 \quad \dots \text{[IV.XIV]}$$

La masa o peso molar de la mezcla (M_M) conformada por el GLP y el aire, de acuerdo con las proporciones arriba calculadas, se determina a partir de las concentraciones X_{GLP} y X_{aire} , y de las masas molares del GLP (M_{GLP}) y de la mezcla que conforma el aire (M_{aire}):

$$M_M = 0.11M_{GLP} + 0.89M_{aire} = 0.11 \left(49.63 \frac{kg}{kg_{mol}} \right) + 0.89 \left(28.85 \frac{kg}{kg_{mol}} \right) = 31.63 \frac{kg}{kg_{mol}} \quad \dots \text{[IV.XV]}$$

Ahora bien, en la Figura IV.18 se presentan dos diagramas alusivos a los gastos, presiones, áreas y velocidades del GLP, aire y la mezcla de ambos en su transitar por el quemador. En dichos diagramas aparecen representadas las siguientes variables:

P_{ATM} : Presión atmosférica (Pa)

v_1, Q_1, P_1 : Velocidad (m/s), gasto (m^3/s) y presión (Pa) de entrada del GLP

v_2, P_2 : Velocidad (m/s) y presión (Pa) de la mezcla aire-GLP en el tubo de mezclado

Q_2 : Gasto (m^3/s) de aire primario

v_3, Q_3, P_3 : Velocidad (m/s), gasto (m^3/s) y presión (Pa) de la mezcla aire-GLP antes de salir del quemador

v_4, Q_4 : Velocidad (m/s) y gasto (m^3/s) de la mezcla aire-GLP a la salida del quemador

A_{ORIF} : Área del orificio del inyector (m^2)

A_{TM} : Área de la sección transversal del tubo de mezclado, (m^2)

A_{QM} : Área del quemador (m^2)

A_T : Área total equivalente de los puertos de combustión (m^2)

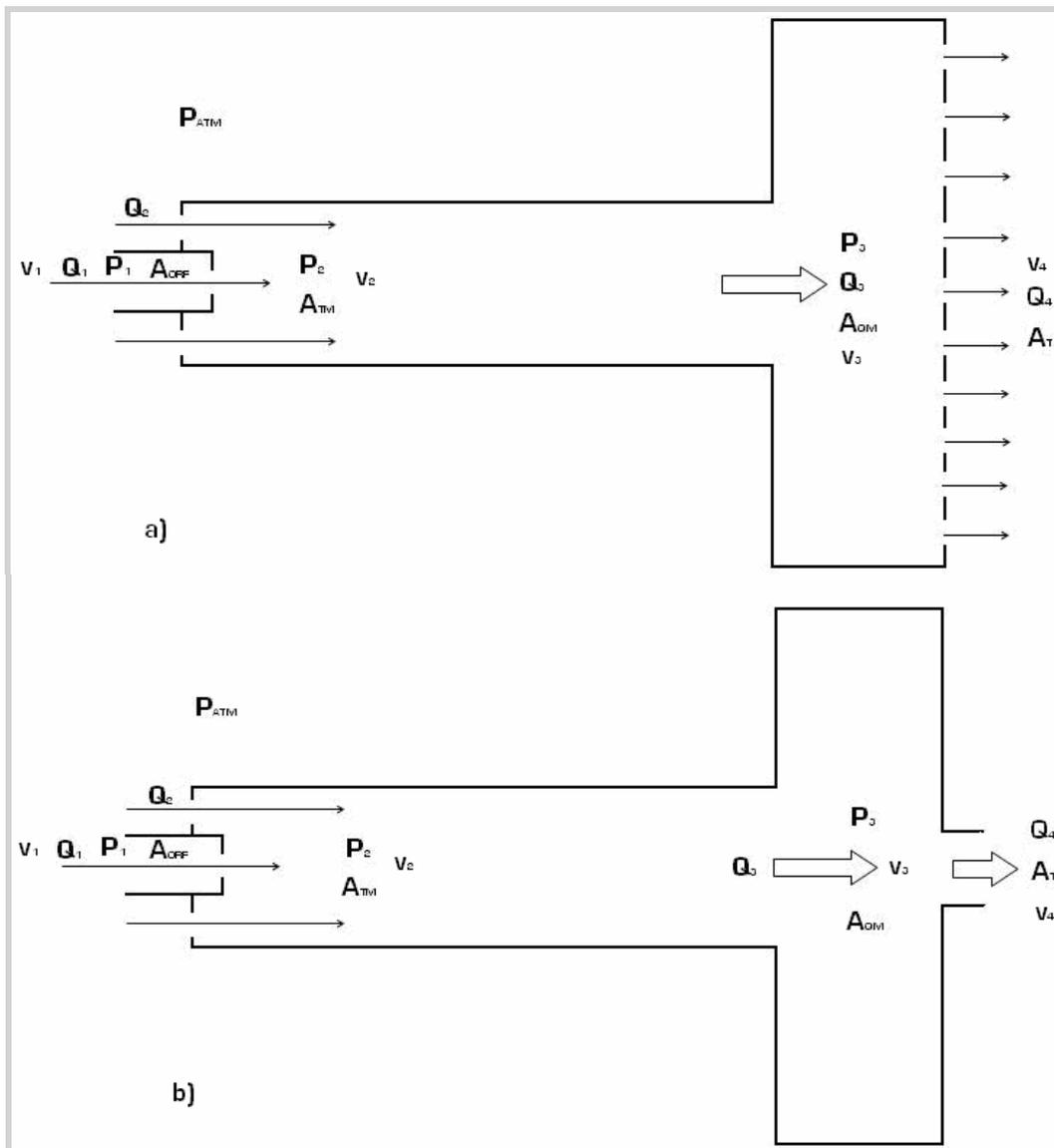


Figura IV.18 - Diagramas simplificados del quemador e identificación de las principales variables

Con objeto de facilitar la labor, el diagrama de la Figura IV.18-b muestra el área total equivalente de los puertos de combustión del quemador, que es por donde sale la mezcla GLP:aire con un flujo y una velocidad determinada. No obstante que formalmente está restringida al ámbito de los fluidos incompresibles, la ecuación de continuidad es una buena aproximación para la solución del asunto en cuestión. Así pues, luego de observar la Figura IV.18-b es válido plantear las siguientes igualdades:

$$Q_3 = Q_4 \quad \dots[\text{IV.XVI}]$$

$$A_{QM}v_3 = A_T v_4 = A_T v_{flama} \quad \dots[\text{IV.XVII}]$$

De la expresión (IV.XVII) se determina la velocidad v_3 , sabiendo que el área del quemador A_{QM} , no confundir con el área total equivalente de los puertos de combustión, es de 118.76 cm^2 [véase Figura IV.17], que la velocidad de flama v_{flama} , del GLP es de 0.46 m/s , y que el área total equivalente de los puertos de combustión es de 5.22 cm^2 . La v_3 resulta entonces igual a 0.0202 m/s .

Luego, aplicando el teorema de Bernoulli se tiene lo siguiente:

$$\frac{v_3^2}{2} + gh_3 + \frac{P_3}{\rho} = \frac{v_4^2}{2} + gh_4 + \frac{P_4}{\rho} \quad \dots\text{(IV.XVIII)}$$

Donde:

- g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)
- v₃ y P₃: Velocidad (m/s) y presión (Pa) de la mezcla aire-GLP antes de salir del quemador
- v₄ y P₄: Velocidad (m/s) y presión (Pa) de la mezcla aire-GLP a la salida del quemador
- P₄ = P_{ATM} = 101.37 kPa
- h₃ y h₄: Alturas con respecto a un punto de referencia (m)
- ρ: Densidad de la mezcla aire-GLP (kg/m³)

Pero dado que h₃=h₄, resulta por consiguiente:

$$\frac{v_3^2}{2} + \frac{P_3}{\rho} = \frac{v_4^2}{2} + \frac{P_4}{\rho} \quad \dots\text{(IV.XIX)}$$

Puede manipularse la ecuación (IV.XIX) de manera que se obtenga una expresión para determinar la densidad (ρ) de la mezcla aire-GLP. Esta expresión queda como sigue, con P₃ y P₄ en Pa:

$$\rho = \frac{P_3 - P_4}{\frac{v_4^2}{2} - \frac{v_3^2}{2}} \quad \dots\text{(IV.XX)}$$

Recurriendo a la ecuación de gas ideal es posible hallar una expresión alternativa que defina la presión P₃ en términos de la densidad de la mezcla. Para tal efecto, el procedimiento es el siguiente:

$$Pv = RT \quad \dots\text{(IV.XXI)}$$

$$P = \rho RT = \rho \frac{R_u T}{M_M} = \rho \alpha ; \text{ con } \alpha = \frac{R_u T}{M_M} \quad \dots\text{(IV.XXII)}$$

Donde:

- P: Presión absoluta (Pa)
- v: Volumen específico de la mezcla aire-GLP (m³/kg)
- R: Constante particular de la mezcla aire-GLP en cuestión (J/kg-K)
- T: Temperatura absoluta (288.5 K)
- ρ: Densidad de la mezcla aire-GLP (kg/m³)
- R_u: Constante universal de los gases (8,314.3 J/kg_{mol}-K)
- M_M: Masa molar de la mezcla aire-GLP (kg/kg_{mol})

Sustituyendo la expresión (IV.XXII) en la ecuación (IV.XX) se llega a lo siguiente:

$$\rho = \frac{P_3 - P_4}{\frac{v_4^2}{2} - \frac{v_3^2}{2}} = \frac{\rho \alpha - P_4}{\frac{v_4^2}{2} - \frac{v_3^2}{2}} = \frac{\rho \alpha - P_4}{\beta}; \text{ con } \beta = \frac{v_4^2}{2} - \frac{v_3^2}{2} \quad \dots\text{(IV.XXIII)}$$

De tal suerte que la densidad de la mezcla queda en función de la presión P_4 y los términos nombrados como α y β . Reescribiendo la expresión (IV.XXIII) se llega a:

$$\rho = \frac{-P_4}{\beta - \alpha} = \frac{P_4}{\alpha - \beta} \quad \dots\text{(IV.XXIV)}$$

Efectuando las operaciones correspondientes resulta que la densidad de la mezcla aire-GLP resulta igual a 1.3367 kg/m^3 . Dado que el gasto de la mezcla que se registra a través del área total equivalente de los puertos de combustión, presumiendo que viaja a una velocidad de 0.46 m/s (velocidad de la flama del GLP) asciende a $2.4036 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, es posible determinar el número de moles de mezcla que esa cantidad representa. Ello se consigue mediante la expresión siguiente:

$$\dot{n}_{Mezcla} = \frac{\dot{V}\rho}{M_M} \quad \dots\text{(IV.XXV)}$$

Donde:

\dot{n}_{Mezcla} : Flujo en moles de la mezcla aire-GLP (mol/s)

\dot{V} : Gasto de la mezcla aire-GLP (m^3/s)

ρ : Densidad de la mezcla aire-GLP (kg/m^3)

M_M : Masa molar de la mezcla aire-GLP ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{mol}}$)

El flujo de moles de mezcla que resulta es de $1.015 \times 10^{-5} \text{ mol/s}$. Ahora bien, puesto que en 1 mol de mezcla aire-GLP hay 0.11 mol de GLP, el flujo másico de GLP que corresponde es de $1.1173 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{GLP}}/\text{s}$, los cuales equivalen a $5.5454 \times 10^{-5} \text{ kg}_{\text{GLP}}/\text{s}$.⁷⁴ Mediante la densidad del GLP, que es de en estado gaseoso es $2.074 \text{ kg}/\text{m}^3$, y su poder calorífico inferior, que en las mismas condiciones es de $93,590.2 \text{ kJ}/\text{m}^3$, se puede determinar finalmente el flujo de energía (potencia) que aporta el GLP:

$$P_t = \frac{\dot{m} \cdot PC_{\text{GLP}}}{\rho_{\text{GLP}}} \quad \dots\text{(IV.XXVI)}$$

Donde:

P_t : Potencia térmica en virtud del flujo de GLP (kW)

\dot{m} : Flujo de GLP ($\text{kg}_{\text{GLP}}/\text{s}$)

PC_{GLP} : Poder calorífico del GLP en estado gaseoso ($93,590.2 \text{ kJ}/\text{m}^3$)

ρ_{GLP} : Densidad del GLP en estado gaseoso ($2.074 \text{ kg}/\text{m}^3$)

La potencia resultante es 2.50 kW . Por último, asumiendo una eficiencia del quemador de 60% , la potencia térmica del quemador, entendida ésta como la energía calorífica que efectivamente se transmite al recipiente que contiene el alimento y superficies inmediatas, es de 1.50 kW . Así entonces, será éste el valor que se considere para la ejecución de cálculos o proyecciones posteriores.

IV.5.2 – Consideraciones para el empleo del biogás en el equipo de combustión

De acuerdo a los cifras anteriores, los $122 \text{ MJ}/\text{día}$ que proveería el biogás serían suficientes para mantener encendidos los tres quemadores de la estufa poco más de 4.5 horas continuas. Si duda es un lapso breve, sobre todo al contrastarlo con los periodos habituales de

⁷⁴ Considerando, con base en la composición típica del GLP que se expende en territorio nacional, que la masa molar del GLP es aproximadamente $49.63 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{mol}}$.

funcionamiento de equipos de combustión frecuentemente usados en establecimientos dedicados a la preparación y venta de alimentos. No obstante, en el caso del restaurante seleccionado, la estufa exterior se mantiene encendida por lo regular entre las 14 horas y hasta cerca de las 18 horas. Es decir, el periodo de funcionamiento normalmente no rebasa las 4 horas por día. De esta forma, según las cifras estimadas, se puede aseverar que la producción esperada de biogás bastaría para reemplazar en su totalidad al GLP que se consume en la estufa exterior del restaurante.

El cambio de gas combustible, al pasar de GLP a biogás, demanda de una serie de modificaciones para lograr que los quemadores funcionen de modo eficiente. Los equipos de combustión domésticos y para el pequeño comercio generalmente están diseñados de fábrica para operar con GLP, o bien en casos excepcionales con gas natural. De ahí que sea necesario efectuarles algunas modificaciones para que sean capaces de funcionar de forma eficiente y segura con biogás. Tales modificaciones son necesarias a consecuencia de las diferencias entre los distintos energéticos, esencialmente en términos de flujo de combustible y de cantidad de aire requerido como comburente (Walsh y col., 1988). Asimismo, parámetros como el poder calorífico del combustible, la velocidad de flama, la presión de operación y la potencia térmica (o lumínica) del artefacto tienen injerencia en esos cambios.

La principal de las modificaciones que se realiza tiene que ver con el diámetro del orificio del inyector⁷⁵ del quemador, el cual regula el flujo y la velocidad de salida del combustible. De los dos parámetros anteriores depende el correcto mezclado del combustible con el comburente (Parish, 1986). Así, cuando se muda de GLP a gas natural, el orificio debe ser mayor. Si el cambio es por biogás, el orificio deberá ser todavía más grande debido a que son otras las cualidades del biogás: Poder calorífico, densidad, presión de salida y relación aire-combustible.

Con relación al orificio del inyector, es importante mencionar que en él se registra una caída de presión cuya magnitud aumenta conforme se reduce el poder calorífico y la densidad relativa⁷⁶ del combustible que se desea utilizar. Tal caída de presión puede determinarse a través de la ecuación siguiente (Walsh y col., 1988):

$$\frac{P_{gas-A}}{P_{gas-B}} = \left(\frac{PC_{gas-A}}{PC_{gas-B}} \right)^2 \cdot \frac{\delta_{gas-B}}{\delta_{gas-A}} \quad \dots[IV.XXVII]$$

Donde:

P_{gas-A}/P_{gas-B} : Relación entre las presiones del combustible original A y el nuevo combustible B

PC: Poder calorífico, MJ/m³

δ : Densidad relativa respecto del aire

En el caso que aquí se analiza, el cambio de gases combustibles se llevaría a cabo de GLP a biogás. Para el GLP, los valores de PC y δ son, respectivamente, 93,590.2 kJ/m³ y 2.01. En el caso del biogás, 19,990 MJ/m³ y 0.94. Al sustituir los valores correspondientes a cada parámetro en la expresión (IV.XXVII) la relación $P_{GLP}/P_{Biogás}$ resulta de 10.25. El interés en conocer este dato reside en que, de acuerdo con los hallazgos del físico suizo Daniel Bernoulli,

⁷⁵ Se refiere a la abertura de sección generalmente circular por donde ingresa el combustible para luego mezclarse con el comburente, aire en la mayoría de las veces, y finalmente quemarse para generar la energía térmica.

⁷⁶ Relación entre la densidad de una sustancia dada y la densidad de una sustancia de referencia. Para las densidades relativas de los gases generalmente se toma como referente la densidad del aire en condiciones normales (15 °C y 1 atm). Hasta hace algún tiempo la densidad relativa solía denominarse gravedad específica.

el incremento en la presión de un fluido conlleva una disminución en la velocidad de su caudal⁷⁷, y dado que se pretende asegurar un cierto gasto de combustible, deben ajustarse en las debidas proporciones tanto el diámetro del orificio del inyector como la presión de alimentación del nuevo combustible.

La intercambiabilidad entre dos gases combustibles se refiere a la posibilidad de entregar indistintamente con uno u otro, y sin que medie modificación alguna sobre el quemador, la misma potencia térmica en el marco de una combustión limpia sin desprendimiento o retroceso de flama. Un parámetro muy útil en este ámbito es el denominado Índice de Wobbe (W). Este índice se asocia con la velocidad de transporte de energía a través de los conductos de entrada de los equipos que se alimentan con algún gas combustible (Bazán y Ortiz, 2009). El W de un gas combustible en específico se calcula con ayuda de la siguiente fórmula:

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{\delta_x}} \quad \dots[\text{IV.XXVIII}]$$

Donde:

PCS: Poder calorífico superior del gas combustible, MJ/m³

δ_x : Densidad relativa del gas combustible con respecto al aire

Dado que el biogás no es intercambiable con ningún gas combustible que se expendan de forma comercial (Rivard, 1994), es inevitable llevar a cabo los ajustes que se han venido comentando, a modo de cumplir con los requisitos de intercambiabilidad. En esta misma tónica, los valores correspondientes al diámetro necesario del orificio del inyector y a la presión de alimentación del gas combustible, se obtienen mediante las expresiones abajo mostradas (Orth, 1982; Rivard, 1994):

$$D_{sustituto} = D_{original} \left(\frac{W_{original}}{W_{sustituto}} \right) \quad \dots[\text{IV.XXIX}]$$

$$P_{sustituto} = P_{original} \left(\frac{W_{sustituo}}{W_{original}} \right)^2 \quad \dots[\text{IV.XXX}]$$

Donde:

D: Diámetro del orificio del inyector, mm

W: Índice de Wobbe, MJ/m³

P: Presión de alimentación, cm H₂O

Se sabe que el diámetro original del orificio del inyector de los quemadores de la estufa es de 0.8 mm, aproximadamente 1/32", que la presión de alimentación para el GLP es de 28 cm H₂O, y que los índices de Wobbe para el GLP y el biogás son 66.01 MJ/m³ y 20.62 MJ/m³, respectivamente. Por tanto, al emplear las ecuaciones (IV.XXIX) y (IV.XXX), el nuevo diámetro requerido del orificio del inyector para que el quemador opere con biogás aumentaría a 2.56 mm, alrededor de 1/10", y la presión de alimentación descendería a 2.73 cm H₂O. Asimismo, el diámetro de los puertos de combustión del quemador también deberá incrementarse a un valor de entre 5.0 - 6.0 mm (13/64" - 15/64"), en un número suficiente a modo de totalizar un área equivalente a 400 a 600 mm² (Khandelwal y Mahdi, 1986; Fulford, 1996).

⁷⁷ Si bien los descubrimientos del físico Daniel Bernoulli, en particular el afamado teorema que lleva su nombre, pertenecen formalmente al campo de la hidrodinámica, pueden invocarse, con las debidas reservas, para facilitar el análisis y la comprensión de fenómenos donde participan otros tipos de fluidos, gases en este caso.

Si el aumento del área del orificio del inyector para admitir el uso del biogás es permanente, el quemador mostrará un desempeño deficiente en dado caso de que, por diversas razones, sea necesario retornar al combustible original (Walsh y col., 1988). Esto es particularmente relevante en vista de que la producción fluctuante de biogás a menudo hace necesaria la implementación de un arreglo que permita el uso del biogás junto con uno o varios combustibles de respaldo, como puede ser el GLP o el gas natural. Esta modalidad de aprovisionamiento, que en cierta forma podría considerarse dual, concede mayor confiabilidad en la operación de los equipos que son esenciales en una actividad o proceso determinado.

En ese sentido, una de las alternativas para flexibilizar el uso de combustibles consiste en conformar una mezcla con los distintos energéticos, por ejemplo el biogás y los que se tienen de apoyo. A partir de las propiedades de esa mezcla, se llevan a cabo las modificaciones sobre los artefactos de combustión. Otra opción, más aconsejable para unidades pequeñas de producción de biogás, consiste en instalar quemadores para cada combustible. De esta manera es posible seleccionar entre uno u otro en función de la disponibilidad del biogás.

Esta última configuración es la que se adoptará para la estufa del restaurante, de modo tal que sea capaz de utilizar biogás y, ante cualquier imprevisto que afecte la generación o suministro del biogás, también GLP, como un energético de respaldo. Lo anterior se llevará a cabo únicamente para la estufa exterior del restaurante. El arreglo propuesto consiste en instalar un conducto para el suministro de biogás, paralelo al que abastece de GLP, junto a un juego adicional de quemadores, sobre los cuales se efectuarían las modificaciones descritas con anterioridad. Obviamente se conservarían tanto la tubería de suministro como los quemadores originales que operan con GLP (Figura IV.19).

IV.6 – Generalidades en torno de la seguridad del uso de biogás como combustible

Al igual que ocurre con la mayoría de las sustancias con propiedades combustibles, la producción, distribución, almacenamiento y utilización del biogás como recurso energético alternativo plantean una serie de riesgos de distinta magnitud y naturaleza. En este sentido, Walsh y col. [1988] distinguen entre tres clases de riesgos asociados a la operación de un sistema de producción y utilización de biogás:

a) Riesgo toxicológico – Está asociado a la presencia en el biogás de gases deletéreos y asfixiantes. El CH_4 es un gas incoloro e inodoro que en altas concentraciones sofoca a las personas. La exposición al CH_4 deriva en una disminución del nivel de oxígeno disponible para la respiración, que, de continuar, ocasionaría la muerte del individuo. El H_2S es un gas incoloro con un olor comparable al emanado de huevos descompuestos. Se trata de una sustancia sumamente tóxica y que por tanto debe ser removida o, mejor aún, eliminada por completo del biogás tan pronto como éste se produzca. Los síntomas producto de una exposición al H_2S van desde aquellos relativamente tolerables como irritación en ojos y vías respiratorias, hasta los más severos, como convulsiones, pérdida del conocimiento y, en casos extremos, la muerte.

Otro gas del que es preciso tener cautela es el CO_2 . Este es un gas que carece de color y olor, y al igual que el CH_4 , es un gas asfixiante cuando la exposición es prolongada y las concentraciones son elevadas. Los síntomas iniciales que siguen a la inhalación de CO_2 incluyen dolor de cabeza, inquietud, mareos y sudoración. De considerarse necesario, se pueden instalar instrumentos que detectan la presencia de biogás en sitios donde éste tendería a acumularse de haber fugas accidentales en tuberías o en el reservorio. Para tal efecto, existen los sensores de gases combustibles que utilizan sustancias que

reaccionan fácilmente con gases inflamables (Walsh y col., 1988). Los sensores de semiconductor metal-óxido son útiles para advertir la presencia de gases que contienen hidrógeno como, tratándose del biogás, CH_4 , H_2 y H_2S . También están los sensores electroquímicos, capaces de reaccionar ante el H_2 , CO , CO_2 y H_2S .

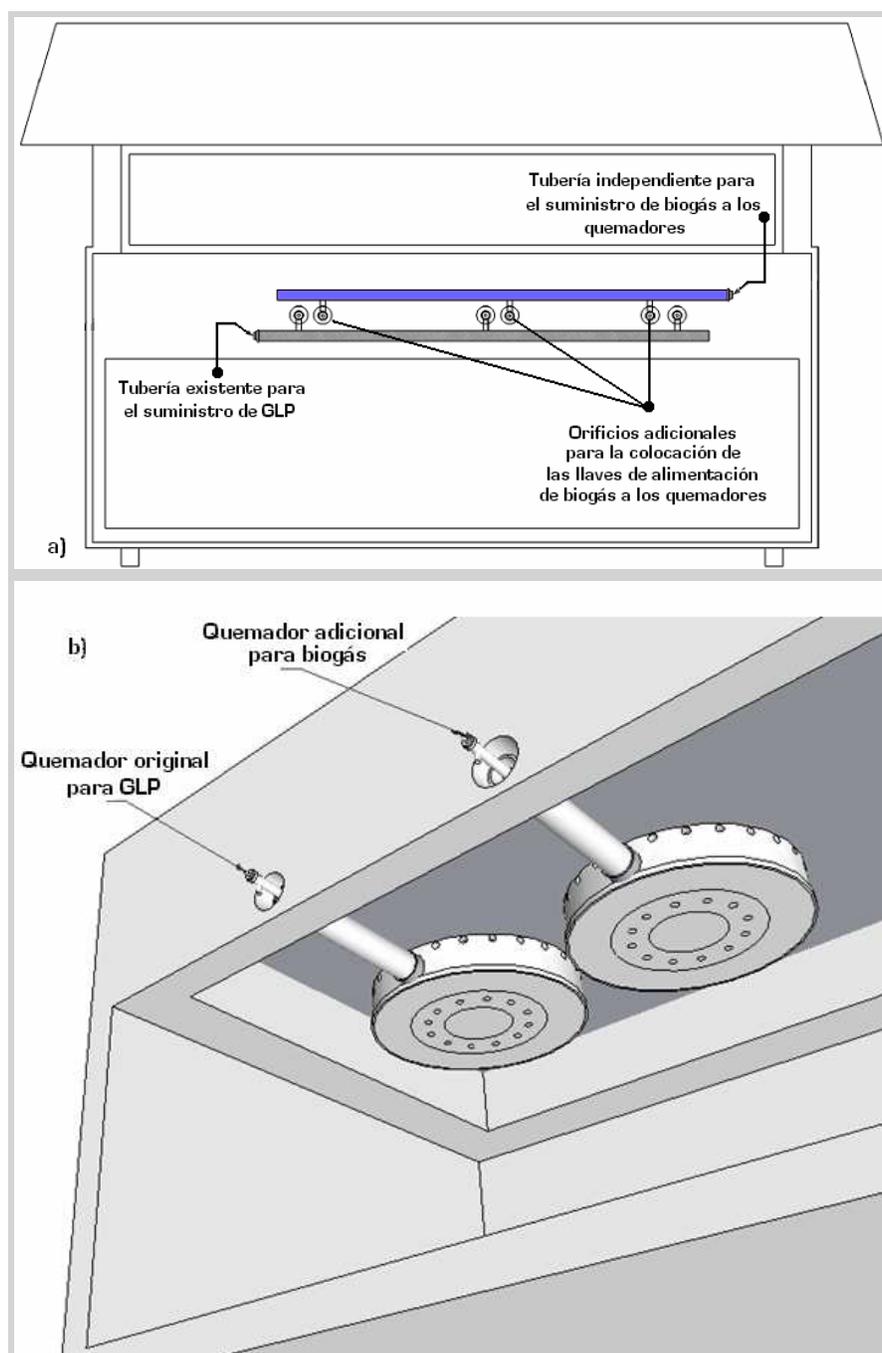


Figura IV.19 - Adaptaciones sugeridas para el suministro del biogás (a) e incorporación de un juego adicional de quemadores (b)

b) Riesgos de incendio y explosión - Fundamentalmente ligados a la presencia significativa de CH_4 en el biogás. En la valoración de estos riesgos entran en consideración elementos tales como:

- *Densidad de los gases* – Bajo las mismas condiciones de temperatura y presión, el CH₄ es más ligero que el aire ($\delta_{\text{CH}_4}=0.5$). Así, en caso de fuga el CH₄ tenderá a desplazarse en dirección ascendente hacia la atmósfera, o al techo que resguarda al reservorio. Por el contrario, el H₂S se concentrará en las zonas bajas, dado que es más denso que el aire ($\delta_{\text{H}_2\text{S}}=1.2$). Aquí se aprecia la importancia de favorecer una ventilación suficiente, en particular en el sitio donde se encuentra el reservorio de biogás.

- *Rango de inflamabilidad* - El límite inferior de inflamabilidad [explosión] se refiere a la concentración mínima posible de combustible en aire para iniciar y sostener la reacción de combustión. El límite superior corresponderá, en cambio, a la concentración máxima permitida de combustible en aire. Los valores de esos límites para el CH₄ son, respectivamente, 5 y 15% mientras que para el H₂S son 4 y 46%. A juzgar por los valores dados, se puede deducir que en tanto se mantenga una concentración alta de CH₄, como las que son típicas del biogás, la probabilidad real de incendio o explosión es muy baja.

- *Temperatura de auto-ignición* – Es la temperatura a la cual una mezcla aire-combustible, en razón del rango de inflamabilidad del energético, arde sin que la necesidad de una fuente externa de ignición, como una chispa, por ejemplo. Con relación al biogás, tanto el CH₄ como el H₂S tienen temperaturas de auto-ignición elevadas: 343° C para el CH₄, y 288° C para el H₂S. De ahí se sigue que la posibilidad de ocurrencia de un incendio o explosión por esta vía es muy remota.

c) Riesgos físicos – Están relacionados con la operación misma de la planta, y son comparables a los advertidos en muchas de las instalaciones industriales. Los principales riesgos físicos en las unidades de producción de biogás están asociados a la aparición de presiones positivas y negativas durante la operación de la unidad. Las presiones positivas, de incrementarse de manera significativa, pueden dar lugar a fugas de biogás que amenazan la integridad física del personal y del entorno aledaño a la planta. Para evitar esta situación, se instala cuando menos una válvula de alivio con la cual evacuar de forma controlada el biogás cuando éste alcanza un nivel de presión determinado.

Las presiones negativas se suscitan con la extracción del efluente del digestor, ya que a su salida deja un espacio que no puede ser ocupado por aire, lo que produce una presión de vacío. En estas circunstancias la cubierta o paredes del digestor pueden colapsar, a la par de ocasionar un eventual retorno de la flama desde el punto de combustión del biogás. Ambos escenarios podrían en riesgo al personal y a la instalación. Cabe apuntar que los sistemas de baja presión son, en general, menos propensos a padecer problemas vinculados con el nivel de presión (Walsh y col., 1988).

En el biogás están presentes compuestos químicos perjudiciales en distintos grados para la salud humana, máxime que se encuentran en estado gaseoso, lo cual hace que se esparzan con rapidez y de manera sigilosa. No obstante, dadas las concentraciones típicas en que se hallan dichas sustancias en el biogás, su toxicidad se torna severa sólo ante una exposición e inhalación directas y por tiempos relativamente largos. Asimismo, el olor característico de algunos de los constituyentes del biogás, facilita en alguna medida la detección de fugas y, por ende, la disminución de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado. A lo anterior ayuda la ligereza del biogás con respecto del aire, favoreciendo la pronta dispersión en dirección ascendente del biogás, que por obvias razones es más efectiva en espacios abiertos.

Pese a ello, el riesgo de incendio o explosión aparejado a la producción, conducción, almacenamiento y utilización del biogás es indiscutible, como lo es en mayor o menor medida para cualquier otro combustible. En este sentido, la vigilancia y control de la presión de operación son de enorme importancia en la prevención de fugas de biogás. Es menester mantener en todo momento la presión por debajo del nivel máximo tolerable por tuberías y equipos. La correcta instalación, el mantenimiento oportuno y la observación de medidas elementales de seguridad, son igualmente indispensables para la minimización de los riesgos inherentes a la operación de cualquier unidad de producción de biogás.

IV.7 - Secuencia completa del proceso propuesto

El diagrama mostrado en la Figura IV.20 da cuenta de las distintas etapas propuestas para someter a tratamiento anaerobio los residuos sólidos orgánicos del restaurante, y además captar, limpiar y aprovechar con propósitos energéticos el biogás emanado de tal proceso. Se presentan también los destinos propuestos para los efluentes líquidos y sólidos (lodos digeridos) del proceso de descomposición anaerobia. Las etapas aparecen agrupadas en cinco apartados que se denominan:

- a) Acopio y traslado de los residuos sólidos orgánicos
- b) Pre-tratamiento y obtención del sustrato de alimentación
- c) Degradación anaerobia
- d) Captación, limpieza y aprovechamiento del biogás
- e) Manejo y destino de los lodos digeridos

El apartado *acopio y traslado de los residuos sólidos orgánicos* comprende la recolección de la componente orgánica de los residuos sólidos que se generan en el restaurante, junto con su posterior acarreo al sitio donde se localizan los digestores. En *pre-tratamiento y obtención del sustrato de alimentación* están incluidos aquellos procedimientos necesarios para la elaboración del sustrato con las características idóneas para alimentar a los digestores. Enseguida, la *degradación anaerobia*, que se refiere al fenómeno bioquímico mediante el cual el sustrato preparado a partir de los residuos orgánicos se descompone en las condiciones ya conocidas y del cual se desprende el biogás junto con otros efluentes. El biogás resultante de la digestión ingresa entonces a la sección de *captación, limpieza y aprovechamiento del biogás*. Aquí se incluye la evacuación del biogás de ambos digestores, pero predominantemente de R-II, seguida de su conducción hacia los dispositivos de remoción de H_2O y H_2S . También comprende el registro del volumen de biogás producido y su acopio en el reservorio a baja presión. La última etapa de esta sección corresponde al aprovisionamiento del biogás al equipo de combustión, donde ocurre su conversión en energía térmica útil para el uso final de energía para cocción de alimentos. El apartado final es el concerniente al *manejo y destino de los lodos digeridos*. Aquí se aprecia la separación de las fracciones sólida y líquida. Para la primera el destino propuesto es su empleo como acondicionador de suelos para algún tipo de cultivo, en tanto que la segunda, reemplaza el consumo de agua fresca en el proceso de preparación de la alimentación del sistema anaerobio.

En párrafos siguientes se describen con un tanto más de detalle las operaciones involucradas en los apartados antes mencionados, con la inclusión de diagramas complementarios que muestran su función y posición específicas en el proceso propuesto. La finalidad de ello es procurar la comprensión cabal de la constitución y operación de la planta. Así, el diagrama de la Figura IV.21 alude a las operaciones directamente vinculadas con la realización del proceso de digestión y del manejo de sus efluentes no gaseosos. La Figura IV.22 ilustra la trayectoria seguida por el biogás a la salida de los digestores, con la finalidad de darle un uso energético.

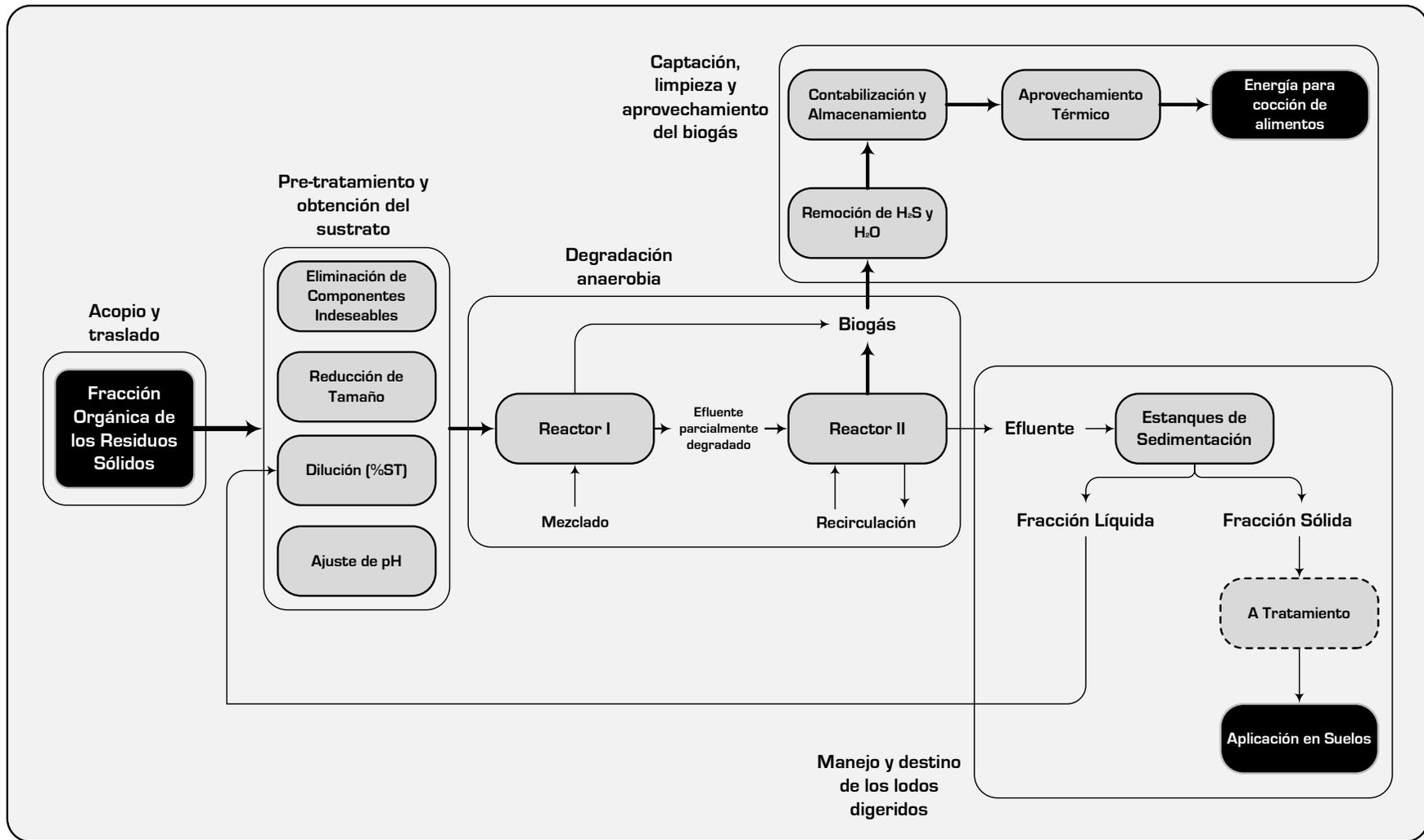


Figura IV.20 – Secuencia del tren de tratamiento anaerobio aplicado a la planta de biogás

IV.7.1 - Acopio, traslado y pre-tratamiento de los residuos para la obtención del sustrato

El paso inicial es la recolección de los residuos sólidos orgánicos (RSO) generados en el establecimiento. Los materiales indeseables que pudieran contener se extraen de forma manual. Luego de algún tiempo se espera prescindir de este paso, toda vez que se insistirá en la importancia de la correcta separación de los RSO al interior del restaurante. Los RSO seleccionados se depositan en un **contenedor** para registrar su peso y anotar algunas otras observaciones de interés. Enseguida, los RSO se vierten en una **tolva** que los conduce hacia un **tritador**. En ese mismo momento, se dosifica agua suficiente de modo que, además de facilitar la molienda, se conserve la proporción 1:1 (1 litro de agua por 1 kg de RSO), la cual asegura la concentración correcta de ST en el sustrato (inferior a 15%). En un **tanque receptor** se deposita el sustrato obtenido. Aquí mismo se homogeneiza el sustrato para luego medir y neutralizar, de ser preciso, su valor de pH, ya sea incorporando una base o un ácido, según sea el caso. Hecho lo anterior, pueden tomarse las muestras necesarias para efectuar los análisis de laboratorio que se consideren pertinentes como parte de un plan de seguimiento del desempeño del proceso anaerobio.

IV.7.2 - Alimentación al reactor anaerobio R-I

Partiendo de un escenario con ambos reactores inicialmente vacíos y todas las válvulas cerradas, el procedimiento para cargar al **reactor R-I** es como sigue:

- 1** - Con el sustrato en el **tanque receptor**, se abren las válvulas **V-1, V-2 y V-3**.
- 2** - Se enciende la **bomba** para succionar el sustrato y depositarlo en el **reactor R-I**; la válvula **V-I**, situada de arriba del **reactor R-I** también se abre con objeto de permitir la salida del aire inicialmente presente en el reactor.
- 3** - Conforme aumenta el nivel en el **reactor R-I**, se enciende el **mezclador** para evitar, en la medida de lo posible, la estratificación del medio en descomposición.
- 4** - De diferentes alturas, **se extraen muestras** para monitorear el proceso.
- 5** - Cuando el **reactor R-I** esté próximo a llenarse (1,250 L), se abren las válvulas **V-4 y V-5** para que comience la transferencia del sustrato parcialmente degradado hacia el **reactor R-II**; la válvula **V-II** se abre para evacuar el aire de su interior.
- 6** - Entre **V-4 y V-5** existe un punto de muestreo para caracterizar el efluente de **R-I**.

IV.7.3 - Alimentación al reactor anaerobio R-II

Una vez lleno el **reactor R-I**, la carga del **reactor R-II** se realiza de manera simultánea con la alimentación del **reactor R-I**, tal como se describió en la sección de arriba. En la medida en que la cantidad de sustrato depositado en el **reactor R-II** se aproxime a su volumen de trabajo (5,000 L), será necesario efectuar su recirculación a manera de favorecer el proceso de conversión de los compuestos intermedios de la digestión en CH₄. Para realizar la recirculación, el procedimiento es el siguiente:

- 1** - Se cierran las válvulas **V-1, V-2 y V-4** y se abren **V-5, V-6, V-8 y V-9**.
- 2** - Se enciende la **bomba**.
- 3** - La duración y periodicidad de la recirculación del medio en descomposición en el **reactor R-II**, al igual que el mezclado en el **reactor R-I**, se determinarán conforme al mejor rendimiento observado en distintos ensayos practicados ya durante la operación rutinaria de la planta.

El **reactor R-II** cuenta con un punto de muestreo cerca de su base para extraer pequeñas cantidades del medio en descomposición a modo de someterlas a distintas pruebas de

laboratorio. En el momento en que ambos reactores se encuentren llenos, la próxima carga que se vierta en el **reactor R-I**, en automático desplazará, idealmente, un volumen idéntico hacia el **reactor R-II**, y de éste saldrá la misma cantidad de lodos digeridos hacia los **estanques de sedimentación**. Con los **reactores R-I** y **R-II** totalmente llenos, la alimentación del sistema anaerobio se efectúa como sigue:

- 1** - Se cierran las válvulas **V-8**, **V-9** y **V-10**.
- 2** - Se abren las válvulas **V-1**, **V-2**, **V-3**, **V-4**, **V-5**, **V-6** y **V-7**.
- 3** - Se enciende la **bomba** el tiempo necesario para succionar la mayor cantidad posible de sustrato del **tanque receptor**.
- 4** - Al término de la operación de alimentación, y luego del mezclado y recirculación en los **reactores R-I** y **R-II**, respectivamente, se cierran las válvulas **V-3**, **V-4**, **V-5** y **V-7**.
- 5** - Las válvulas **V-I** y **V-II** permanecerán, preferentemente, abiertas desde el momento en que se detecte producción de biogás.

IV.7.4 - Estanques de sedimentación

Los lodos digeridos procedentes del **reactor R-II** se depositan en uno de los **estanques de sedimentación**, con la intención obvia de separar sus fases precipitando la fracción sólida y situando por encima la porción líquida. Luego de alcanzada cierta altura en el primero de los **estanques de sedimentación**, la fracción líquida del lodo digerido fluye hacia un segundo estanque, éste de menor volumen, donde se almacena y queda disponible para ser usada en la etapa de preparación del sustrato, en específico en la trituración y dilución de los residuos. En un inicio, el traslado del líquido residual hasta el área de preparación del sustrato deberá hacerse de forma manual. Posteriormente podrá evaluarse la pertinencia y viabilidad de efectuarlo por bombeo. De ambos **estanques de sedimentación** es posible realizar observaciones y toma de muestras para llevar a cabo pruebas o análisis de laboratorio.

IV.7.5 - Limpieza de las líneas de conducción del sustrato

Ya sea por cuestiones de mantenimiento o por cambios en el ritmo normal de actividad, las tuberías principales de conducción del sustrato podrán limpiarse a efecto de extraer el remanente de las operaciones de alimentación y recirculación de los reactores. Para ello se efectúan los pasos siguientes:

- 1** - En el **tanque receptor de sustrato** se vierte una cantidad suficiente de agua, no menos de $\frac{3}{4}$ de la capacidad total de dicho tanque.
- 2** - Se abren las válvulas **V-1**, **V-2** y **V-8** y se cierran **V-3**, **V-4**, **V-5** y **V-9**.
- 3** - Se enciende la **bomba**.
- 4** - La descarga del líquido de limpieza se hace a través de **V-10**.
- 5** - Se apaga la **bomba**.
- 6** - Se observa el nivel de agua en el **tanque receptor de sustrato**, de ser muy bajo se adiciona líquido.
- 7** - Se abre ahora las válvulas **V-1**, **V-7**, **V-8** y **V-9** y se cierran **V-2**, **V-4**, **V-5** y **V-6**, esto permitirá la purga de la otra línea principal de conducción de sustrato.
- 8** - Se enciende la **bomba**.
- 9** - La descarga se realiza ahora a través de **V-7**.

Cabe apuntar que el volumen de sustrato remanente será mínimo, de tal suerte que no supone, en principio, inconvenientes mayúsculos su manejo y disposición, que bien podría hacerse en el primero de los **estanques de sedimentación**.

IV.7.6 - Conducción, limpieza, almacenamiento y suministro del biogás

Si bien el biogás se genera en ambos reactores anaerobios, se tiene previsto que la generación sea superior en el **reactor R-II**, en virtud de su volumen y el TRH que trae aparejado. Tanto la válvula **V-I** como la **V-II**, instaladas en la parte superior de cada reactor, permanecen abiertas para permitir la evacuación del biogás. Saliendo de los **reactores R-I y R-II**, el biogás tiene la siguiente trayectoria, conforme a lo mostrado en la Figura IV.22:

1 - El biogás pasa por la **trampa de condensación**, situada al nivel más bajo de la tubería de conducción del biogás. Aquí se elimina parte del contenido de humedad (H_2O) del biogás; por medio de la válvula **V-III** se extrae periódicamente el vapor condensado. A través de la **trampa de condensación** igualmente se pueden tomar muestras de biogás para determinar su composición en términos de CH_4 , CO_2 , H_2S , N_2 y otros gases que pueden resultar de interés.

2 - Ingresa luego al **desulfurador**, donde el H_2S se separa del biogás mediante de la técnica de adsorción seca en Fe_2O_3 . El biogás entra por la base del **desulfurador**, atraviesa el lecho de Fe_2O_3 que se encarga de retener químicamente al H_2S , y a la salida se obtiene biogás libre del gas ácido. Dado que el biogás todavía contiene un cierto porcentaje de H_2O , en la parte baja del **desulfurador** se encuentra la válvula **V-IV** que permite la evacuación del vapor que pudiera condensar debido a la expansión del biogás en el cuerpo del **desulfurador**. La **regeneración y sustitución** del lecho de Fe_2O_3 se efectúan cada **12 y 60** días, respectivamente. No obstante, dichos lapsos podrán acortarse o alargarse en función de cómo se perciba la saturación del lecho una vez que el sistema entre en operación.

3 - Enseguida, el biogás se dirige hacia un **serpentín** cuya función es la de propiciar la condensación del vapor de H_2O remanente presente en el biogás. A la salida del **serpentín** el biogás deberá estar completamente deshidratado con lo cual se habrá eliminado otro agente corrosivo. La válvula **V-V**, colocada en la parte baja del **serpentín**, permite drenar el vapor condensado.

4 - Inmediatamente después, el biogás pasa a través de un **medidor** de gas de desplazamiento positivo tipo diafragma para registrar el volumen producido, por ejemplo, durante todo un día. En el conducto de salida del **medidor** se dispone la válvula **V-VI** que comunica con el **reservorio** de baja presión

5 - En el **reservorio** se va depositando el biogás generado a lo largo del proceso de descomposición de los residuos orgánicos. Una vez lleno el **reservorio**, se abre la válvula **V-VII** con lo cual el biogás podrá circular hacia el resto de los componentes en su camino hacia el equipo de combustión del restaurante.

6 - De la línea principal de conducción de biogás sale una derivación hacia la **válvula de alivio – manómetro**. Este dispositivo está ideado para registrar, y al mismo tiempo regular la presión del biogás en los sistemas de conducción y almacenamiento. En la **válvula de alivio – manómetro**, existe un punto de muestreo para extraer biogás a fin de analizar su composición para conocer los porcentajes de CH_4 y CO_2 , y al mismo tiempo, evaluar la efectividad de los procesos de remoción de H_2O , y H_2S , información ésta muy pertinente dado que se trata del biogás que alimentará al **equipo de combustión**.

7 - Colocada en la línea principal de conducción de biogás, a continuación se encuentra la **trampa de llama**, elaborada según lo expuesto en el apartado **IV.4.3**. La esponjilla metálica de la **trampa de llama** deberá remplazarse cuando su estado le impida desempeñar correctamente su función.

8 - Posteriormente, se cuenta con un **regulador de presión** para el ajuste de la presión hasta aquel valor que asegure el funcionamiento seguro y eficiente de los quemadores del **equipo de combustión**.⁷⁸

9 - A un costado del **regulador de presión**, se dispuso un segundo **manómetro** para monitorear la presión con la que se suministra el biogás a los quemadores del **equipo de combustión**. El flujo de biogás de los quemadores se controla mediante **llaves** individuales provistas en el tubo o conducto de suministro del biogás (Figura IV.19-a)

Es importante apuntar que el biogás acumulado inmediatamente después de la entrada en operación del sistema anaerobio **debe liberarse por completo sin intentar quemarlo, puesto que se encuentra mezclado con el aire en un inicio presente en los reactores, en las líneas de conducción y en el resto de los dispositivos.** Puede ocurrir que dicha mezcla sea incombustible, pero es cuando menos igualmente probable que constituya una mezcla dentro del rango de inflamabilidad del biogás. Si esta mezcla se encendiera, la flama podría propagarse fácilmente desde los quemadores hacia el reservorio y los digestores, lo que tendría consecuencias catastróficas. El biogás que se produzca y almacene luego de esa operación de purga, podrá enviarse sin riesgos mayores al **equipo de combustión** para su conversión a energía térmica.

Con relación al empleo del biogás en quemadores para aplicaciones domésticas, Khandelwal y Mahdi (1986) proporcionan una serie de recomendaciones para un uso correcto y seguro de este combustible. De acuerdo con dichos autores, el procedimiento apropiado para encender el quemador de biogás es el siguiente:

- 1** - Se conecta el quemador a la línea de suministro de biogás.
- 2** - La entrada de aire del quemador debe estar completamente cerrada.
- 3** - Se acerca una llama a los puertos de combustión y se abre con cuidado la válvula de suministro de biogás.
- 4** - Para corregir las características de la flama, que seguramente es débil y larga, indicando una combustión ineficiente, se abre la entrada de aire del quemador hasta una posición en la que el biogás en combustión emita un sonido audible.
- 5** - Se ajusta nuevamente la entrada de aire a modo de atenuar un poco el sonido que emite el biogás; la flama ahora deberá ser azul y de 25 a 30 mm de longitud.

Adicionalmente, Khandelwal y Mahdi (1986) enlistan algunas sugerencias en torno al mantenimiento de los quemadores para biogás, de las que conviene destacar las siguientes:

- 1** - Eliminar las partículas de carbono que se depositen en los puertos de combustión y otras áreas del quemador.
- 2** - La válvula de suministro de biogás debe abrirse de forma gradual para evitar quemaduras accidentales en rostro o cuerpo. Esto aplica sobre todo a sistemas con digestores rígidos donde la presión del biogás puede ser elevada.

⁷⁸ En el presente trabajo se obtuvo un valor preliminar de 2.73 cmH₂O para la presión de alimentación del biogás; sin embargo, la presión adecuada para el buen funcionamiento de los quemadores se determinará esencialmente por la vía empírica, lo que significa luego de la puesta en operación del sistema y una vez que se produzca biogás con suficiente contenido de CH₄.

3 - Si se advierte un olor que emana del biogás en combustión, se debe permitir la entrada de un flujo mayor de aire al quemador.

Analizando la información expuesta en éste y en párrafos anteriores, queda claro que tanto la operación como las recomendaciones de seguridad en cuanto al uso de quemadores alimentados con biogás, son comparables a las que postuladas para equipos de combustión que funcionan con otros energéticos en estado gaseoso.

IV.8 – Balance de energía del proceso

Para la elaboración de este balance se toma en cuenta la energía del biogás generado por la descomposición anaerobia de los residuos. Su cuantificación se realiza por medio del poder calorífico correspondiente al contenido presumible de metano, que en este caso se fijó en 56% en vol. El valor obtenido del multiplicar el volumen esperado de biogás por su poder calorífico se contrasta con la energía que consumen los diferentes aparatos que participan en algunas de las etapas del proceso anaerobio que da origen al biogás. De esta forma se tiene información para establecer si es que existe una contribución real del biogás en términos energéticos.

Como se recuerda, se calculó una producción diaria de biogás del orden de 6.10 m³/día con una concentración de CH₄ del 56% en vol. Con esas cifras preliminares, el volumen de CH₄ estaría en torno de los 3.42 m³/día, los cuales representan 122,094 kJ/día considerando el poder calorífico inferior de este gas, que es de 35,700 kJ/m³. Ahora bien, se tiene previsto que la planta de biogás opere a la par del restaurante, dado que es de donde proviene la materia prima para el proceso, es decir, los residuos sólidos orgánicos. Si el establecimiento no presta servicio, no se dispondrá entonces de biomasa para alimentar a los reactores anaerobios. Así pues, se asumirá un factor de planta (factor de ocupación) anual cercano al 70% (260 días por año), el cual es un valor aceptable para una instalación de esta naturaleza.⁷⁹ De modo que a escala anual, la energía que proporcionaría del biogás con las características antes señaladas, ascendería a 31.7 GJ/año.

En cuanto a la energía consumida, es preciso identificar y valorar las cargas que representan los distintos equipos eléctricos involucrados en el proceso propuesto. Así, en la etapa de preparación del sustrato, la molienda de los residuos se efectuará con ayuda de un triturador eléctrico con una potencia de 1,200 W. El tiempo estimado de operación continua de ese aparato es de 40 minutos por día, los cuales parecen suficientes para triturar los 40.46 kg/día de residuos. La energía diaria consumida por este aparato sería entonces de 0.8 kWh (2.88 MJ). Otro equipo eléctrico a considerar es el motor acoplado al mezclador del reactor R-I. La potencia de dicho motor es cercana a los 3, 430 W. Si éste se encendiera 2 horas por día, la energía consumida diariamente sería de 6.86 kWh (24.70 MJ).

Por último, la bomba, necesaria para las operaciones de alimentación al reactor R-I y la recirculación del medio en el reactor R-II, posee una potencia de 1,350 W, y se considera un tiempo de funcionamiento estimado igualmente en 2 horas por día. La energía consumida por este equipo sumaría entonces 2.70 kWh (9.72 MJ). De esta forma, el total de la energía eléctrica consumida ascendería a 10.37 kWh/día (37.30 MJ/día), lo que significa, en base al factor anual de operación del 70%, 2.70 MWh/año (9.72 GJ/año).

⁷⁹ La determinación de este factor se hizo tomando como base el Calendario Escolar de la Universidad Nacional. Se descontaron los días marcados como inhábiles, los periodos de asueto académico y de vacaciones administrativas, así como los días sábado comprendidos en dichos periodos además de todos los días domingo del año. De esta forma, el total obtenido fue de 260 días, los cuales corresponden al 71.23% de los días totales de un año

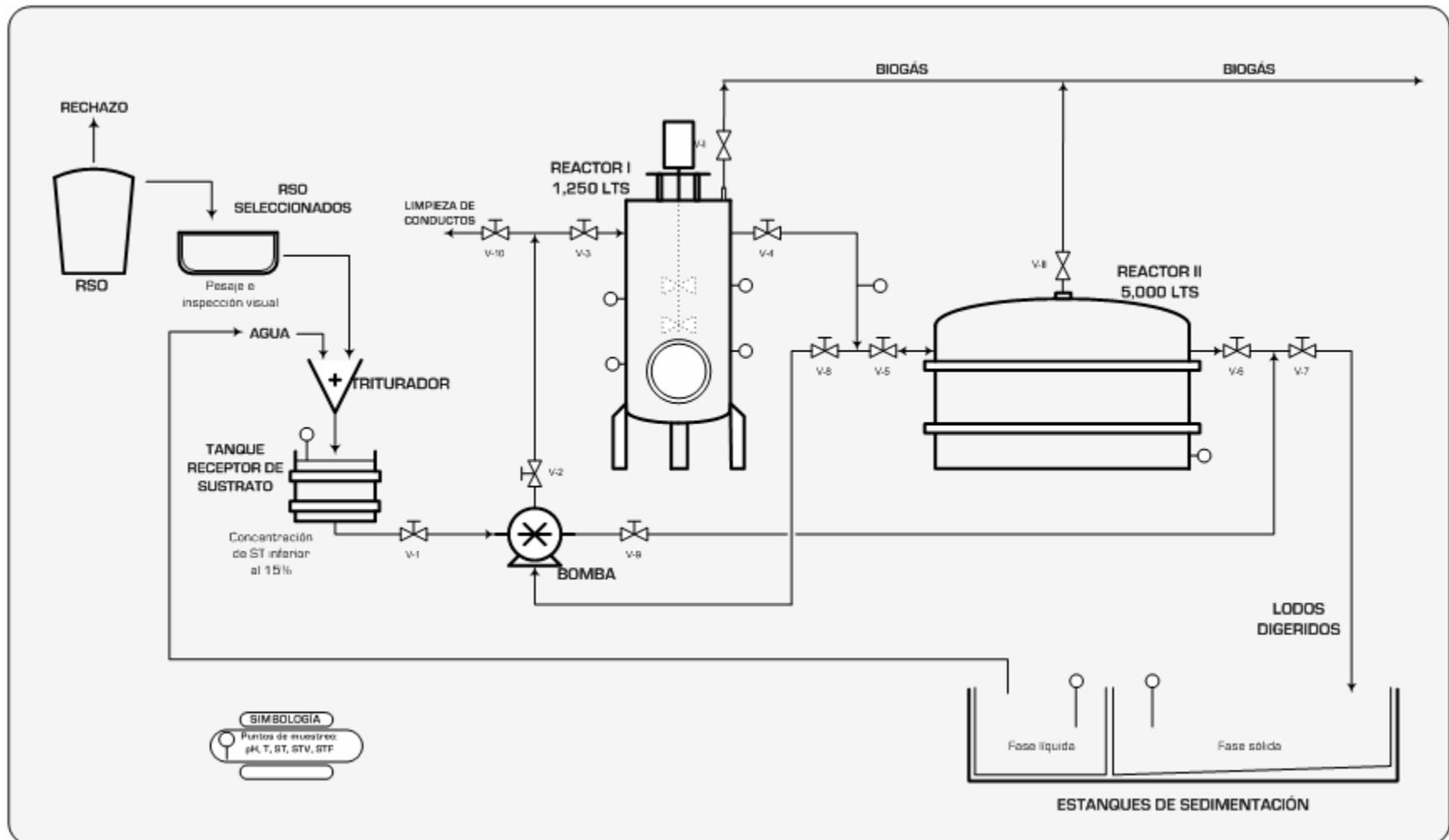


Figura IV.21 - Secuencia y componentes de los procesos de degradación anaerobia y manejo de lodos digeridos

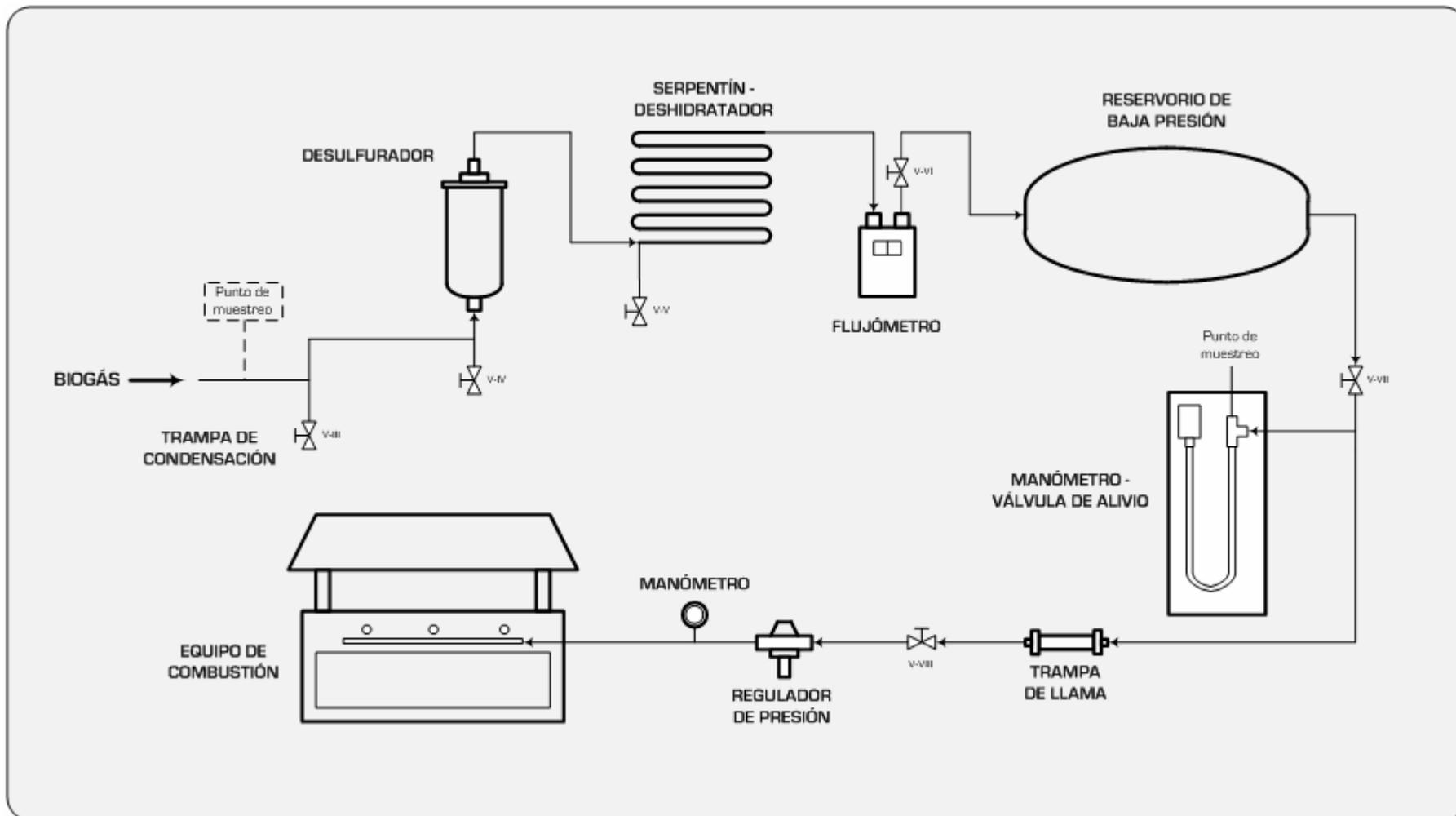


Figura IV.22 – Secuencia y componentes del sistema de conducción, limpieza, almacenamiento y suministro del biogás

De acuerdo con los cálculos precedentes, por cada joule de energía consumida se obtienen 3.26 joules en forma de biogás, lo cual es una proporción a todas luces favorable. Aun si se sustrae la energía no aprovechada en la combustión del biogás (recuérdese que la eficiencia de los quemadores se asumió del 60%), la relación apunta en la misma dirección. Si, por ejemplo, volviendo al total de energía que representa el biogás, se duplicase el tiempo de operación del motor del mezclador y de la bomba, equipos que consume mayor energía eléctrica, la relación sería entonces de 1.7 joules producidos por cada joule que se consume.

Si el tiempo probable de operación de tanto de la bomba como del mezclador del reactor R-II se triplicase, esto es, que se extendiera a 6 horas por día para cada aparato, la relación disminuiría a sólo 1.15 joules generados por cada joule consumido, la cual si bien aún es positiva, está ya cerca de compensar únicamente la energía consumida. Por arriba de 7 horas de funcionamiento diario de ambos aparatos, la relación energía producida a energía consumida se torna negativa, es decir, se consume más energía de la que se obtiene por medio del biogás producido.

IV.9 – Evaluación económica

En este apartado se confrontan los costos y beneficios puestos en unidades monetarias, que reporta la propuesta de la planta de biogás que se ha venido desglosando a lo largo del presente documento. Los resultados de esta evaluación son referidos a un conjunto de indicadores que se usan de forma regular para expresar la rentabilidad económica de proyectos de inversión en distintos ámbitos. Para tal propósito, se requiere definir, con la mayor minuciosidad posible, el monto del desembolso inicial, además de las erogaciones periódicas de carácter tanto fijo como variable que se considera deberán realizarse a lo largo de la vida del proyecto. Eso mismo se hace para los ingresos que se pronostica generará el proyecto una vez puesto en marcha. Todo ello, junto con la consideración de algunos otros parámetros afines a este propósito, posibilita la ejecución y elaboración de una evaluación económica medianamente aceptable, que ponga de relieve la rentabilidad de la propuesta sujeta a análisis.

Los atributos técnicos y operativos más relevantes de la planta de biogás, indispensables para emprender la evaluación económica, están asentados en la Tabla IV.19. La inversión inicial para la ejecución de la propuesta aquí presentada se estimó en \$129,063 pesos, tal como se aprecia de forma pormenorizada en la Tabla IV.20. Para los costos fijos, es decir, todos aquellos desembolsos que no se relacionan con el nivel de producción, y que por lo general se asume que permanecen constantes a lo largo de todo el periodo para el cual se efectúa la evaluación, se asignó de manera preliminar un monto de \$1,000 anuales por concepto de mantenimiento general programado, anticipando un 3% anual de aumento para esta erogación. En este mismo rubro de los costos fijos, se consideró asimismo un desembolso de \$5,000 con una periodicidad de 5 años, como parte de un plan de sustitución de equipo y remozamiento integral.⁸⁰

Por otro lado, los costos variables, enteramente dependientes del nivel de producción, se componen, en este caso, de los consumos proyectados de energía eléctrica, agua potable y de otras erogaciones como las debidas a reactivos para el control de pH, a la sustitución del

⁸⁰ En el rubro de costos fijos también se incluyen, entre otros, los incurridos debido a salarios y prestaciones del personal requerido para la producción del bien o la prestación del servicio que plantea el proyecto de inversión. En este caso, dado el carácter demostrativo y didáctico de la planta, tanto su operación como su mantenimiento estarán a cargo de estudiantes de la propia Universidad Nacional, en particular de la Facultad de Ingeniería y de otras afines. De tal suerte que formalmente no se tendrán erogaciones por los conceptos de sueldos y prestaciones.

lecho para la remoción de H₂S, indumentaria y equipo de trabajo, refacciones y reparaciones diversas. En cuanto al consumo de energía eléctrica, se considera un costo de \$1.2482 por kWh, mismo que se le asignará un incremento anual de 11.1%.⁸¹ Para el consumo de agua potable, la cual se emplea para propósitos generales (aproximadamente 50 L/día), no así en la preparación del sustrato, en donde se tiene previsto utilizar el sobrenadante, se considera un costo de \$43.38 por m³, éste con un crecimiento de 3% anual.⁸² Se incluye también un monto de \$2,500 anuales, igualmente con un aumento provisional del 3% por cada año. En este monto están comprendidos aquellos gastos vinculados a la operación y al mantenimiento de la planta de biogás, para este último, independientemente de aquellas otras con carácter fijo que ya fueron consideradas. Así, partiendo de la producción anual pronosticada de biogás, el costo variable asociado al consumo de electricidad es de \$2.12 por m³ de biogás, el correspondiente al agua potable \$0.36 por m³ biogás y para los otros costos el monto es \$1.58 por m³ biogás, lo que hace un costo variable total de \$4.06 por m³ de biogás.

Tabla IV.19 – Atributos técnicos y operativos de la planta de biogás

Atributo	Valor estimado	Magnitud Anual*
Residuos sólidos orgánicos procesados	40.46 kg/día	10.52 t/año
Consumo de energía eléctrica	10.36 kWh/día	2,693.60 kWh/año
Consumo de agua potable	0.050 m ³ /día	13.00 m ³ /año
Producción de biogás	6.10 m ³ /día	1,586.00 m ³ /año
Porcentaje de CH₄	56%	56%
Volumen de CH₄	3.42 m ³ /día	888.16 m ³ /año
Equivalente energético	122.09 MJ/día (1.41 kW)	31.71 GJ/año

*Considerando el Factor de Planta de 71.23% (260 efectivos por año)

Los ingresos en este caso se considera que provienen exclusivamente de la disminución en el consumo de GLP a causa de la contribución del biogás generado mediante la descomposición de los residuos orgánicos. A modo de cuantificar estos ingresos, se toma como referente el precio por unidad de energía proveniente del GLP, en virtud de que este precio unitario define el monto del ahorro resultante del descenso en el nivel regular de consumo energético registrado en el uso final de energía para cocción de alimentos. Dicho lo anterior, para el GLP se fija un precio de \$11.53 por kg, esto es \$0.25 por MJ. Además, para este precio se presume un crecimiento anual de 15%.⁸³

Finalmente, dado que se trata únicamente de una evaluación económica, se analiza un escenario en el cual no hay participación de capital de terceros. Se considera entonces que se dispone de recursos propios suficientes para ejecutar la propuesta descrita. La tasa mínima de rendimiento aceptable (TREMA) aparejada al capital propio se asume del 6.0% anual.

⁸¹ Correspondiente al cargo, vigente para el mes de julio del 2012, por kWh de energía en la franja intermedia para la tarifa de media tensión HM en la región Central, y que según se sabe, es la aplicable para el *campus* de Ciudad Universitaria. El incremento porcentual consiste en la tasa media de crecimiento anual del costo por kWh para esa tarifa calculada para el periodo 2002-2012.

⁸² El costo corresponde a la tarifa de agua potable para uso comercial en el intervalo de mayor consumo aplicable en el Distrito Federal. El aumento anual considerado manifiesta únicamente la componente inflacionaria.

⁸³ Precio por kg de GLP correspondiente al mes de julio del 2012 para su venta en el Distrito Federal. El equivalente en \$/MJ se obtuvo de considerar el poder calorífico promedio de este energético reportado en el Balance Nacional de Energía 2010 para los años 2000-2010, el cual fue de 45.83 MJ/kg. Cabe aclarar que el incremento anual supuesto está por arriba de la tasa media de crecimiento anual del precio por kg de GLP en el país. No obstante, de suprimirse la política gubernamental de control de precios para este energético, la volatilidad siempre presente del precio del GLP en el mercado internacional, sin duda conllevaría incrementos, tanto en el precio mismo como en su ritmo de aumento, de la magnitud del aquí considerado, o incluso mayores.

Tabla IV.20 – Desglose de la inversión inicial para la conformación de la planta de biogás

Concepto	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Triturador	Triturador doméstico de residuos orgánicos InSinkErator® capacidad de cámara de molienda de 1.1 kg (40 oz); motor monofásico de 1,200 W; con accesorios	1	5,000	5,000
Tanque receptor de sustrato	Tambo metálico de 200 L, cortado a una altura de aproximadamente 52 cm y equipado con accesorios	1	350	350
Reactor anaerobio R-I 1,250 L	Tanque vertical fabricado en acero inoxidable tipo 304 con mirilla de acrílico y mezclador accionado con motor trifásico de 3.43 kW	1	15,000	15,000
Accesorios para el reactor R-I	Válvulas PVC de bola de ½" y 3/8"; conectores en acero inoxidable de diferentes medidas	—	—	700
Reactor anaerobio R-II 5,000 L	Tanque de almacenamiento Rotoplas® fabricado en polietileno, diámetro 2.20 m y altura 1.77 m	1	5,500	5,500
Bomba	Bomba de cavidad progresiva Moyno® modelo 35601, 1½" succión, 1¼" descarga, 20 GPM; acoplada a motor trifásico de 1.35 kW	1	8,000	8,000
Tubería de conducción de sustrato	Tubería de PVC hidráulico cédula 40 de 38 mm	12 metros	25	300
	Manguera verde olivo de PVC para succión y descarga de agua y lodos 38 mm	8 metros	50	400
Válvulas para tubería de conducción de sustrato	Válvula PVC de bola 38 mm rosca/cementar	10	50	500
Conectores para tubería de conducción de sustrato	Adaptadores, reducciones, codos 90°/45°, tees, conectores espiga, nipples, coples, abrazaderas 38 mm	—	—	1,000
Tubería de conducción de biogás	Tubería de PEAD 13 mm RD 9.3, rollo 100 m	1	3,500	3,500
Conectores y válvulas para tubería para biogás	Codo 90° polietileno de alta densidad 13 mm	3	16	48
	Tee polietileno de alta densidad 13 mm	4	16.50	66
	Adaptador macho PEAD - Fo.Fo.	13	83	1,079
	Válvulas de bola en acero inoxidable tipo 304 13 mm	5	220	1,100
Acondicionamiento de biogás	Filtro de remoción de H ₂ S y condensador de H ₂ O _v	1	1,500	1,500
Medidor de biogás	Desplazamiento diferencial tipo diafragma 0.6 L/rev, Q _{max} 2.4 m ³ /h, P _{max} 0.1 bar	1	550	550
Reservorio de biogás	Bolsa fabricada a base de lona de poliéster recubierta con PVC, 2.0m ³ capacidad aproximada	1	1,000	1,000
Regulador de gas	Regulador CMS 0.8 m ³ /h NOM 018/4	1	150	150
Manómetro	Rango 0 - 130 cmH ₂ O; resolución 5 cmH ₂ O	1	70	70
Suministro de biogás al equipo de combustión	Tubería hierro galvanizado ½" con accesorios para el aprovisionamiento de biogás a los quemadores	1	250	250
Obra civil	Infraestructura indispensable, conexiones hidráulica y eléctrica, herrería, otros	1	82,000	82,000
Misceláneos	Aditamentos y materiales diversos	1	1,000	1,000
			Gran total	129,063

Es de hacer notar que la TREMA sugerida se encuentra por debajo del rendimiento que habitualmente se exige para cualquier clase proyecto productivo; sin embargo, dado que en este caso se trata de un proyecto de corte más didáctico y demostrativo, las exigencias en cuanto a los réditos por capital invertido bien pueden relajarse. En cuanto al horizonte de vida útil de la planta de biogás, se elige un lapso de hasta 20 años, tiempo que de ningún modo excede la longevidad promedio de instalaciones semejantes (Khandelwal y Mahdi, 1986). Las mencionadas suposiciones de tipo económico se concentran en la Tabla IV.21.

Tabla IV.21 – Datos de entrada para la evaluación económica de la planta de biogás

Concepto	Monto estimado	Tasa de incremento anual
Inversión inicial	\$129,063.00	No aplica
Costos fijos	\$1,000.00	3.0%
	\$5,000.00 cada lustro	No aplica
Costo variables (por m³ de biogás)	\$2.12 (energía eléctrica)	11.1%
	\$0.36 (agua potable)	3.0%
	\$1.58 (otros operación y mantenimiento)	3.0%
	\$4.06	
Ingresos	\$0.25 por MJ producido	15.0%
Parámetros adicionales para la introducción de la noción del valor del dinero en el tiempo		
TREMA	6.0% anual	Horizonte 20 años

Con los datos previamente consignados se evaluaron diez indicadores para conocer de la rentabilidad de la propuesta aquí planteada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla IV.22. Teniendo en cuenta el criterio adoptado para cada indicador, el ejercicio apunta a que el **proyecto es viable desde la perspectiva económica**. Sin embargo, los valores de los indicadores en general son bastante discretos. Por ejemplo, la tasa interna de retorno (TIR) supera apenas en menos de 3 puntos porcentuales a la TREMA, la diferencia es un poco menor si se le compara con la tasa interna de retorno modificada (TIRM).⁹⁴ La relación beneficio-costos (B/C) resulta de 1.21, que si bien es favorable, resulta relativamente modesta. El periodo de cancelación, esto es, el tiempo necesario para que los ingresos derivados del proyecto salden el monto de la inversión inicial, ocurre hasta el año 18, cerca del límite presumible de vida útil de la instalación. La confrontación de egresos e ingresos arroja un saldo favorable, que distribuido anualmente tiene un valor equivalente de \$5,569.77. Cabe apuntar que, de acuerdo con los resultados de la evaluación, al cabo de 20 años se obtiene una ganancia asciende a casi el 50% de la inversión inicial, una cantidad nada desdeñable.

El costo unitario nivelado (CUN) resulta de \$16.48 por m³ de biogás, que se traduce en \$0.82 por MJ partiendo de la concentración esperada de CH₄ del 56% en vol. y el PCI para éste de 35,700 kJ/m³. Al contrastar el precio de referencia del GLP con el CUN del biogás, surge la interrogante de por qué si los indicadores de rentabilidad apuntan a que el proyecto es económicamente rentable, el CUN estimado del biogás es más del triple del costo del MJ del GLP. La respuesta a esta interrogante reside según parece en la tasa de incremento supuesta para el precio del GLP, la cual se fijó en 15% anual, o lo que es lo mismo 1.17%

⁹⁴ La diferencia fundamental entre la TIR y la TIRM reside en la metodología seguida para la determinación de cada una. En el caso de la TIR, tanto los egresos como los ingresos se actualizan utilizando precisamente la tasa TIR, lo que significa que las eventuales ganancias que reporta el proyecto reditúan a su vez un beneficio dado por la rentabilidad del proyecto mismo. Para la TIRM, en cambio, se asume que las ganancias del proyecto proporcionan rendimientos acordes con la tasa TREMA, la cual es, al menos en proyectos económicamente rentables, inferior a la TIR.

mensual. Este ritmo de crecimiento anual implica que del año 10 en adelante, hasta el fin de la vida útil de la planta de biogás, el precio por MJ del GLP esté por encima del CUN calculado para el MJ del biogás. De esta manera, al término de la vida útil de la planta, el precio por MJ del GLP habrá alcanzado \$3.56, lo que significa más de 4 veces el CUN para el MJ del biogás (\$0.82 por MJ). Pero quizá responda todavía mejor la pregunta el hecho de que el costo nivelado del GLP, para el horizonte de 20 años y un aumento de su precio a un ritmo de 15% anual, resulta de \$0.99 por MJ, esto es, un 20% mayor al CUN por MJ del biogás.

Tabla IV.22 – Indicadores de rentabilidad económica calculados para la planta de biogás

Indicador	
Valor Presente Neto	\$63,815.98
Valor Futuro	\$204,666.50
Anualidad Equivalente	\$5,563.77
Tasa Interna de Retorno	8.94%
Tasa Interna de Retorno Modificada	8.15%
Relación B/C	1.21
Costo Unitario Nivelado	\$16.48 m ³ -biogás \$824.52 GJ
Periodo de Cancelación	18 años
Porcentaje de Ganancia sobre la Inversión	49.45%
Porcentaje de Ganancia Anual sobre la Inversión	4.31%

La magnitud del aumento en el precio del GLP tiene enorme influencia en la rentabilidad de la planta de biogás, según se desprende de la observación de la gráfica del análisis de sensibilidad realizado para la relación B/C y que se muestra en la Figura IV.23. Una tasa de incremento para el precio del GLP inferior a 13.14% anual, torna inviable la propuesta, es decir, los ingresos no bastan para cubrir los gastos anuales y de paso amortizar la inversión inicial. Así, de tomarse la tasa media de crecimiento anual del precio del GLP en el caso del Distrito Federal, para el periodo 2002-2012, la cual es de sólo 8.41%, casi la mitad del 15% anual considerado en la evaluación, partiendo de un precio inicial de \$0.25 por MJ, la propuesta deja de ser rentable. Para hacerla económicamente viable con ese ritmo anual de incremento del precio, sería necesario partir de un costo por MJ del GLP de no menos de \$0.40 (\$18.40 por kg), esto es, 60% mayor al precio vigente del GLP.⁸⁵

De acuerdo a lo arriba expuesto, se puede aseverar que en las circunstancias imperantes, en relación tanto al precio del GLP como en su ritmo de incremento anual, en conjunto con las otras suposiciones planteadas, el proyecto ve menguada su rentabilidad económica. Esto de ninguna manera debe causar sorpresa, dado que es una constante para la mayoría de los proyectos que involucran la explotación de fuentes renovables de energía. Tan es así que para esta clase de proyectos son indispensables distintos esquemas de subvenciones que los doten de rentabilidad y competitividad de cara a la política de precios controlados de los energéticos fósiles convencionales.

El mismo análisis de sensibilidad revela que después de la tasa anual de aumento en el precio del GLP, la rentabilidad del proyecto se ve también afectada, en orden decreciente de importancia, por el precio del kilogramo del GLP, el factor de planta anual, el monto de los costos variables por m³ de biogás, y, al último, la inversión inicial necesaria para la instalación y puesta en operación de la planta. De los cinco parámetros considerados en el análisis, sólo en tres de ellos existe la posibilidad real de modificar su valor: Factor de planta, costos variables e inversión inicial. Si bien es cierto que son aquellos para los cuales la relación B/C es menos

⁸⁵ El precio dado corresponde al GLP distribuido al interior del Distrito Federal, corriendo el mes de julio del año 2012.

sensible, un efecto combinado de reajuste en estos tres parámetros tendría el peso suficiente para restituir la viabilidad económica del proyecto.

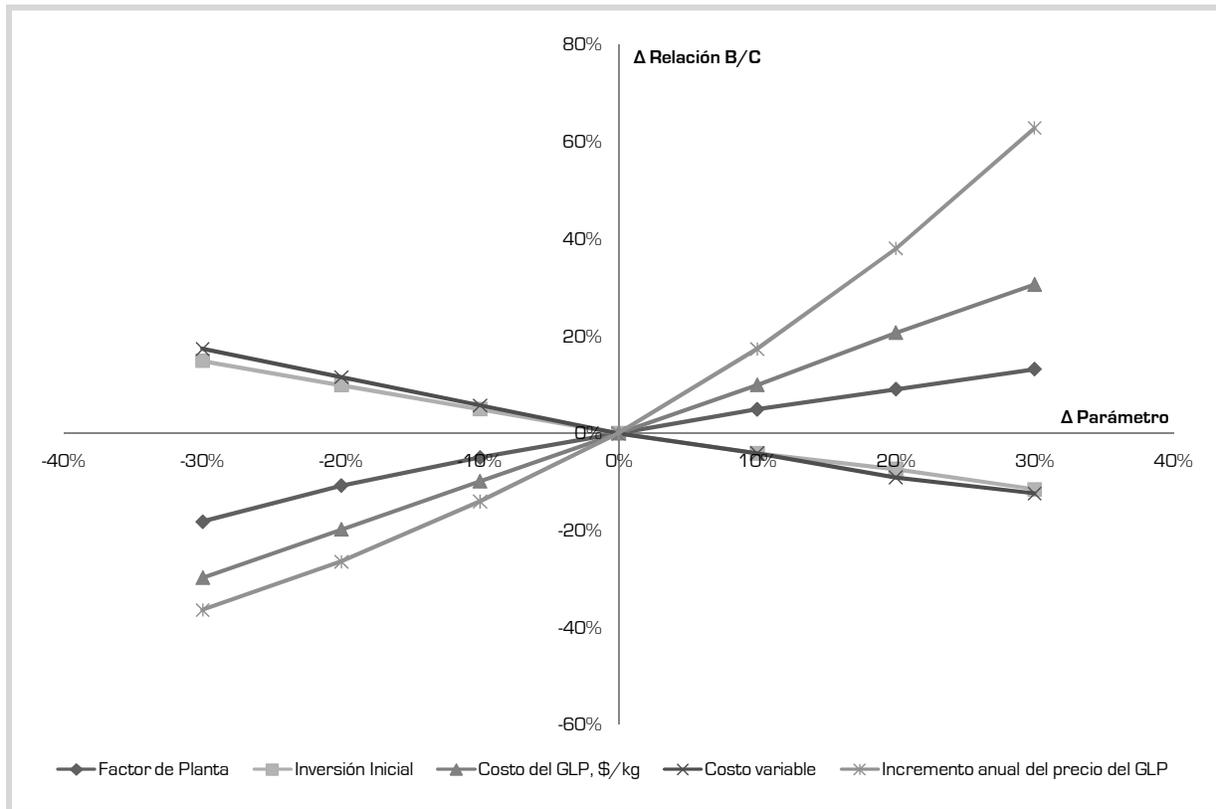


Figura IV.23 - Análisis de sensibilidad de la relación B/C

En ese sentido, un aumento del 30% en el factor de planta, sumado a reducciones del 32% y 30% en los costos variables e inversión inicial, respectivamente, con relación a los valores considerados en un inicio, vuelven rentable la propuesta incluso con el precio de \$0.25 por MJ del GLP y el incremento anual de éste de sólo 8.41%. Descartando el factor de planta, y con los mismos valores para el precio del GLP y su ritmo anual de crecimiento, se hace necesaria una disminución del 40% por igual en los costos variables y en la inversión inicial.

Si solamente se modifican los costos variables, el valor que se precisa es de \$0.98 por m³ de biogás, es decir, poco menos de un cuarto del originalmente previsto, \$4.06 por m³ de biogás. Un valor cercano a los \$0.98 por m³ de biogás en costos variables podría conseguirse de acotar el tiempo de funcionamiento del motor del mezclador y la bomba de alimentación a menos de 1 hora diaria, simultáneamente con una reducción sustantiva en los otros componentes de los costos variables. Esta posibilidad, no obstante, podría tener efectos negativos sobre el nivel óptimo de producción de biogás, dado que tanto la bomba como el mezclador desempeñan funciones determinantes para el buen devenir del proceso de descomposición anaerobia de los residuos orgánicos.

Con el precio de \$0.25 por MJ del GLP y un aumento anual de éste de 8.41%, mantenido el resto de los parámetros económicos y técnicos en sus valores establecidos desde un principio, el proyecto es rentable para concentraciones de CH₄ en el biogás iguales o mayores a 89.4% en vol. Este 89.4% en contenido de CH₄ es casi 1.6 veces el porcentaje inicialmente previsto, 56%. Tal contenido de CH₄ es excesivamente alto para un biogás sin procesamiento previo, incluso lo es también para el gas natural de origen fósil extraído directamente de

yacimientos terrestres o marinos. Sin embargo, si el incremento en el precio del GLP fuese de 15% anual, el porcentaje de CH₄ en el biogás podría descender hasta 46.2%, es decir, 20% por debajo de la concertación esperada, a efectos de preservar la rentabilidad de la planta.

Un análisis de sensibilidad semejante se realizó para el CUN del GJ del biogás. Los resultados de este ejercicio se exponen en forma gráfica en la Figura IV.24. El parámetro de mayor peso en la determinación del CUN del biogás es el nivel de concentración de CH₄. La presencia de este gas es decisiva en la determinación de la cantidad de energía potencialmente aprovechable del biogás, que a su vez acota el volumen de GLP que puede ser desplazado y, por consiguiente, los ahorros monetarios obtenidos que se traducen en ingresos para el proyecto. El nivel de concentración de CH₄ en el biogás, como ya se ha dicho, está restringido por las características de la biomasa a degradar y, en menor medida, por las condiciones en que acontece la digestión. Por tal motivo cabría esperar que este parámetro se mantenga dentro de una banda de $\pm 25\%$ del valor pronosticado (56% en vol.), lo cual significa una concentración de CH₄ en el biogás de entre 70% y 40% en vol. Si bien la concentración de CH₄ difícilmente superaría la cota superior fijada en 70% en vol., sí podría en cambio descender con relativa facilidad por debajo del 40% en vol., como consecuencia de múltiples factores que incidan negativamente en la estabilidad del proceso anaerobio.

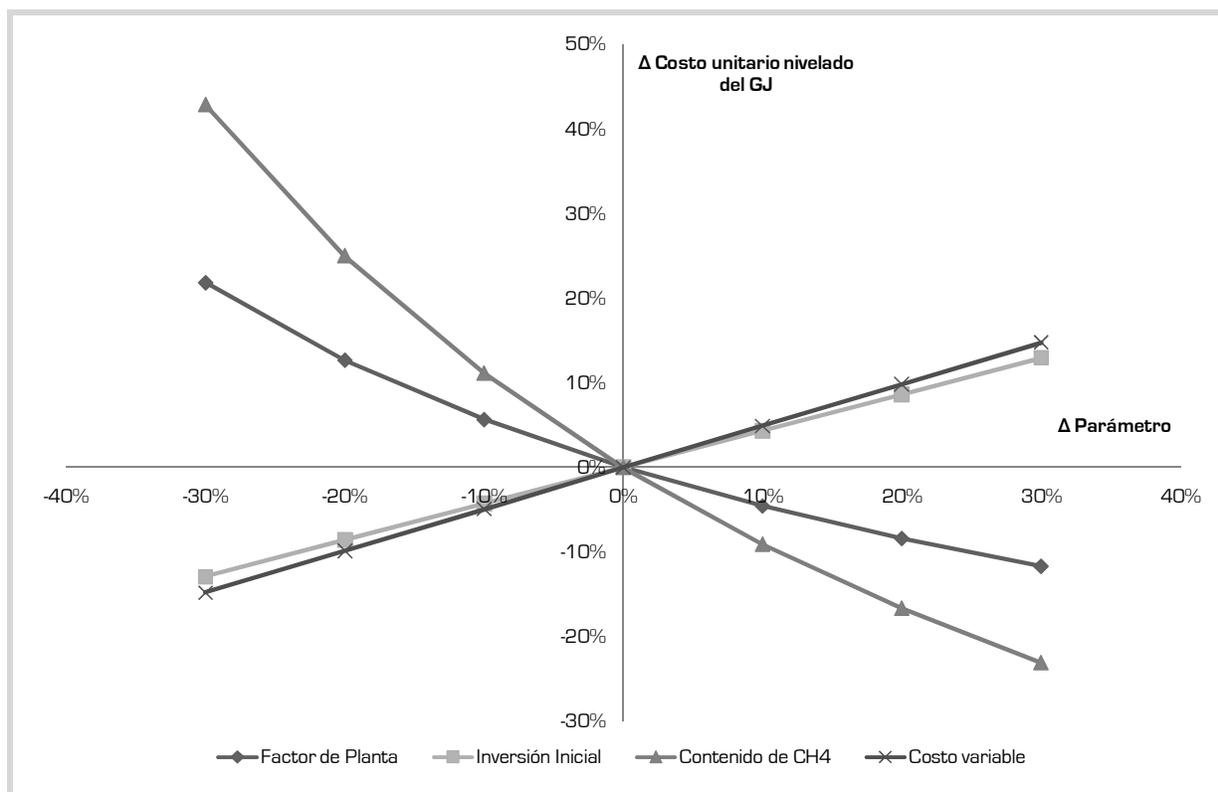


Figura IV.24 - Análisis de sensibilidad del costo unitario nivelado por GJ del biogás

El factor de planta es el segundo parámetro, de los considerados en el análisis de sensibilidad, que más influencia tiene sobre el CUN del biogás. No hay duda de que el número de días por año en que opera la planta define en gran parte el nivel de producción anual de biogás, lo que a su vez impacta en los costos variables totales y, por ende, el CUN por m³. Precisamente es el costo variable por m³ de biogás el tercer parámetro al que es más sensible el CUN del biogás. Esto responde al hecho de que constituyen la fracción más sustantiva de las erogaciones periódicas totales estimadas del proyecto. La inversión inicial incide sobre el CUN del biogás

con una intensidad apenas menor a la del costo variable; en ambos casos de poca monta frente a la influencia ejercida por el contenido de CH₄ del biogás.

Como se aprecia, mediante los análisis de sensibilidad es posible descubrir cuáles son los parámetros que revisten especial importancia en la evaluación económica de un proyecto de cualquier índole. Dichos parámetros son, por tanto, los que precisan ser observados y, en la mitad de lo posible, controlados con objeto de asegurar un margen aceptable de rentabilidad, no muy distante del vaticinado por medio de la ejecución de la evaluación económica. En el caso de la planta de biogás aquí detallado, de los parámetros elegidos para la ejecución de los análisis de sensibilidad, los que son susceptibles de ser manipulados, individual o conjuntamente, en detrimento o beneficio de la rentabilidad de la planta, son, en orden de mayor a menor influencia, el factor de planta, el costo variable y la inversión inicial.

IV.10 – Impacto ambiental

En el contexto actual, se han dejado de cuestionar las graves consecuencias que sobre el entorno natural conllevan la creciente acumulación e inadecuada disposición de los residuos sólidos en general, pero especialmente de aquellos del tipo orgánico biodegradable. Las transformaciones espontáneas que sufren estos desechos dan lugar a una infinidad de sustancias que, pese a provenir de materia orgánica vegetal o animal, por su cantidad y peculiaridades fisicoquímicas adquieren un cariz contaminante. Las afectaciones se resienten en cuerpos de agua, suelo y atmósfera, trastocando las dinámicas naturales que ahí acontecen y que son cruciales para el mantenimiento de un equilibrio mínimo en los ecosistemas, de los cuales forma parte el ser humano.

En el presente trabajo, de manera reiterada se ha venido destacando el aporte que en materia ambiental realiza el tratamiento anaerobio de la biomasa residual de distinto origen. En primer lugar, gracias al empleo de los desechos orgánicos como materia prima para un proceso de digestión se logra una disminución de la cantidad de residuos que llegan a la fase de disposición final, en rellenos sanitarios o instalaciones similares. En el caso aquí presentado, partiendo de un procesamiento diario de 40.46 kg de RSO y tomando en consideración un factor de operación anual de alrededor del 70%, se estaría eludiendo la necesidad de confinar poco más de 10.5 t de desechos al año. Recortar el volumen de residuos que ingresa a sitios de disposición final es urgente por varias razones. Están por supuesto las limitaciones de espacio además de las innumerables afectaciones medioambientales que conlleva la concentración de desechos en sitios carentes de la infraestructura apropiada.

En relación al punto anterior, conviene recordar que en virtud de recientes acuerdos entre el Gobierno del Distrito Federal y los trabajadores de limpia y transportes de esta demarcación, se ha venido impulsando un programa para reducir la cantidad de basura que se produce al interior del DF. Esta medida constituye una de las respuestas emergentes frente a la saturación, y en algunos casos clausura, de sitios circundantes a la ciudad para el vertido de residuos sólidos. Dicho programa incluye, entre otras acciones, la segregación de origen de los residuos sólidos fundamentalmente domésticos, en las categorías inorgánica y orgánica. La fracción orgánica en principio será canalizada a instalaciones donde se someterá a tratamiento aerobio con el fin de elaborar composta para su aplicación en parques, jardines y otras áreas públicas. De este modo, se impedirá que cuando menos esta porción de los residuos sólidos, que representa 50% ó más del peso total de la basura que se genera en la ciudad, se deposite en un tiradero o relleno sanitario. De llevarse a cabo de manera correcta y constante, y asignándole los recursos suficientes, es de esperar que esta medida traiga importante beneficios para la sociedad y su entorno natural inmediato

Por otra parte, la desintegración anaerobia de biomasa residual permite la recuperación y reincorporación de un porcentaje alto de compuestos de utilidad en la revitalización y cultivo de tierras con diversos fines. Ciertamente es que desde hace tiempo se recurre a la aplicación directa sobre el suelo de materia orgánica de desecho como medida para propiciar la transferencia y asimilación de nutrientes. Sin embargo, debido a la ausencia de un tratamiento previo de esta biomasa residual, la práctica de su aplicación directa sobre el suelo manifiesta, independientemente de una absorción y reposición defectuosa de los nutrientes presentes en la materia orgánica, inconvenientes serios para el ambiente y la salud humana.

Se prefiere entonces la estabilización previa de la biomasa residual a fin de que experimente transformaciones que susciten la conversión de sus constituyentes iniciales en sustancias simples e inocuas que fácil y rápidamente se reincorporen al ecosistema y puedan participar en los distintos procesos bioquímicos naturales. El tratamiento anaerobio permite cumplir, en cierta medida, con ese objetivo. En efecto, los efluentes o lodos digeridos son portadores de una cantidad significativa de compuestos entre los cuales figuran, en proporciones que dependen del tipo de biomasa y las condiciones en que se efectúa el tratamiento, el nitrógeno, el fósforo y el potasio, todos ellos ingredientes esenciales de los fertilizantes convencionales.

Atendiendo a la composición típica de los residuos orgánicos sólidos urbanos (consúltese Tabla IV.8), es razonable suponer que en los lodos digeridos predominarán, si acaso, los compuestos derivados del nitrógeno, por encima de los de fósforo y potasio. Como se recordará, el destino previsto para la componente sólida de los lodos digeridos plantea su empleo como vigorizante para el desarrollo de especies vegetales de ornato, aunque también cabe la posibilidad de utilizarla, una vez disipadas las incertidumbres al respecto, para el cultivo de vegetales para consumo humano. Así, se resolvería la cuestión de la disposición de esta porción de estos efluentes y se daría un uso ventajoso a los compuestos remanentes de la descomposición de los desechos orgánicos.

Con relación al impacto sobre la atmósfera, el manejo y la disposición inadecuados de los residuos sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos, comportan repercusiones severas. Entre las principales destacan la emisión de malos olores, el desprendimiento de material particulado y la liberación de gases de efecto invernadero (GEI) de larga permanencia que se depositan en la atmósfera. De estos últimos, el CH_4 es por mucho el más importante. Su potencial de calentamiento es alrededor de 21 veces el desplegado por el CO_2 , el principal de los GEI antropógenos. Dado que en un sitio de disposición final los residuos permanecen luego de enterrados un tiempo infinito, la mayor parte del mismo bajo condiciones anaerobias, es válido suponer que se alcance una síntesis de CH_4 comparable a aquellas que se registran en la digestión controlada, aunque requiriendo para ello de periodos mucho más largos. Así pues, partiendo de la producción supuesta de $3.42 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{día}$, que totalizan $888.16 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{año}$ sobre la base de 260 días de operación efectiva anual de la planta, constituyen evidentemente las emisiones evitadas de este gas a la atmósfera. Se dice evitadas porque el CH_4 no se liberará tal cual a la atmósfera, sino que se oxidará [quemará] para convertirlo en CO_2 que, no obstante que es otro GEI, al proceder de biomasa no fósil se asume que no contribuye a incrementar la presencia de ese gas en la atmósfera.

Aunado a lo anterior, y para cerrar esta sección, la combustión del CH_4 presente en el biogás desplaza el consumo de un energético de origen fósil, el GLP, cuya combustión da lugar a emisiones de CO_2 que en este caso sí incrementan el nivel base de concentración de este gas en la atmósfera. Así pues, de los 525.29 GJ/año que se estima consume el restaurante en forma de GLP en el rubro de energía para cocción de alimentos, el biogás aportaría hasta 31.71 GJ/año , que como ya se apuntó representan el 6% del consumo total. Por consiguiente, la energía que aporta el GLP desciende a 493.58 GJ/año . Tomando el factor de

emisión de CO₂ para el GLP establecido en documentos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, que es de 63,100 kg-CO₂/TJ, y bajo la premisa de que la combustión del CH₄ obtenido de la degradación de la biomasa es *neutral* en términos de producción de CO₂, la reducción de emisiones de este GEI atribuibles a la sustitución parcial del GLP por biogás se aproxima a 2.0 t-CO₂ anuales. Si a esta última cifra se le añade el equivalente en kgCO₂-eq de los 888.16 m³CH₄/año generados en el biogás, tomando en cuenta potencial de calentamiento del CH₄ y su densidad a condiciones normales (0.668 kg/m³), las emisiones totales en términos de t-CO₂-eq que sería posible contener gracias a la implementación y operación sostenida de la planta de biogás, totalizan anualmente 14.46 t-CO₂-eq.

Para redondear todo lo antes expuesto, se presenta en la Tabla IV.23 la síntesis de la información y cifras más relevantes respecto de la planta de biogás que han sido tomadas de las secciones precedentes, desde sus atributos básicos de carácter técnico hasta los beneficios que se espera reporte en materia ambiental, pasando por sus aspectos económicos de mayor relieve.

Tabla IV.23 – Principales atributos técnicos, económicos y ambientales de la planta de biogás

Aspectos técnicos				
Cantidad de FORSU	Modalidad de digestión	Alimentación	Reactor anaerobio R-I	Reactor anaerobio R-II
40.46 kg/día (10.52 t/año)	Digestión húmeda	69.16 L/día, 13.42% ST	Semi-continuo de mezcla completa de 1.25 m ³	Semi-continuo convencional con recirculación externa de 5.0 m ³
Temperatura de digestión	Tiempo de residencia hidráulico	Velocidad de carga orgánica	Porcentaje de remoción	Producción de lodos digeridos
20° C	65 días	1.94 kgSTV/m ³ -día	63%, con respecto a STV	69.16 L/día, 5.45% ST
Producción esperada de biogás	Concentración de CH ₄ en el biogás	Limpieza del biogás	Almacenamiento del biogás	Dispositivos de medición-protección
6.10 m ³ /día (1,586 m ³ /año)	56% en vol.	Remoción del H ₂ O (trampas de condensación) y del H ₂ S (adsorción seca en Fe ₂ O ₃)	Reservorio de baja presión de 2.0 m ³ en PVC reforzado	-Medidor, válvula de alivio – manómetro, trampa de llama
Aportación energética del biogás	Ruta de aprovechamiento	Especificaciones del equipo de combustión	Tiempo de operación continua del equipo	Factor de operación de la planta de biogás
122 MJ/día (31.71 GJ/año)	Conversión a energía térmica aplicada a cocción de alimentos	Estufa con 3 quemadores de 1.5 kWt cada uno	4.5 horas	71.23% anual
Aspectos económicos				
Inversión inicial estimada	Costos fijos	Costos variables	Ingresos	Indicadores de rentabilidad
\$129,063	\$1,000 anuales \$5,000 cada lustro	\$4.06 por m ³ biogás	\$0.25/MJ, con 15% de aumento anual	TIR, 8.94% B/C, 1.21
Aspectos ambientales				
Reducción de desechos	Subproductos de utilidad	Contención de emisiones de CH ₄	Sustitución de combustibles fósiles	Reducción de GEI por sustitución de combustibles fósiles
10.5 t/año de RSO no llegan a disposición final	69.16 L/día de lodos digeridos con potenciales usos agrícolas	12.46 t CO ₂ -eq por año	Reduce en por lo menos 6% el consumo de GLP	2.0 t CO ₂ -eq por año

IV.11 – Indicadores de sustentabilidad energética

En este apartado se presentan la metodología de cálculo y los resultados obtenidos para un grupo de indicadores que aluden a ciertos aspectos dentro de las dimensiones fundamentales del desarrollo sustentable. Para comenzar, conviene apuntar qué se entiende por desarrollo sustentable. Se trata de un concepto surgido a finales de la década de 1980 que postula un modelo de desarrollo con el cual es posible satisfacer los requerimientos de las generaciones actuales, sin que ello comprometa la capacidad de las generaciones venideras de cubrir cabalmente sus propias necesidades. Desde que fue planteado por vez primera hasta el día de hoy, y frente al avance de problemáticas en los ámbitos económico, social y ambiental, el desarrollo sustentable ha venido cobrando una importancia creciente. Se presenta como la vía para diversificar la economía, incrementar la eficiencia y extender la vida de los sistemas productivos, abatir disparidades sociales, elevar la calidad de vida de las personas, además de restaurar y preservar el medio ambiente.

Son precisamente los aspectos económicos, sociales y ambientales los que vienen a constituir las tres dimensiones fundamentales del desarrollo sustentable. Así pues, la dimensión económica se ocupa de lo concerniente al sostenimiento de la generación y acumulación de riqueza a futuro. Lo referente al mejoramiento palpable y permanente del nivel de vida de las personas, queda dentro de la dimensión social del desarrollo sustentable. En tanto, en la dimensión ambiental se examinan las repercusiones de las actividades humanas sobre el entorno natural y las alternativas para atenuarlas. En algunas ocasiones se habla de una cuarta dimensión del desarrollo sustentable, la cual se relaciona con aspectos de índole política o institucional que son indicativos de la capacidad de un Estado para formular e implementar estrategias para instaurar un patrón de desarrollo sustentable. Para el caso de la planta de biogás, la evaluación de la sustentabilidad energéticas considerará indicadores únicamente para las dimensiones económica, social y ambiental.

Dicha evaluación de la sustentabilidad energética consiste en la comparación de los indicadores calculados bajo dos situaciones o escenarios distintos. El primero de estos escenarios (Escenario I) considera el restaurante tal como se encontraba antes de la incorporación de la planta de biogás. Para el segundo escenario (Escenario II), el restaurante está ahora equipado con la planta para generar biogás y los medios para emplearlo como energético para proveer energía térmica para el uso final de cocción de alimentos reduciendo así el consumo de GLP. Los puntajes de los indicadores en cada uno de los escenarios antes planteados, determinan si hay un avance o retroceso en materia de sustentabilidad energética. A fin de comparar los indicadores sobre una misma escala, y así darle uniformidad a los resultados obtenidos con distintas metodologías de cálculo, los indicadores serán normalizados para que tomen valores entre 0 y 1. Entre más se aproxime a 1, el indicador denotará una mayor sustentabilidad energética; entre más cerca esté de 0, el indicador referirá una menor sustentabilidad energética. Los criterios que se adopten para normalizar los indicadores, aun cuando sean arbitrarios, no son determinantes para la validez de la evaluación, ya que lo importante es el contraste entre los escenarios.

IV.11.1 - Indicadores para la dimensión económica

Para registrar eventuales cambios en temas pertenecientes a la dimensión económica, se proponen los siguientes indicadores:

- a)** Intensidad energética fósil en la cocción
- b)** Costo de la energía para cocción
- c)** Certidumbre en el abasto de energía para cocción

El indicador **Intensidad energética fósil en la cocción** cuantifica la cantidad de energía final de origen fósil que se consume por ración elaborada en el restaurante. Lo anterior queda representado en la siguiente expresión:

$$\text{Intensidad energética fósil} = \frac{\text{Consumo de energía final de origen fósil}}{\text{Número de raciones elaboradas}} \quad \dots\text{(IV.XXXI)}$$

Para normalizar el indicador, el valor máximo de 1 se asocia al nulo consumo de energía de origen fósil en la cocción, lo que implica una intensidad energética igual a cero. Este planteamiento tiene sentido dado que el desarrollo sustentable supone romper con la dependencia excesiva por los combustibles no renovables de procedencia fósil. En tanto, el mínimo de sustentabilidad se equipara a un consumo de energía final de origen fósil del doble, y por consiguiente una intensidad energética también del doble, del reportado para el Escenario I. En apoyo a esta premisa vale decir que el GLP es considerado un energético moderno con un rendimiento superior al de otros combustibles también de origen fósil, de manera que utilizando GLP la intensidad energética en una tarea, como la cocción de alimentos, no es de las más altas.

Teniendo en cuenta que el consumo original de GLP del restaurante equivale a 12,122 MJ por semana y que el número promedio de raciones diarias elaboradas en el restaurante es de 600, la Intensidad energética fósil en la cocción en el Escenario I es de 4.04 MJ/ración, por lo que su valor normalizado es **0.50**. Para el Escenario II, asumiendo una producción de biogás de 6.10 m³/día que representan 122 MJ/día, los cuales vienen a reducir el consumo original de GLP, el indicador toma ahora un valor de 3.80 MJ/ración, es decir, **0.53** de acuerdo con el criterio de normalización.

Para el indicador **Costo de la energía para cocción** se considera el costo por MJ de energía final ponderado según los costos correspondientes a cada combustible (GLP y biogás) y su contribución a la energía para cocción en cada escenario:

$$\text{Costo energía para cocción} = \sum_{i=1}^n \left(\text{Costo energético}_i \times \frac{\text{Energía para cocción}_i}{\text{Energía final para cocción}} \right) \quad \dots\text{(IV.XXXII)}$$

Los valores normalizados del indicador se obtienen partiendo del siguiente criterio: El valor máximo (1) de sustentabilidad corresponde a un costo por MJ 30% inferior al calculado para el Escenario I; para el mínimo (0), el costo respectivo es 30% superior al de ese mismo escenario. Cierto es que los valores asignados son arbitrarios, lo que de algún modo refleja la dificultad para fijar un precio conveniente a la energía. Un costo elevado de la energía puede promover un consumo eficiente y reducir los despilfarros, pero al mismo tiempo amenaza con restringir el acceso a la energía sobre todo a la población de menores ingresos. En cambio, un costo bajo ayuda a incrementar las posibilidades de acceso a la energía, aunque también es cierto que tiende a fomentar el uso ineficiente de la misma. Para sortear este dilema, se decidió establecer valores arbitrarios para normalizar el indicador.

Conociendo que el costo nivelado del GLP es \$0.99 por MJ, y dado que en el Escenario I el GLP es el único energético usado en el restaurante para la cocción de alimentos, se sigue que el indicador Costo de la energía para cocción en ese escenario tiene un valor de \$0.99 por MJ, que normalizado es igual a **0.50**. En el Escenario II entra el biogás como combustible complementario, teniendo un costo nivelado de \$0.82 por MJ y aportando 6% de la energía final para cocción, de modo que el indicador toma ahora un valor de \$0.98 por MJ, pero que normalizado es **0.52**.

El tercer y último indicador para la dimensión económica se denomina **Certidumbre en el abasto de energía para cocción**. Claramente se entiende que su propósito es medir de alguna manera la seguridad que se tiene en cuanto a disponibilidad de energéticos para la cocción de alimentos. Sobra decir que un abasto suficiente, oportuno y confiable de energía es crucial para la totalidad de las actividades económicas del mundo moderno, de ahí la importancia de considerar este indicador.

Para el GLP se asume que la certidumbre en su abasto es del 100%, en vista de que al menos a la fecha y en localidades como el D.F., hay formas de adquirirlo de manera prácticamente inmediata. En el caso del biogás, la certidumbre en su abasto no es del 100%. Si bien la función del reservorio de biogás es garantizar cierto nivel de disponibilidad del combustible, las variaciones en el volumen producido y en el contenido de CH₄ del biogás es casi seguro que se presenten. Cambios en la composición de los residuos y en la temperatura de digestión, son dos de las causas que podrían favorecer tales fluctuaciones. Dado que aún no se dispone de cifras propias de la planta de biogás, la variación en el nivel de generación de biogás se determinará en base a los valores reportados por Viswanath y col. (1992). Esas fluctuaciones se tomarán como la incertidumbre en el abasto, que será cuantificada a través del coeficiente de variación (C.V.) de los valores de referencia. El C.V. de los datos publicados por Viswanath y col. (1992) es de 0.21, por lo que la certidumbre en el abasto de biogás es de 0.79 (79%).

La Certidumbre en el abasto de energía para cocción de alimentos, se obtiene entonces del promedio de las certidumbres para cada combustible pesadas de acuerdo a su contribución a la energía final para cocción en cada uno de los escenarios, esto es:

$$\text{Certidumbre en el abasto de energía} = \sum_{i=1}^n \left(\text{Certidumbre en el abasto}_i \times \frac{\text{Energía final}_i}{\text{Energía final total}} \right) \quad \dots\text{(IV.XXXIII)}$$

Para el Escenario I el indicador toma, como ya se explicó antes, un valor de **1.00** (100%); para el Escenario II, la Certidumbre en el abasto de energía se ubica en **0.99** (99%). Se observa que los valores ya se encuentran entre 0 y 1, por lo que no es necesario normalizarlos.

IV.11.2 – Indicadores para la dimensión social

Los indicadores que se emplearán para registrar efectos sobre aspectos sociales son:

- a) Fracción de los ingresos destinada a la compra de energía para cocción
- b) Consumo de energía útil en la cocción
- c) Calidad del aire en interiores

A través del indicador **Fracción de los ingresos destinada a la compra de energía para cocción**, se busca conocer qué porcentaje de los ingresos se ocupa para adquirir la cantidad necesaria de combustible a fin de cubrir la demanda de energía para cocción de alimentos. Es evidente que en la medida en que la compra de energéticos absorba una porción sustantiva de los ingresos de una familia o una unidad productiva, se compromete la satisfacción de otras necesidades igual o más apremiantes, Un precio asequible de la energía a la par de ingresos seguros y suficientes, son condiciones fundamentales para lograr niveles aceptables de bienestar individual y colectivo. Para calcular el indicador se propone la siguiente fórmula:

$$\text{Fracción de los ingresos para energía} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Costo}_i \cdot \text{Energía final}_i)}{\text{Ingresos totales}} \quad \dots\text{(IV.XXXIV)}$$

La normalización del indicador se efectúa de acuerdo con el siguiente criterio. El máximo de sustentabilidad energética [1] corresponde a la fracción de los ingresos calculada en base a un costo por MJ 30% inferior al del Escenario I, en concordancia con lo propuesto para la normalización del indicador Costo de la energía para cocción. La fracción así calculada, considerando que los ingresos diarios del restaurante ascienden a \$10,500, resulta de 16%. Así también, el mínimo de sustentabilidad energética [0] se asocia al porcentaje que se obtenga de considerar un costo por MJ de energía final para cocción 30% superior al correspondiente al Escenario I. El porcentaje, respecto a igual monto de ingresos diarios, es 30%. Entonces, en el Escenario I, la fracción de los ingresos que se ocupa para la compra de energía para cocción es del 22.9%, esto utilizando el costo nivelado del GLP de \$0.99 por MJ. En el Escenario II, según los costos y aportaciones tanto del GLP como del biogás, la fracción disminuye a 22.6%. Los valores normalizados para el indicador en los Escenarios I y II son, respectivamente, **0.51** y **0.53**.

El segundo indicador para la dimensión social se denomina **Consumo de energía útil en la cocción**. Con este indicador se busca registrar la proporción de la energía final que es efectivamente utilizada en la cocción de alimentos en virtud de la sustitución, al menos parcial, de combustibles en ese uso final. La razón para incluir este indicador es el hecho de mientras mayor sea la energía útil que se obtenga de un combustible, tanto mejor satisface el propósito o uso final para el cual es empleado. De ahí que, además de implicaciones sociales, la eficiencia en la transformación de la energía tiene conexión con cuestiones económicas y ambientales.

Para el cálculo del indicador se determina la cantidad de energía útil potencialmente extraíble de cada combustible, no tanto porque exista diferencias en cuanto a tecnologías de conversión, sino más bien por efecto de sus propiedades fisicoquímicas particulares. Esa energía útil se expresa luego en términos de la energía fina total demandada para la cocción de alimentos. A efecto de aclarar lo antes planteado se ofrece la siguiente expresión:

$$\text{Proporción de energía útil para cocción} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Energía útil}_i}{\text{Energía final total para cocción}} \quad \dots\text{[IV.XXXV]}$$

La eficiencia de transformación de energía final a energía útil del GLP se considerará del 40% (Salgado y Altomonte, 2001). Al no disponer del dato preciso correspondiente al biogás, parece razonable emplear el reportado para el gas natural, dado que el constituyente mayoritario de ambos es el CH₄. Para el gas natural la eficiencia de transformación se tomará del 50% (Salgado y Altomonte, 2001). Como se apuntó antes, esta diferencia parece responder más a las cualidades propias de cada energético, que a disimilitudes en las tecnologías de aprovechamiento. Para la normalización del indicador se establece arbitrariamente que el máximo de sustentabilidad [1] se consigue cuando la eficiencia de conversión es del 90% o superior; en tanto, el mínimo de sustentabilidad [0] supone una eficiencia de conversión menor o igual al 10%.

Es claro que en el Escenario I la proporción de energía útil para cocción representa 40% de la energía final, por lo que indicador ya normalizado toma un valor de **0.38**. En el Escenario II, a raíz de la utilización del biogás como energético para la cocción de alimentos, la proporción de energía útil es ahora del 41%, que una vez normalizado es igual a **0.39**.

El análisis de la dimensión social concluye con el indicador **Calidad del aire en interiores**. A través de éste se tiene la intención de contabilizar las emisiones de sustancias contaminantes

resultantes de la utilización de combustibles y que abonan a la contaminación en espacios interiores. Desde la óptica del desarrollo sustentable, la producción, pero sobre todo el consumo de energía no deben poner en riesgo la salud de las personas, quienes tienen derecho a gozar de un entorno sano y óptimas condiciones de vida, y es a esto precisamente a lo que tiene que contribuir la energía. Para cumplir con ese cometido es necesario, entre muchas otras cuestiones, facilitar el acceso a tecnologías y combustible más eficientes a fin de sacar el provecho máximo de la energía y abatir la generación de sustancias que perjudican la salud de los individuos y la calidad de su entorno.

El indicador se compone a su vez de índices que registran las emisiones, por MJ de energía final consumida, de óxidos de nitrógeno (NOx), de monóxido de carbono (CO), y de compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COV-NM), dependiendo del combustible empleado. A las emisiones de NOx y COV-NM se les otorga un peso de 1/4, mientras que a las de CO, en virtud de que los equipos de combustión del sector residencial de las principales fuentes de emisión de este contaminante (IPCC, 1996), su peso es de 1/2. Asimismo, se emplearán los factores de emisión para cada contaminante que se reportan en IPCC (1996). Para el GLP los factores son: 100 kg-NOx/TJ, 20 kg-CO/TJ, y 5 kg-COV-NM/TJ; para el biogás: 50 kg-NOx/TJ, 50 kg-CO/TJ, y 5 kg-COV-NM/TJ.⁸⁶ La cuantificación de las emisiones del contaminante “i” debidas al combustible “j”, se determina con ayuda de la expresión:

$$\text{Emisión de contaminante}_i = \sum \text{Factor de emisión}_j \cdot \text{Consumo de energía final}_j \dots \text{[IV.XXXVI]}$$

La normalización considera que el máximo de sustentabilidad [1] se alcanza cuando las emisiones de NOx, CO y COV-NM son todas iguales a cero, lo cual está en sintonía con el empleo de energéticos limpios y seguros para las personas. El mínimo de sustentabilidad [0], en tanto, se corresponde con niveles de emisión del triple de los registrados en el Escenario I. Así pues, para el Escenario I las emisiones, en base a un consumo semanal de 12,122 MJ de energía para cocción, de NOx, CO y COV-NM son 1.21 kg, 0.24 kg y 0.06 kg, respectivamente. Para los tres índices el valor normalizado es **0.67**, el mismo que para el indicador en su conjunto. En el Escenario II, las emisiones totalizan 1.18 kg de NOx, 0.26 kg de CO, y 0.06 kg de COV-NM; sus valores normalizados son, en ese mismo orden, 0.68, 0.64 y 0.67, por lo que el indicador Calidad del aire interiores es igual a **0.66**.

IV.11.3 – Indicadores para la dimensión ambiental

Por último se aborda la dimensión, y para evaluarla se propone el siguiente conjunto de indicadores:

- a)** Contribución de fuentes renovables a la energía para cocción
- b)** Control de emisiones de gases de efecto invernadero
- c)** Residuos sólidos a disposición final

Mediante el indicador **Contribución de fuentes renovables a la energía para cocción** se mide la aportación de energéticos renovables a la demanda total de energía final para la cocción de alimentos que registra el restaurante. Es evidente la relevancia de este indicador toda vez que en el marco de un desarrollo sustentable, la participación creciente de fuentes renovables de energía en todos los ámbitos de la actividad humana, es requisito indispensable. En principio, con las fuentes renovables es posible disminuir sustantivamente los impactos por la

⁸⁶ Puesto que en el documento consultado no aparecen como tales los factores de emisión para el GLP y el biogás, en el caso del GLP se optó por utilizar los correspondientes a la categoría “Petróleo”, en tanto que para el biogás, se decidió emplear los reconocidos para “Gas Natural”.

producción y el consumo de energía, a la par de ampliar las oportunidades de acceso a los servicios energéticos imprescindibles para un mínimo de bienestar.

El cálculo del indicador es muy sencillo, basta precisar qué porcentaje de la energía final para cocción usada en el restaurante proviene de fuentes renovables. Así, en el Escenario I, partiendo de la premisa de que el único combustible empleado en la cocción es el GLP, un combustible derivado del petróleo, la contribución de fuentes renovables es nula. En cambio, en el Escenario II, debido a la entrada del biogás como combustible complementario para la cocción de alimentos, se logra una participación de fuentes renovables que representa el 6% de la energía final total para cocción. La normalización otorga el máximo de sustentabilidad (1) a una contribución de renovables del 100%, en contraparte, el mínimo de sustentabilidad (0) implica la dependencia total de combustibles no renovables. Por lo tanto, el valor normalizado del indicador en el Escenario I es **0.00**, y en el caso del Escenario II, **0.06**.

El segundo indicador, llamado **Control de emisiones de gases de efecto invernadero**, permite advertir incrementos o reducciones en la producción de GEI al contrastar ambos escenarios. Como ya se ha dicho, el aumento sostenido en la generación GEI es el causante del calentamiento global. Este fenómeno provoca a su vez alteraciones en el patrón climático de la Tierra que tienen efectos negativos sobre los sistemas humanos y los ecosistemas en su conjunto. Es por ello que el desarrollo sustentable pasa necesariamente por la contención y el control de las emisiones de GEI.

Si bien son varios los gases que aumentan la opacidad infrarroja de la atmósfera, para el cálculo del indicador únicamente se tomarán en cuenta las emisiones de CO₂, por ser el principal de los GEI antropogénicos. La cuantificación del CO₂ emitido en cada uno de los escenarios se hace a partir del factor de emisión de los combustibles y de la energía que aporta cada uno de ellos, esto es:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \sum_{i=1}^n (\text{Factor de emisión CO}_{2i} \times \text{Consumo}_i) \quad \dots\text{(IV.XXXVII)}$$

Para el GLP se considerará un factor de emisión de CO₂ de 63,100 kg-CO₂/TJ. Con respecto al biogás se asumirá que su quema no genera emisiones netas de CO₂, según se argumentó en la sección IV.10 de este mismo Capítulo. Para la normalización de los valores se establecen las relaciones siguientes. El máximo de sustentabilidad (1) se asocia a la no emisión de CO₂, como una extensión del criterio usado para la normalización del indicador Contribución de fuentes renovables a la energía para cocción. Para el mínimo de sustentabilidad (0) se fija un monto de emisiones de CO₂ del doble de aquel contabilizado en el Escenario I, esto con el propósito de hacerlo de algún modo compatible con lo estipulado para el indicador Intensidad de energía fósil en cocción. Así, las emisiones de CO₂ en el Escenario I ascienden a 765 kg por semana, mientras que en el Escenario II, éstas se ubican en 719 kg. Los valores normalizados son **0.50** y **0.53**, respectivamente.

Finalmente, está el indicador **Residuos sólidos a disposición final**, que aun cuando no tiene relación explícita con la energía, reviste importancia en el contexto del desarrollo sustentable. Ante el aumento en la generación de múltiples desechos materiales, es preciso cambiar el enfoque tradicional que hasta el momento predomina en lo que respecta a la recolección, procesamiento y disposición de los residuos sólidos. Se requieren estrategias que conduzcan a la gestión integral y sustentable de los desperdicios sólidos, algo que fue abordado en el Capítulo I del presente trabajo. En la medida en que esto se consiga, se aminorará de manera

importante el impacto negativo que los residuos sólidos actualmente tienen sobre el entorno y la salud de las personas, y pasarán a ser vistos como un recurso versátil y valioso.

Lo que se toma en cuenta el indicador es la proporción de los residuos sólidos totales generados en el restaurante que es enviada a disposición final, es decir que es descartada sin provecho alguno. Puesto que no se conoce el total de desechos sólidos que produce el establecimiento, ésta se estimará en base a la cantidad de residuos sólidos orgánicos y a los porcentajes reportados por Alcántara y col. (2004). De acuerdo con esa fuente, los residuos sólidos orgánicos representan el 47.02% del total de los desperdicios. Cabe apuntar que de ese total de residuos, alrededor de un 10% no tienen posibilidades de ser reciclados o reutilizados. Esto deberá ser considerado al momento de establecer el criterio para la normalización del indicador.

Para el Escenario I se da por hecho que la totalidad de los desechos sólidos se envía a disposición final. En tanto, para el Escenario II los residuos sólidos orgánicos no pasan a disposición final, puesto que son empleados para la producción del biogás, no así el resto de los desperdicios sólidos que continúan siendo descartados. A efecto de normalizar los valores del indicador, el máximo de sustentabilidad (1) supone que sólo 10% de los residuos sólidos son enviados a disposición final, siendo éste el límite que impone la propia composición de los desechos. El mínimo de sustentabilidad (0) implica que la totalidad de los residuos sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos, son enviados a disposición final. Así, el indicador en el Escenario I tiene un valor de **0.00**, y en el Escenario II, su valor ya normalizado es **0.52**.

La Tabla IV.24 reúne los valores normalizados de los indicadores considerados en cada una de las tres dimensiones. A excepción de los indicadores *Certidumbre en el abasto de energía para cocción* y *Calidad del aire en interiores*, el resto de los indicadores muestra un aumento, en la mayoría de los casos modesto, como resultado de la incorporación de la planta de biogás y el aprovechamiento de éste como energético para el uso final de cocción de alimentos. Agrupados y promediados por dimensiones, los indicadores apuntan a una mejoría de la sustentabilidad energética en todos los ámbitos del Escenario II con respecto al Escenario I. El avance es más notorio en los indicadores de la dimensión ambiental, al pasar de un promedio de 0.17 en el Escenario I a 0.37 en el Escenario II, diferencia que se explica en buena medida por la disparidad en el indicador *Residuos sólidos a disposición final*. En las dimensiones económica y social, si bien registran incrementos en el Escenario II en comparación con el Escenario I, la diferencia es marginal. En la dimensión económica, los indicadores promedian 0.67 en el Escenario I y 0.68 en el Escenario II; en la dimensión social, se pasa de 0.52 a 0.53.

Tabla IV.24 – Resumen de valores normalizados de los indicadores de sustentabilidad energética

		Escenario I	Escenario II
Dimensión Económica	Intensidad energética fósil en la cocción	0.50	0.53
	Costo de la energía para cocción	0.50	0.52
	Certidumbre en el abasto de energía para cocción	1.00	0.99
Dimensión social	Fracción de los ingresos destinada a la compra de energía para cocción	0.51	0.53
	Consumo de energía útil en la cocción	0.38	0.39
	Calidad del aire en interiores	0.67	0.66
	<i>Emisiones de NOx</i>	<i>0.67</i>	<i>0.68</i>
	<i>Emisiones de CO</i>	<i>0.67</i>	<i>0.64</i>
Dimensión ambiental	<i>Emisiones de COV-NM</i>	<i>0.67</i>	<i>0.67</i>
	Contribución de fuentes renovables a la energía para cocción	0.00	0.06
	Control de emisiones de gases de efecto invernadero	0.50	0.53
	Residuos sólidos a disposición final	0.00	0.52
Promedio		0.45	0.53

Es posible apreciar con un poco más de claridad cómo mejora la sustentabilidad energética del Escenario II con respecto al Escenario I, si se grafican los indicadores como se muestra en la Figura IV.25. Para interpretar de la gráfica, basta decir que conforme el área delimitada por los puntajes de los indicadores para cada Escenario sea más amplia, la sustentabilidad energética del sistema bajo estudio será mayor. Así pues, se observa como la sustentabilidad energética medida a través de los indicadores propuestos, es en general superior en el caso del Escenario II debido principalmente a mejores puntajes en los indicadores correspondientes a la dimensión ambiental.

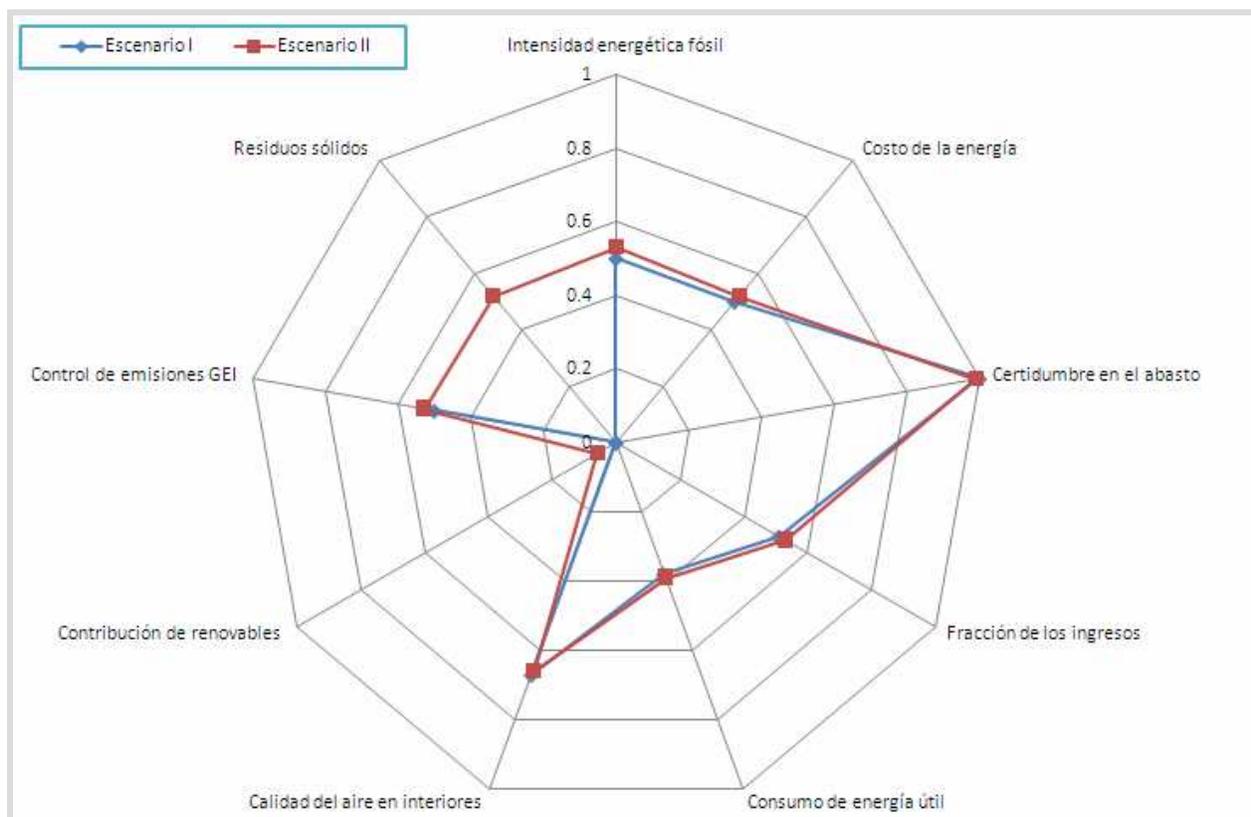


Figura IV.25 – Comparativa de los indicadores de sustentabilidad energética

IV.12 – Comparación de los resultados

Conviene ahora contrastar los resultados obtenidos en relación a la planta prototipo con algunos otros reportados para proyectos o instalaciones similares. Para comenzar, sobresale el hecho de que actualmente a nivel mundial un alto porcentaje de las plantas para el tratamiento anaerobio de biomasa residual tienen capacidades de procesamiento por arriba de las 2,500 t de residuos por año; la mayor de estas plantas tiene una capacidad de hasta 500,000 t por año (Arsova, 2010). El que existan plantas de esas dimensiones es indicativo de una tecnología prácticamente ya consolidada, como desechos pecuarios y de la industria agroalimentaria.

Cabe aclarar, sin embargo, que la implementación de plantas productoras de biogás a gran escala es una realidad sólo en el caso de algunos cuantos países; en muchos otros apenas se está considerando esta vía de tratamiento y aprovechamiento aplicada a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU). La planta prototipo de biogás aquí esbozada se inserta claramente en esta incipiente tendencia que se espera cobre mayor fuerza en México y en otros lugares en un futuro próximo. A diferencia de aquellas plantas que procesan miles

de toneladas anualmente, la capacidad de tratamiento de la planta prototipo llega a las 10.5 t/año. Esto da una idea del tamaño y complejidad de las instalaciones a escala industrial.

En el ámbito comercial, se tiene conocimiento de varias tecnologías específicamente concebidas para el tratamiento anaerobio de la FORSU. Dranco, BTA, Kompogas y Valorga, son quizá las más conocidas a nivel internacional. Son tecnologías implementadas sobre todo en plantas de gran capacidad, instaladas fundamentalmente en países industrializados. Aun cuando existan diferencias de una instalación a otra, el cuerpo básico de toda planta moderna para la producción de biogás a partir de FORSU incluye desde el pre-tratamiento de los residuos, la degradación anaerobia propiamente y la limpieza y el aprovechamiento del biogás, hasta el post-tratamiento de los efluentes y el uso de biofiltros para evitar la liberación de olores desagradables. A excepción de esos dos últimos elementos, la planta prototipo que se diseñó está provista de los equipos mínimamente necesarios para efectuar, de un modo u otro, dichas tareas esenciales.

En relación al post-tratamiento de los efluentes, vale la pena decir que comúnmente se recurre a procesos aerobios a fin de acelerar su maduración (Ostrem y Themelis, 2004; Arsova, 2010). Estos procesos demandan entre 1 y 3 semanas adicionales de tratamiento, al término de las cuales se obtiene un producto estable e higienizado (compost). Post-tratamientos aerobios para los lodos digeridos merecen ser considerados seriamente como un complemento armonioso para la planta prototipo de biogás.

Las tecnologías comercialmente disponibles para el tratamiento anaerobio de la FORSU ofrecen tasas de producción de biogás que van desde 0.08 hasta 0.20 m³ biogás por kg de residuo, según se observa en la Tabla IV.25. Por ejemplo, la tecnología Valorga, basada en procesos mesofílicos y termofílicos, y que dicho sea sea paso es la más utilizada a escala industrial, reporta tasas de producción de biogás que alcanzan 0.16 m³ biogás/kg-residuo. Para la planta prototipo aquí reseñada se espera un valor de 0.15 m³ biogás/kg-residuo, partiendo de un volumen diario de 6.10 m³ de biogás y 40.46 kg/día de residuos disponibles para alimentar el sistema anaerobio. Es pues una tasa de conversión cercana a las más altas reportadas para las tecnologías comerciales. Información adicional respecto del tipo específico de reactor anaerobio y materia prima de las tecnologías comerciales para el tratamiento anaerobio de la FORSU pueden consultarse en la Tabla III.11.

Karagiannidis y col. (2006) estimaron los costos por tonelada de FORSU tratada para cinco de las principales tecnologías comerciales para la digestión de esta biomasa residual. El menor de los costos contabilizados lo tuvo la tecnología Dranco, con 62 €/t (68.8 €₂₀₁₁/t; 1,155 \$/t). Le siguieron Kompogas, 63 €/t (70 €₂₀₁₁/t; 1,174 \$/t), Valorga, 68 €/t (75 €₂₀₁₁/t; 1,260 \$/t), Waasa, 90 €/t (100 €₂₀₁₁/t; 1,670 \$/t), y BTA, con una erogación estimada de 95 €/t (105 €₂₀₁₁/t; 1,770 \$/t).⁸⁷ Para el caso de la planta prototipo, partiendo de un procesamiento diario de 40.46 kg de residuos orgánicos, los 260 días por año de operación efectiva de la planta y el horizonte de vida útil de la misma que se estableció en 20 años, el costo unitario nivelado por tonelada de FORSU tratada en la planta es de \$2,485. Claramente es un monto superior al estimado para las tecnologías comerciales, pero la diferencia se justifica tanto por el tamaño como por las condiciones de funcionamiento previstas para la planta prototipo.

La misma Tabla IV.25 muestra como la digestión mesofílica aplicada a sustratos de bajo contenido de sólidos, de momento constituye la vertiente predilecta en el tratamiento anaerobio a escala industrial de la FORSU. Si bien la degradación anaerobia en condiciones

⁸⁷ Los costos fueron calculados por los autores sobre la base de una planta estándar de 20,000 t/año de capacidad de tratamiento.

termofílicas con sustratos de elevada concentración de sólidos ha mostrado un crecimiento importante en años recientes (Arsova, 2010). En lo que respecta a la configuración de los sistemas, cabe apuntar que a nivel industrial predominan los sistemas de digestión de una sola etapa, puesto que sus costos de inversión y mantenimiento son menores a los de configuraciones dos o más etapas (Mata-Alvarez y col., 2000). De las tecnologías listadas en la Tabla IV.25, a excepción de BTA, que es multietapa, todas las demás son de una sola etapa. Dependiendo de la capacidad de tratamiento, el costo por tonelada de residuo procesada en el caso de sistemas de dos etapas es a lo menos 20% más elevados que en los sistemas de una sola etapa (Oetjen-Dehne y Ries, 1995).

Tabla IV.25 - Comparativa de parámetros y rendimiento de producción de biogás de la planta prototipo con tecnologías comerciales

Planta/ tecnología	Condicio- nes ^{a,b,c,e}	Sustrato ^a , ^{c,e} , %ST	TRH ^{a,e} , días	VCO ^{a,e} , kgSTV/ m ³ -día	Producción de biogás ^{c,e}	Tasa de producción de biogás, m ³ /m ³ _{reactor} -día	Costo por tonelada de FORSU tratada ^d , \$/t
Dranco	Termofílico	35%	14	12.0	0.622 m ³ /kgSTV 0.103-0.147 m ³ /kg de residuo	7.46	1,155
Kompogas	Termofílico	23-28%	15-20	6.73*	0.30-0.40 m ³ /kgSTV* 0.10-0.13 m ³ /kg de residuo	2.01 - 2.69	1,174
Valorga	Mesofílico/ termofílico	25-30%	18-23	5.0	0.22-0.27 m ³ /kgSTV 0.08-0.16 m ³ /kg de residuo	1.10 - 1.35	1,260
Wassa	Mesofílico/ termofílico	10-15%	10-20	4.0 - 8.0	0.417 m ³ /kgSTV 0.10-0.15 m ³ /kg de residuo	1.67 - 3.34	1,670
BTA	Mesofílico	10%	4 días hidrólisis y 2 días metanogé- nesis ^e	10.0	0.12-0.15 m ³ /kg residuo	n.d.	1,770
Planta prototipo de la FI- UNAM	Psicrofílico	13.4%	65	1.94	0.69 m³/kgSTV 0.15 m³/kg de residuo	1.35	2,485

a) Vandevivere y col. (2002)

b) Verma (2002)

c) Ostrem y Themelis (2004)

d) Karagiannidis y col. (2006)

e) Rapport y col. (2008)

*Considerando FORSU separada mecánicamente

Con respecto a la velocidad de carga orgánica, resalta que la correspondiente a la planta prototipo es notoriamente inferior a las reportadas para las tecnologías comerciales, que se encuentran entre 4 y 12 kgSTV/m³-día. Esto ocurre por la diferencia en las temperaturas de operación. Mientras la planta prototipo está diseñada para operar dentro del rango psicrófilico, en torno de 20° C, las otras funcionan a temperaturas en los intervalos mesófilico y termófilico, en promedio arriba de 35° C.

Al acelerar las reacciones, el aumento en la temperatura permite incrementar la dosis de materia orgánica a ser tratada, disminuyen el tiempo de residencia y el volumen de los digestores, con lo cual es posible elevar la velocidad de carga orgánica. El argumento anterior de paso explica el por qué de las marcadas diferencias en el tiempo de residencia hidráulico. Mientras que en los procesos mesófilicos usualmente se tienen TRH de menos de 20 días, en los psicrófilicos esos tiempos aumentan a no menos del doble. Ejemplo de ello es el caso aquí reportado, donde el TRH calculado resultó de 65 días. Este aumento del TRH responde a la necesidad de alcanzar un nivel aceptable de producción de biogás, comparable a aquellos observados procesos a mayor temperatura.

El volumen específico de producción de biogás en el caso de las tecnologías comerciales reunidas en la Tabla IV.25, va de 0.22 a 0.62 m³/kgSTV, y en términos de kg de residuo, en el rango de 0.08 a 0.16 m³/kg. Para la planta prototipo, los valores estimados son 0.69 m³/kgSTV y 0.15 m³/kg de residuo. Son valores muy próximos a los de mejor desempeño de las tecnologías comerciales consideradas. Sin embargo, como lo manifiestan Rapport y col. (2008), un indicador más fidedigno de la eficiencia de los reactores anaerobios se obtiene al multiplicar la velocidad de carga orgánica por el volumen específico de producción de biogás. Este indicador aparece en la Tabla VI.1 con el nombre de tasa de producción de biogás, expresado en m³-biogás/m³-reactor-día. Tratándose de las tecnologías comerciales, las cifras calculadas están comprendidas entre 1.10 y 3.34 m³-biogás/m³-reactor-día, dejando de lado el muy lejano m³-biogás/m³-reactor-día computado para la tecnología Dranco. La planta prototipo alcanza un valor de 1.35 m³-biogás/m³-reactor-día, el cual está en la sección media del intervalo dado para las tecnologías consolidadas en el mercado.

Con relación a otras plantas a nivel prototipo para la generación de biogás a partir de FORSU, mostradas en la Tabla IV.5, la que aquí se propone tiene mayor tasa de producción específica de biogás que está previsto lograr. Para las primeras, los valores van de 0.2 a 0.53 m³/kgSTV con una presencia de CH₄ de 57 a 65%. En tanto, para la segunda el valor esperado, como ya se apuntó, es de 0.69 m³/kgSTV, aunque con un contenido apenas inferior de CH₄, de 56%. Dado que las otras plantas operan en ambientes mesófilicos o termófilicos, sus velocidades de carga orgánica son en general superiores, al encontrarse entre 2.9 y 18.8 kgSTV/m³-día.

Atendiendo a la tasa de producción de biogás, de acuerdo con la información de la Tabla IV.5, las otras plantas prototipo registran valores desde 0.78 hasta 5.0 m³-biogás/m³-reactor-día, con una media en torno de 2.4 m³-biogás/m³-reactor-día. El obtenido para la planta es de 1.35 m³-biogás/m³-reactor-día, es decir, cerca de 45% inferior al valor promedio de las otras plantas. Se aprecia entonces el impacto de la baja velocidad carga orgánica sobre el rendimiento de los reactores de la planta prototipo aquí propuesta, pese al relativamente alto volumen específico de producción de biogás dado de manera preliminar. Sin embargo, como bien apuntan Rapport y col. (2008) al hacer comparaciones entre tecnologías o instalaciones para el tratamiento anaerobio de la FORSU, conviene tener presentes las diferencias con respecto a la composición particular de los desechos y la configuración y condiciones de operación de los reactores anaerobios.

En cuanto a los aspectos económicos, como es bien sabido, a medida que aumenta la capacidad los costos económicos tienden a disminuir por el efecto de economías de escala. Este concepto explica en buena medida las atractivas cifras de proyectos de gran envergadura, puede decirse que de cualquier tipo, en contraste con aquellos de capacidad inferior. El proyecto que se relata a continuación sirve para ejemplificar lo antes mencionado.

Mata-Alvarez y col. (1992) dan a conocer el diseño de una planta para la digestión de los residuos orgánicos generados en un mercado de la ciudad de Barcelona, España. La planta comprende una sección para la selección de los residuos, otra para el tratamiento anaerobio y una más para la incineración del rechazo y, de ser necesario, la componente sólida de los lodos digeridos. La alimentación consiste en 100 t diarias de residuos, los cuales se trituran y diluyen con agua a fin de alcanzar un $\%ST$ del orden de 10.5%, semejante al aquí considerado.

También hay similitud en relación al tipo de reactor seleccionado, los autores proponen uno del tipo semi-continuo de mezcla completa, aunque éste de mucho mayor capacidad (2,000 m³) y en régimen mesófilo (35±0.5° C). Bajo tales condiciones, estiman un TRH de 14 días y una VCO de 6.4 kgSTV/m³-día; esto es, un 1/5 del TRH del aquí calculado y una VCO más de 3 veces mayor. Las discrepancias son significativas, y son consecuencia fundamentalmente de la diferencia en la temperatura de digestión dado que a medida que ésta aumenta, el TRH se acorta y el volumen de reactor disminuye, aumentando la VCO.

Para los efluentes, Mata-Alvarez y col. (1992) incorporan igualmente un tanque sedimentador (120 m³). El sobrenadante se envía a una planta para el tratamiento de aguas residuales, en tanto que el lodo en sí se introduce a un filtro prensa. El líquido resultante del prensado del lodo se propone que sea utilizado para la dilución de los residuos y el sólido remanente, incinerado o sometido a un proceso aerobio para la obtención de compost. La producción estimada de biogás asciende a 5,850 m³/día con un 65% de CH₄, lo que se traduce en una potencia bruta de 1,565 kW. Se pretende convertir el biogás en electricidad y energía térmica para consumo del mercado y de la propia planta.

La planta bosquejada por Mata-Alvarez y col. (1992) demanda una inversión valuada en cerca de 3 millones de dólares (de 1992), mientras los costos totales se ubicaron en 530 mil dólares (del 1992) por año. Los ingresos provienen esencialmente de la venta de electricidad y por eludir el pago por concepto de disposición final de los residuos. Así pues, asumiendo un factor de operación anual cercano al 70%, auguran una TIR de casi 18% junto a un periodo de recuperación de la inversión de sólo 5 años. Estos dos últimos indicadores de rentabilidad son indiscutiblemente más ventajosos que los vinculados a la planta prototipo, parte de ello se debe al efecto de las economías de escala.

Adicionalmente, otro hecho importante es que la planta propuesta por Mata-Alvarez y col. (1992) recibe la mayor parte de sus ingresos de los ahorros obtenidos al evitar pagar las tarifas por disposición final de los residuos. Como bien lo subrayan Rapport y col. (2008), esta variable tiene un gran impacto en la viabilidad económica-financiera de los proyectos de degradación anaerobia de la FORSU. En el caso de la planta prototipo no se considero está fuente adicional de ingresos, en primer lugar porque el restaurante no realiza formalmente ningún desembolso por esta cuestión, y segundo, por la cantidad relativamente pequeña de desechos orgánicos que genera.

Por otro lado, Ferrer y col. (2011) reportan la adaptación de un digestor de bajo costo a escala residencial, originalmente diseñado para climas cálidos a modo de operarlo satisfactoriamente a elevada altitud y en condiciones psicrófilas. No obstante que la materia

prima utilizada para alimentar los digestores consistió en estiércol vacuno, conviene entresacar algunos de los resultados de este estudio dado que se trata de un digestor que opera a temperaturas similares a las previstas para la planta de biogás objeto del presente trabajo. Los digestores utilizados por Ferrer y col. (2011) fueron del tipo tubular, fabricados en plástico y de entre 2.4 y 7.5 m³ de volumen útil. Con temperaturas en el rango de 20° a 25° C, los TRH se extendían entre los 60 y 90 días, mientras que la producción específica de biogás fue de 0.35 m³/kgSTV, con una concentración de 65% de CH₄.

Aun cuando hay diferencia en cuanto al tipo de biomasa residual utilizada, los TRH de aquellos digestores y el correspondiente a la planta prototipo son consistentes entre sí fruto de las temperaturas de operación de ambos. Sin embargo, la tasa de producción de biogás reportada por Ferrer y col. (2011) es 50% menor a la pronosticada para la planta, si bien el contenido de CH₄ es 16% mayor al 56% que se espera observar en el biogás producido en la planta prototipo. Al margen de la diferencia respecto a la materia prima, no se descarta que una vez puesta en marcha la planta, la tasa de producción de biogás esté por debajo del valor vaticinado de 0.69 m³/kgSTV. En tal caso, deberá considerarse alargar todavía más el TRH, lo que implicaría incrementar la capacidad de los reactores de la planta prototipo, o bien buscar la manera de elevar algunos grados la temperatura de digestión.

El digestor propuesto por Botero y Preston (1987) es también del tipo tubular de flujo continuo. Se distingue por el hecho de que tanto su construcción como instalación y mantenimiento se llevan a cabo con insumos de muy bajo costo y mínima mano de obra. El costo total estimado por concepto de materiales y ejecución de las obras necesarias es de \$200 USD (\$396 USD₂₀₁₁, alrededor de \$5,150). El digestor está elaborado a base de bolsa de polietileno, con una vida útil promedio de 10 años. El sustrato a degradar es excremento, ya sea de vaca, caballo o cerdo. Con esas características, a decir de Botero y Preston (1987), un digestor de 9 m³ bastaría para proveer suficiente biogás como para satisfacer las necesidades diarias de energía para cocción de alimentos de una familia entera, sin especificar el número de integrantes de la misma.

Un digestor así de sencillo como el utilizado por Botero y Preston (1978) o Ferrer y col. (2011) podría ser utilizado para la degradación anaerobia de FORSU, reduciendo sensiblemente los costos variables y de inversión. Vale recordar que para el caso de la planta prototipo aquí diseñada, los costos variables en más de 50% están asociados al consumo de energía eléctrica, fundamentalmente por parte de la bomba y el motor del mezclador del reactor R-I. Usando digestores tubulares de polietileno como los anteriormente descritos, podría prescindirse de estos dos aparatos; no así del triturador, el cual seguiría siendo necesario dadas las características de origen de la FORSU. Al suprimir la bomba y el mezclador, el consumo de electricidad disminuiría y en consecuencia lo harían también los costos variables. Esto supondría una mejora en la rentabilidad de la planta, moderada dado el impacto que sobre ella tienen los costos variables.

Con respecto a los costos de inversión, cabe subrayar, en alusión a la planta surgida del presente trabajo, que poco más de 22% de la inversión inicial estimada corresponde a la adquisición de ambos digestores y la bomba de alimentación de sustrato. Si además se considera lo desembolsado por concepto de obra civil, el porcentaje es entonces del 85%. Ciertamente es que de acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad, la inversión inicial tiene una influencia marginal en la rentabilidad de la planta, pero no hay duda de que disminuir su monto indudablemente ayudaría a hacer más atractiva la propuesta. Con ello se ampliarían las posibilidades de replicación en otros restaurantes o establecimientos similares a modo de atender el ingente problema asociado al manejo y disposición de una porción sustantiva de los residuos sólidos urbanos.

**Esta página se dejó en
blanco intencionalmente**

CAPÍTULO V

INSTALACIÓN DE LA PLANTA PROTOTIPO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS. RESULTADOS

A lo largo de la instalación de los distintos componentes que dan forma a la planta de biogás, en todo momento se procuró que su acomodo fuera funcional y seguro. Así se hizo para los equipos involucrados directamente en el tratamiento anaerobio de los residuos sólidos orgánicos, desde los necesarios para la preparación del sustrato de alimentación, hasta los estanques para la sedimentación de los lodos digeridos. El mismo criterio prevaleció al decidir la ubicación de los elementos del sistema de conducción, limpieza y almacenamiento del biogás, al igual que en la colocación de los componentes para hacerlo llegar al equipo de combustión seleccionado. Sin embargo, en algunas ocasiones las restricciones de espacio, pero sobre todo de recursos económicos, obligaron a la utilización de componentes de características y prestaciones que no necesariamente empatan con los lineamientos en un principio establecidos, en especial en lo tocante a calidad y compatibilidad.

Aun con esas vicisitudes, la instalación de los elementos que conforman la planta generadora de biogás se efectuó, en términos generales, de forma aceptable. Se tuvieron en cuenta pautas y recomendaciones surgidas de autores y organizaciones especializadas en la producción y aprovechamiento de biogás en unidades sencillas a pequeña escala en distintas locaciones. De igual modo, se buscó profundizar en el entendimiento del fenómeno de la degradación anaerobia de materia orgánica con la intención de dilucidar una configuración de los equipos que favoreciera la estabilidad y eficiencia del proceso. Aunque al tratarse de un tema sumamente vasto, el nivel logrado de inmersión en él fue más bien somero. Pudo conocerse tan sólo de los conceptos y fundamentos que describen y explican esta peculiar transformación bioquímica de la biomasa. Si bien ayudaron en buena medida a identificar las principales variables o parámetros de control, así como a advertir las más serias ventajas, inconvenientes y limitaciones del proceso de degradación anaerobia de biomasa residual.

De igual modo, se abordaron los tópicos referentes al manejo y aprovechamiento con fines energéticos del biogás. La composición y, por consiguiente, las propiedades específicas de este combustible alternativo imponen una serie de adecuaciones y medidas de seguridad particulares. Lo anterior no sólo con objeto de minimizar los riesgos físicos y toxicológicos asociados a la producción, almacenamiento y utilización del biogás, sino también para conseguir una conversión eficiente del biogás para los usos finales que se tengan previstos.

El propósito del presente capítulo consiste es hacer un recorrido a través de lo que fue el levantamiento de la infraestructura básica y el montaje de los equipos de la planta productora de biogás, de acuerdo con los lineamientos establecidos de manera preliminar en las fases de planeación y diseño. Posiblemente se tiene presente la relativa profundidad con que se abordaron dichos aspectos en el capítulo anterior, donde fueron detallados los elementos medulares del sistema anaerobio y de la gestión del biogás. Ahora, en este Capítulo V hay un predominio de elementos gráficos cuya intención es mostrar con amplitud lo realizado a lo largo del proceso del levantamiento y montaje de la planta de biogás. En donde se creyó pertinente, las ilustraciones se hicieron acompañar de explicaciones concisas que dan cuenta de alguna información o aspecto relevante.

V.1 – Obra civil

Por la disponibilidad de espacio y la nula interferencia con la realización de las actividades cotidianas del restaurante, la sección posterior del establecimiento fue elegida para la edificación de la infraestructura de resguardo de la parte medular de la planta, esto es, los reactores anaerobios y los equipos para el procesamiento de los residuos orgánicos. Dicha infraestructura consistió básicamente en un pequeño habitáculo con las dimensiones indicadas en la Figura V.1 y la apariencia aproximada mostrada en la Figura V.2. Con una altura de los muros de 3.0 m, el habitáculo cuenta con un único acceso de 2.60 m, anchura suficiente para permitir la ejecución de maniobras de distinta índole, como puede ser la entrada y retiro de equipos, por citar un ejemplo. La construcción del habitáculo se inicio a comienzos de febrero del año 2011 y su conclusión demoró alrededor de 3 meses.

Adicionalmente se construyeron los estanques de sedimentación, el primero con una capacidad de 0.80 m³ y el segundo de 0.40 m³, lo que hace un total de 1.20 m³. En el primer estanque se depositarán los lodos digeridos extraídos directamente del reactor R-II, ahí mismo se separan sus fases sólida y líquida trasladando esta última al segundo estanque. También se encargó la construcción de pequeña base de concreto para el empotramiento de la bomba de cavidad progresiva. La ubicación de esta base así como la de ambos estanques de sedimentación, se aprecian en la Figura V.3.

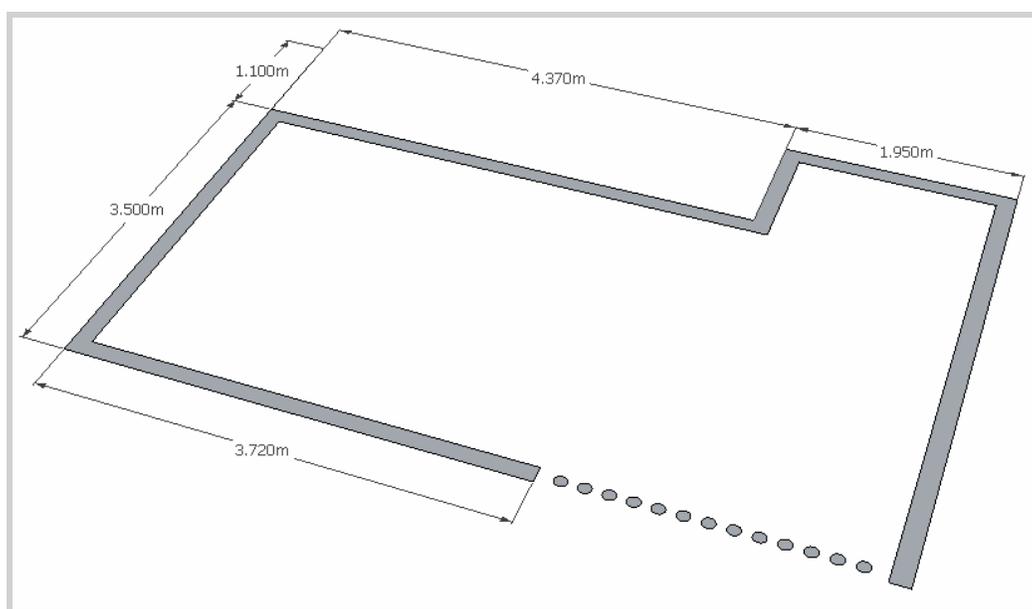


Figura V.1 – Dimensiones del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento

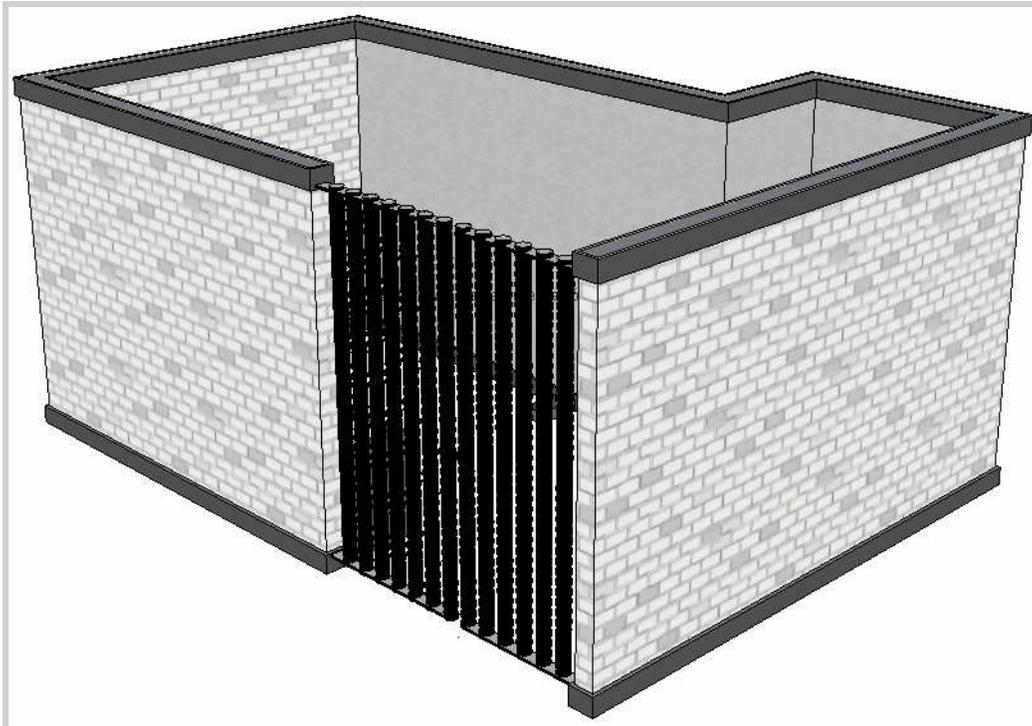


Figura V.2 – Vista isométrica del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento

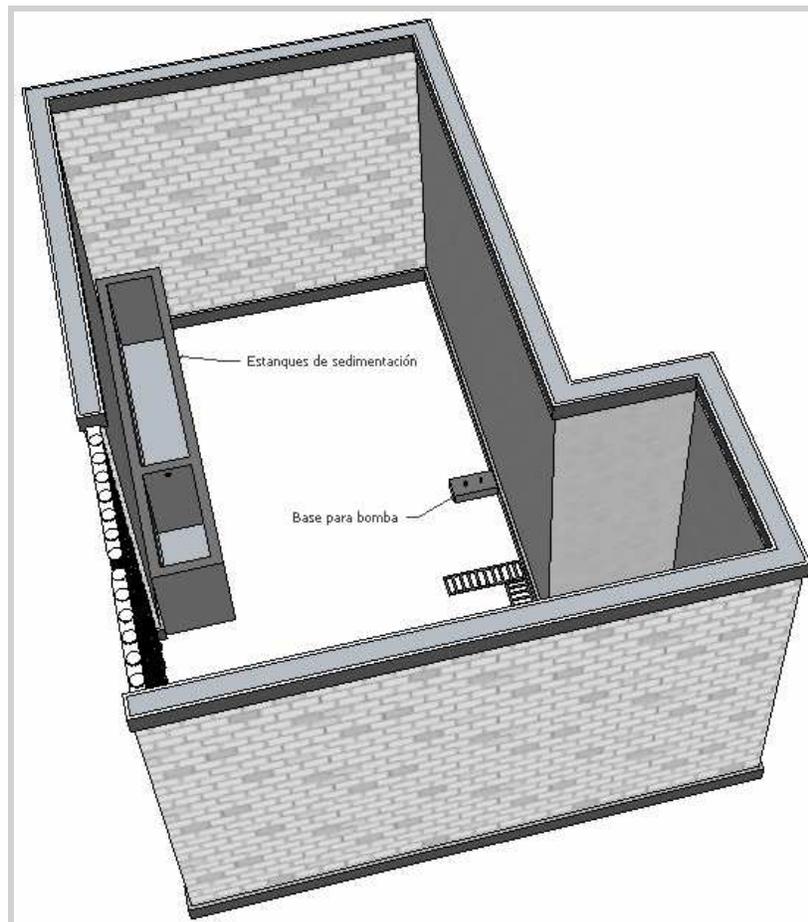


Figura V.3 – Geometría y ubicación de los estanques de sedimentación y de la base para la bomba

La evolución de la construcción de la infraestructura se capturó fotográficamente con objeto de dar seguimiento a su progreso. Así, la Figura V.4 reúne las fotografías más representativas del acervo compilado a lo largo de los cerca de 3 meses en que se completó la obra. Ahí se aprecian desde los preparativos en el lugar seleccionado, la nivelación del piso y el levantamiento de los muros, hasta la colocación de la reja de protección y de las instalaciones hidráulica y eléctrica para la conexión con los diferentes aparatos.

V.2 – Instalación de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio

Concluido el habitáculo, se dieron instrucciones para efectuar el traslado de los reactores anaerobios y del resto de los equipos, junto con piezas de herrería diseñadas ex profeso para la instalación y aseguramiento de equipos como el triturador y la bomba para suministrar el sustrato a los digestores. Dado que se manipularán materiales de desecho, se consideró conveniente incluir una tarja para el lavado de los implementos de trabajo y el aseo del personal que esté en funciones en la planta. También se colocó una lámpara para iluminar por las noches, en caso de que se requiera atender algún asunto o contratiempo en esas horas.

Con los reactores ubicados en sus sitios respectivos, se dio paso a la colocación de la tubería para la conducción del sustrato, que comunica entre sí a los digestores y a éstos con la bomba de alimentación, el tanque receptor de sustrato y los estanques de sedimentación de los lodos digeridos. Se colocaron también las terminales para la evacuación periódica del sustrato remanente en las líneas de conducción. Para la instalación de toda esta tubería se contó con el apoyo de estudiantes prestadores de Servicio Social. Su labor comprendió, entre otras cuestiones, la medición, corte y unión de los diferentes tramos de tubería con los conectores y válvulas de acuerdo al diagrama de flujo anteriormente presentado.

Gracias a que se empleó tubería de PVC, la instalación de los conductos fue relativamente sencilla. La tubería de PVC es fácil de cortar y unir, sin exigir demasiada pericia por parte de quien lo realiza, esto permitió que se concluyera en tiempo más o menos breve la instalación de la línea de conducción de sustrato. En algunas secciones de esta línea de conducción se optó por utilizar manguera de PVC, ya que al ser flexible facilitó enormemente las conexiones que con tubo rígido se antojaban complicadas. La tubería de PVC tiene grandes ventajas como su bajo costo y fácil reparación, aunque su durabilidad se ve sensiblemente disminuida por la exposición a la radiación solar directa. No obstante, dado que se colocó una tubería de pared gruesa, es de esperarse que su deterioro se perciba, si acaso, al cabo de varios años.

El triturador de los residuos se colocó sobre una estructura de hierro que lo sitúa a una altura tal que permite que el sustrato obtenido se deposite directamente en el tanque receptor, sin que ello complique el vertido de los desechos en la tolva acoplada al aparato. El tanque receptor de sustrato consiste llanamente en un tambo metálico recortado a una altura aproximada de 50 cm. Su aforo máximo es cercano a 150 L, esto es más del doble del volumen promedio diario de sustrato que se prevé producir con los residuos orgánicos del restaurante. Cerca de la base del tanque receptor de sustrato se hizo un orificio al que se le adaptó un conector plástico para que desde ahí la bomba succione el sustrato. Asimismo, se le sobrepuso una tapa, también metálica, para evitar el salpique de sustrato y aminorar en alguna medida la propagación de olores. La bomba, en tanto, se afianzó en su base de concreto con un par de tuercas y tornillos ordinarios de la medida apropiada. Se vigiló que la relación de alturas de dicha base y la del tanque receptor de sustrato permitiera el cebado automático de la bomba, esto con la finalidad de agilizar el procedimiento de alimentación al reactor anaerobio R-I. La bomba quedó protegida con una estructura metálica tipo jaula para guarecerla de la lluvia e igualmente para disuadir posibles actos de pillaje.



Delimitación y preparación del terreno



Inspección del subsuelo



Inicio de los trabajos de levantamiento de muros



Preparativos para la colocación del piso



Vertido de mezcla para la conformación del piso



Sumando esfuerzos para lograr buenos resultados



Maniobras para la nivelación del piso



A punto de concluir una jornada de trabajo extenuante



Muro norte listo para la colocación de cadena

Figura V.4 - Levantamiento de la infraestructura de la planta generadora de biogás



Vista de la cara interna de uno de los muros del habitáculo



Armado de andamios para la culminación de muros



Finalización de uno de los muros del habitáculo



El reactor R-II a su llegada al habitáculo



Habitáculo prácticamente concluido



Vista parcial de los alrededores del habitáculo



Reja a la entrada del habitáculo



Aspecto final de los estanques de sedimentación



Instalación de reja-protección en la parte superior del habitáculo

Continuación Figura V.4 - Levantamiento de la infraestructura de la planta generadora de biogás

En la serie de fotografías mostradas en la Figura V.5, se observan ciertos detalles de los componentes principales del sistema de tratamiento anaerobio, las conexiones para la circulación del sustrato, así como algunos elementos complementarios. En tanto, la Figura V.6 da cuenta de las posiciones al interior del habitáculo de la tarja, el triturador de residuos, del tanque receptor de sustrato, de la bomba de alimentación de sustrato, de los dos reactores anaerobios y de los estanques de sedimentación.



Tanque receptor de sustrato



Vista parcial del reactor anaerobio R-I



Línea de conducción entre ambos reactores



Triturador y tanque receptor de sustrato



Reactor anaerobio R-I



Estanques de sedimentación de efluentes



Jaula para el resguardo de la bomba



Estanques de sedimentación y reactor R-II



Vista completa del reactor anaerobio R-II

Figura V.5 – Principales componentes del sistema de tratamiento anaerobio

Luego de un tiempo, se advirtió la necesidad de cubrir el motor que acciona el mezclador del reactor R-I a fin de evitar la entrada de agua de lluvia que en un momento dado podría filtrarse al motoreductor⁸⁸ y provocar algún tipo de desperfecto. Se le colocó, pues, sobre le mismo motor, un pequeño techo metálico circular de área suficiente para proteger al motor y al moto-reductor de las precipitaciones pluviales. Con respecto al reactor R-II, en virtud del material del que está fabricado, una variante de polietileno, tolera sin ningún problema los embates de agentes ambientales, como lluvia y radiación solar, y dado que no tiene aditamentos electromecánicos, no fueron requeridas medidas especiales para su protección.

⁸⁸ El motor del mezclador tiene acoplado un moto-reductor, el cual es una suerte de caja de engranes que disminuye el número de revoluciones por minuto (RPM) con que gira el rotor del motor, ello con la finalidad de proporcionar un suave mezclado del medio en descomposición.

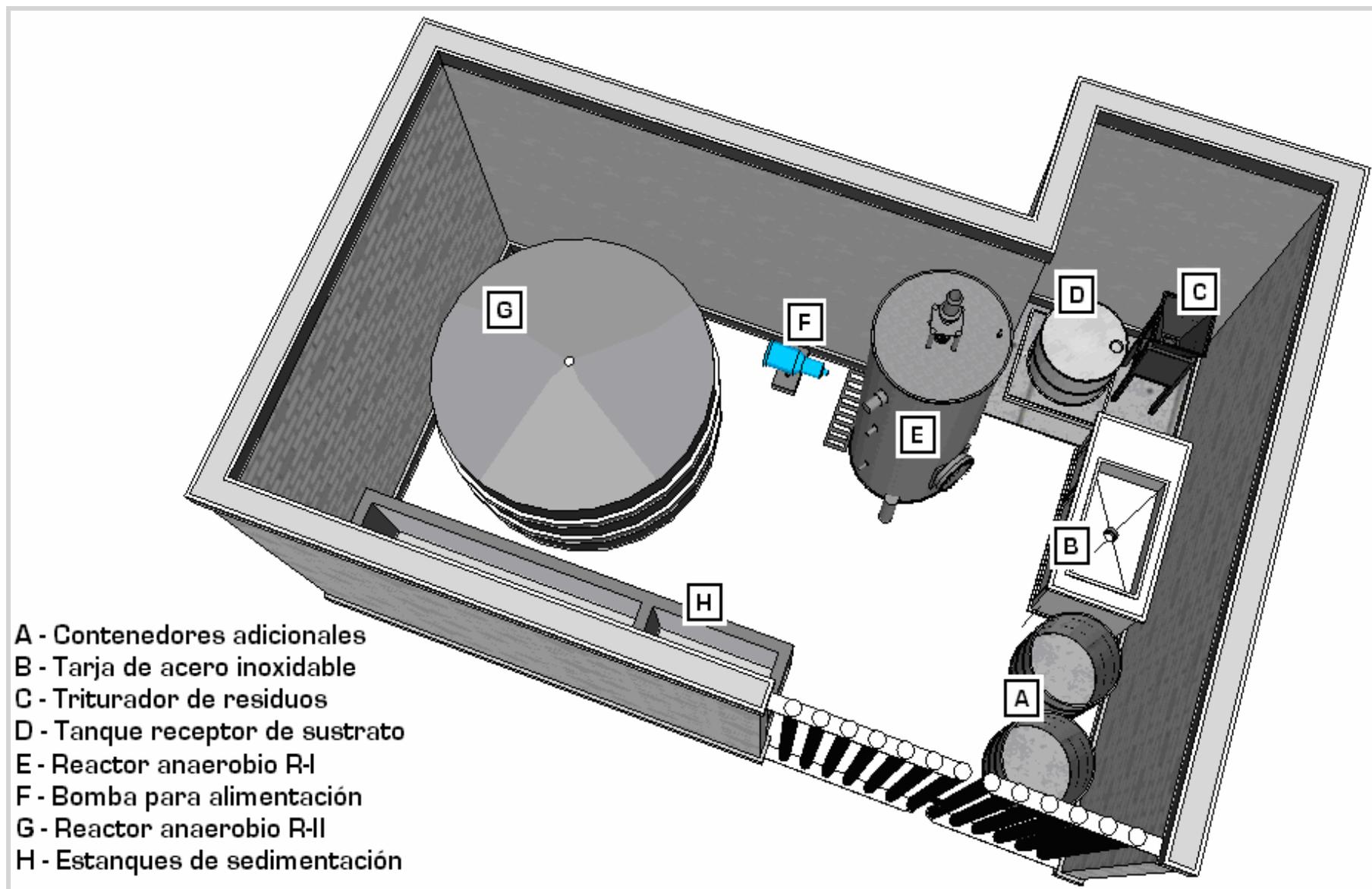


Figura V.6 - Ubicación final de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio

V.3 - Instalación de los componentes para el manejo del biogás

Una vez concluido el montaje de los componentes del sistema para el tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos, la siguiente etapa consistió en la instalación de la tubería para la evacuación del biogás de los digestores, su conducción a los dispositivos de remoción de impurezas y finalmente su almacenamiento en el reservorio. Como se recordará, en el diseño preliminar de la planta de biogás se consideró la manguera de polietileno de alta densidad (PEAD) para la canalización del biogás. La elección respondió, entre otras razones, por su sobresaliente resistencia a la intemperie y tolerancia a los compuestos ácidos y corrosivos presentes en el biogás. Las uniones entre los diferentes segmentos de la tubería, así como con sus piezas accesorias, se llevaron a cabo mediante soldadura por termofusión.⁸⁹ Durante la colocación de la tubería de conducción de biogás, se tuvo en cuenta dotar de la pendiente mínima necesaria a la tubería para no dar lugar a eventuales obstrucciones por acumulación de vapor condensado. Esta inclinación se observa tanto en la tubería a la salida de ambos reactores como en el ramal principal. Se dispuso además una trampa de condensación con su respectiva válvula para la purga ocasional del líquido que se vaya depositando. Para dar cuenta de ello se presentan en la Figura V.7 algunas fotografías de la tubería de PEAD y la trampa de condensación de vapor de agua,



Figura V.7 - Dirección de las pendientes en la colocación de la tubería de conducción del biogás

⁸⁹ Básicamente, la soldadura por termofusión consiste en colocar los bordes de las piezas a unir sobre una superficie caliente, (alrededor de 200 °C) hasta el punto justo en que comienza a reblandecer el PEAD; acto seguido, las piezas se retiran con cautela de la superficie caliente y se empalman sus bordes ejerciendo un poco de presión, vigilando que queden lo mejor centrados posible para garantizar un sellado completo y duradero. El cordón de soldadura formado se deja enfriar por algunos minutos para enseguida verificar la uniformidad y continuidad del mismo. Para los conectores (codos, tees, adaptadores, entre otros) el procedimiento es semejante, con la diferencia de que aquí se calientan la cara interna del conector y la porción correspondiente de la superficie externa de la tubería.

En la azotea vecina más cercana al habitáculo se instalaron los componentes para la limpieza y almacenamiento del biogás. El filtro para la remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S) se sujetó en el interior de una jaula de hierro de dimensiones proporcionales al tamaño del filtro. La utilización de la jaula responde a motivos similares a los que hicieron necesaria la protección la bomba de alimentación de sustrato. El lecho del filtro está formado por tres madejas idénticas de óxido de hierro (Fe_2O_3) en la forma de filamentos. Este es el lecho de Fe_2O_3 que se deberá regenerar y, en su caso, reemplazar teniendo presentes los tiempos pronosticados durante el diseño del sistema. Junto al filtro de H_2S , se instaló un serpentín metálico el cual se desempeña como un condensador del vapor de agua que no hubiese sido eliminado en la trampa de condensación o por expansión en frío en la cámara del lecho de remoción de H_2S . Tanto el serpentín como el desulfurador cuentan con tapones roscados para el drene del vapor de agua que eventualmente condense. Imágenes de los elementos antes mencionados se muestran en la Figura V.8.



Figura V.8 – Componentes del sistema para el manejo del biogás (I). *l*zquierda, filtro para la remoción del H_2S ; *centro*, madejas de Fe_2O_3 del lecho del filtro; *derecha*, serpentín

El otro extremo del serpentín está conectado con el flujómetro de desplazamiento positivo tipo diafragma por medio del cual se registra el volumen diario de biogás que se obtenga de ambos reactores anaerobios. El flujómetro se aseguró con firmeza a una columna aladaña y se envolvió igualmente con una malla metálica a modo de evitar en la medida de lo posible que sea hurtado. Luego del flujómetro viene el reservorio de baja presión. Éste se colocó directamente sobre la superficie del terrado. Cabe apuntar que el material del que está fabricado el reservorio, lona con recubrimiento de PVC, es sensible a la radiación solar directa, lo cual obliga a inspeccionar de manera regular el estado del material en busca de agrietamientos en su superficie exterior. En contraparte, las picaduras en este material es posible repararlas con sólo aplicar una cantidad suficiente de adhesivo para tubería de PVC en la zona donde se localice la abertura.

Con respecto a la presión de almacenamiento del biogás, existe la posibilidad de incrementarla algunas unidades mediante la superposición de pesos sobre el reservorio. La fuerza debida a la masa de esos cuerpos y a la acción de la fuerza gravedad, provocaría un efecto moderado de compresión del biogás contenido en el reservorio. Con ese cambio en la presión del biogás podría lograrse, de ser necesario, el nivel óptimo para el correcto funcionamiento de los quemadores del equipo de combustión. A la salida del reservorio, mediante una derivación de la tubería principal, se montó el manómetro tipo U. Conviene recordar que este manómetro está pensado para funcionar además como válvula de alivio para el control de la presión del biogás. El rango de dicho manómetro, que dicho sea de paso es una de las varias

manualidades que improvisaron durante la instalación de la planta, se estableció en 1.0 m H₂O con una resolución de 0.01 m H₂O. Una vez puesta en marcha la planta, puede suceder que el umbral de activación de la válvula de alivio no sea el adecuado, muy bajo o demasiado alto. En ese caso bastaría con acortar el rango del manómetro para ajustar el umbral de activación al valor que convenga. En el mismo manómetro, se dejó una pequeña saliente para la toma de muestras de biogás que ayudarán en la identificación y cuantificación de sus componentes.

Para finalizar, se agregó un arresta-llamas o trampa de llama construido por cuenta propia conforme al diseño y materiales referidos en el capítulo anterior. La posición en que se encuentra la trampa de llama con relación al resto de los componentes, tiene el propósito de protegerlos, primordialmente al reservorio y a los digestores, de un posible aunque poco probable retorno de una llama desde el equipo de combustión. Luego del arresta-llamas, el biogás se dirige a la estufa para ser utilizado en la producción de energía térmica. Agrupadas en la Figura V.9, se muestran imágenes de los equipos que complementan el sistema instalado para el manejo del biogás. Por su parte, la Figura V.10 es una representación computacional que muestra la ubicación en el terrado los equipos que integran dicho sistema.



Figura V.9 - Componentes del sistema para el manejo del biogás (II). Arriba a la izquierda, flujómetro; arriba al centro, reservorio de biogás; arriba a la derecha, manómetro-válvula de alivio; abajo a la izquierda, punto de muestreo en el manómetro-válvula de alivio; abajo al centro, elementos de la trampa de llama; abajo a la derecha, trampa de llama instalada

V.4 - Instalación de los componentes para el aprovisionamiento del biogás

El último tramo de la instalación comprendió la colocación de los aditamentos para el suministro del biogás a los quemadores de la estufa situada en una sección exterior del restaurante. Del arresta-llamas se tendió otro segmento de tubería de PEAD hasta que se consiguió sortear la distancia hasta la estufa. Una vez ahí, se definió un lugar apropiado para la

colocación del regulador de presión y el segundo manómetro, este último de tipo compacto y analógico. La mejor opción para la colocación de esos equipos fue una de las esquinas interiores del mueble de la propia estufa. No obstante, a recomendación del personal del establecimiento, el cual alertó de constantes robos en la zona⁹⁰, se decidió hacer desmontable esa porción de la instalación. De este modo, serán los propios empleados del restaurante los encargados de colocar y retirar tanto el regulador de presión como el manómetro, los cuales, convenientemente, están unidos en una sola pieza.

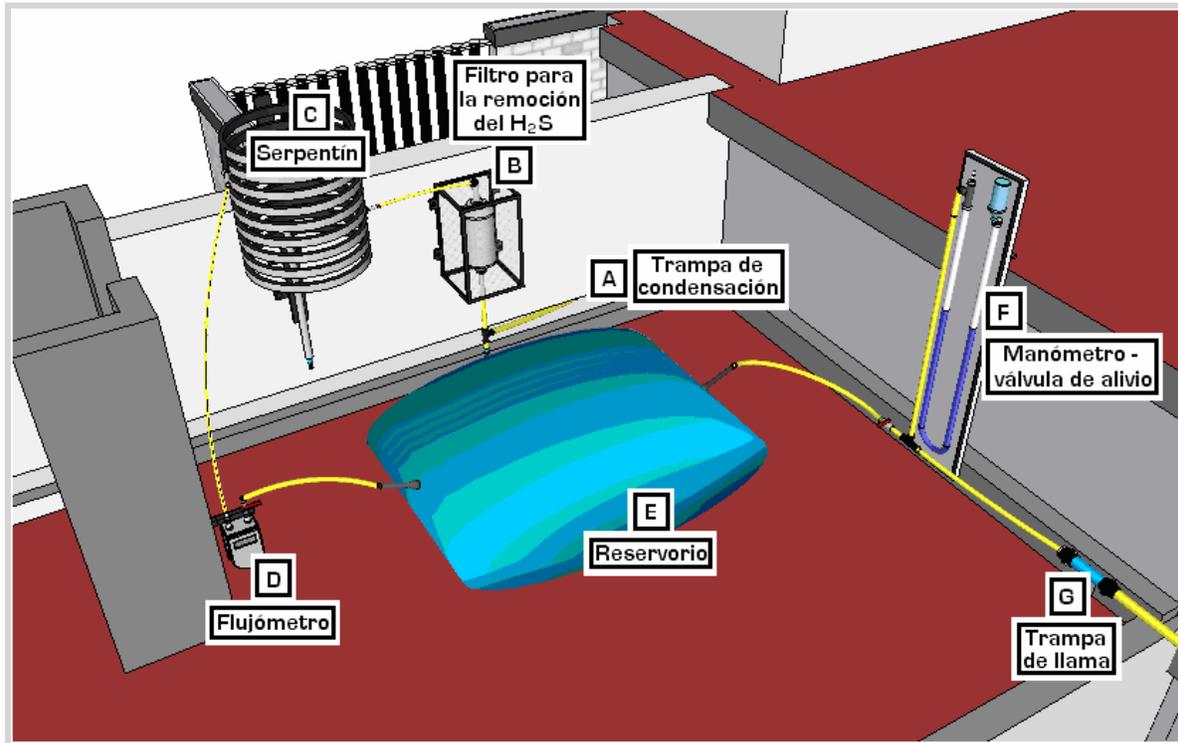


Figura V.10 – Arreglo final de los componentes del sistema para el manejo del biogás

Enseguida, una manguera ordinaria de plástico para gas conecta la salida del manómetro con la tubería que suministra el biogás al trío de quemadores del equipo de combustión. Esta tubería es semejante a la que está montada en la estufa para el aprovisionamiento del GLP a sus tres quemadores. Con aquella, el único inconveniente reside en el material con que están fabricadas las llaves que conectan con los quemadores. Al estar hechas de cobre, es posible que sean atacadas por algún compuesto o combinación de éstos que viaje en el biogás, como puede ser el ácido carbónico (H_2CO_3), formado de la comunión entre vapor de agua y dióxido de carbono. Para evitar correr este riesgo, hubiera sido deseable instalar llaves con idéntico diseño pero fabricadas con otro material, acero inoxidable, por ejemplo. Sin embargo, esto no pudo llevarse a cabo esencialmente por razones de tipo económico, pues la confección bajo pedido de dichas llaves sin duda resulta onerosa. En cambio, las llaves hechas de cobre son asequibles (su costo no suele exceder \$20.00) y fáciles de conseguir, de tal suerte que su eventual reemplazo no supone un asunto complicado. La adquisición del juego adicional de tres quemadores queda pendiente. Como se dijo, estos quemadores deberán ser calibrados en relación al diámetro del orificio del inyector y a la presión de alimentación del biogás, para así operar con seguridad y eficiencia el equipo de combustión.

⁹⁰ En el lapso en se estuvo laborando en la instalación, se tuvo conocimiento del robo, en dos ocasiones, de parte de la tubería, de cobre que suministra el gas LP al establecimiento. En una de esas ocasiones, también fue sustraída la tubería, también de cobre, por la que se hacía llegar agua al habitáculo donde se localizan los reactores; fue necesario sustituir el tramo faltante con tubería de PVC hidráulico. A la fecha no se ha suscitado de nueva cuenta este último incidente.

En la Figura IV.11 se muestran algunas imágenes del tubo para el aprovisionamiento del biogás a los quemadores de la estufa, y de la manera en que quedó instalado en paralelo con el tubo por donde se suministra el GLP. Asimismo, una de las imágenes muestra la ubicación provisional del regulador de presión y el manómetro por donde deberá ingresar el biogás antes de ser canalizado a los quemadores. Una representación virtual de la posición del equipo de combustión con relación a los componentes que conforman el sistema para el manejo del biogás, se aprecia en la Figura V.12. Para terminar, la serie integrada por las Figuras V.13 a la V.16 expone diversas perspectivas de un modelo virtual tridimensional donde es posible observar la ubicación de los diferentes sistemas que integran la planta generadora de biogás: El sistema para el tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos, el sistema para el manejo del biogás, y el sistema para el suministro del biogás a la estufa del restaurante.

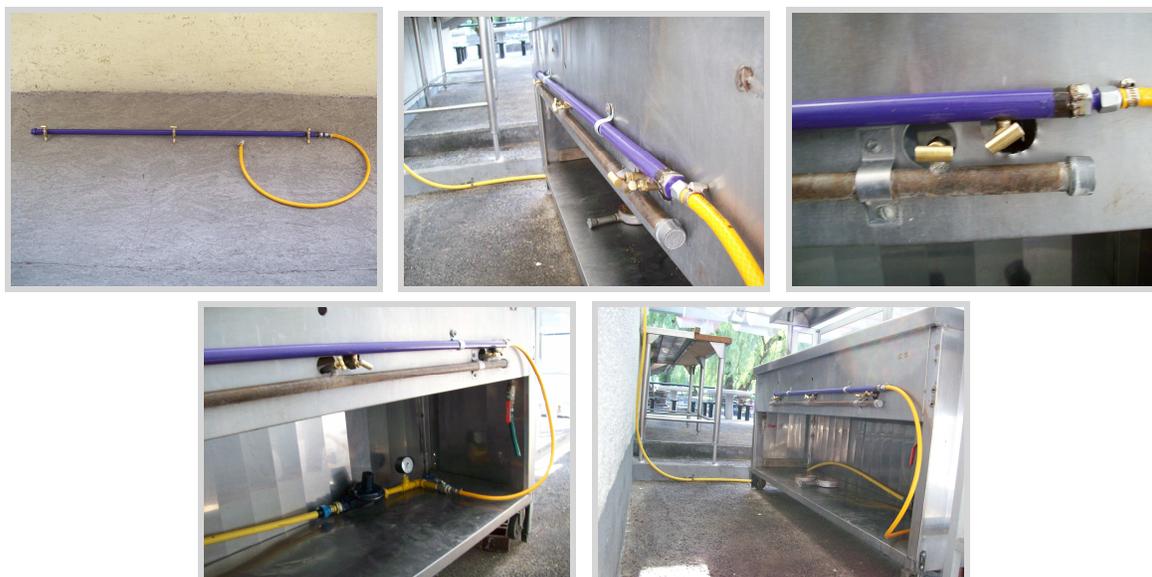


Figura V.11 – Componentes del sistema de suministro de biogás al equipo de combustión
Arriba a la izquierda, tubo para la distribución del biogás a los quemadores; arriba al centro, instalación del tubo en la cocinilla; arriba a la derecha, detalle de las llaves; abajo a la izquierda, regulador de presión y manómetro; abajo a la derecha, vista de la cocinilla con las modificaciones practicadas para el uso del biogás

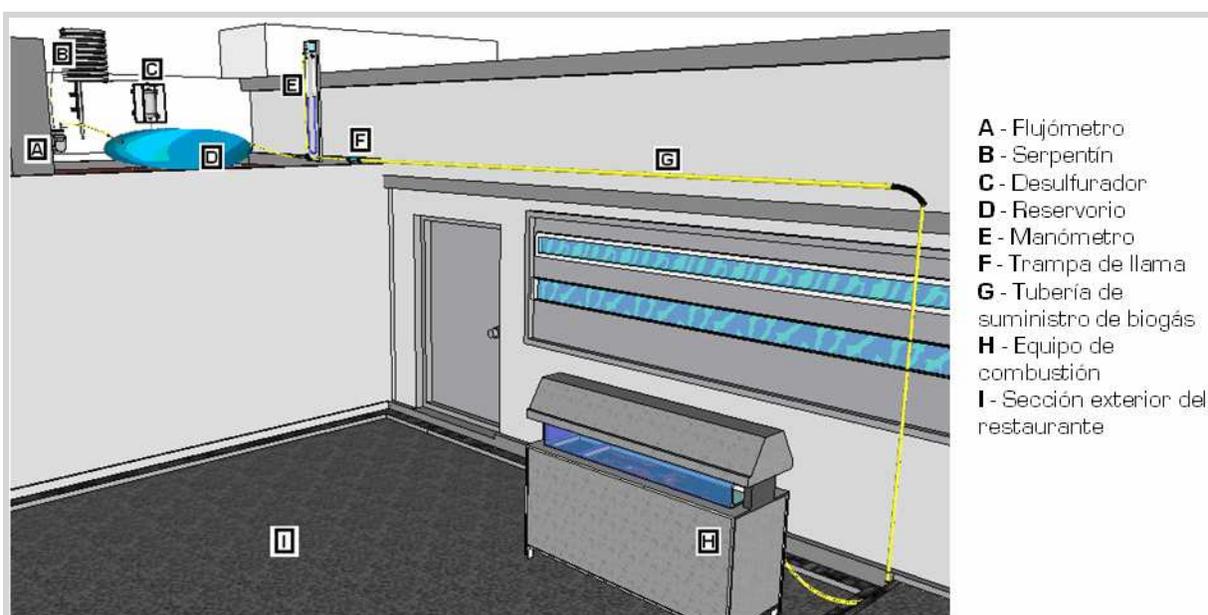


Figura V.12 – Ubicación relativa de los componentes para el manejo del biogás y del equipo de combustión

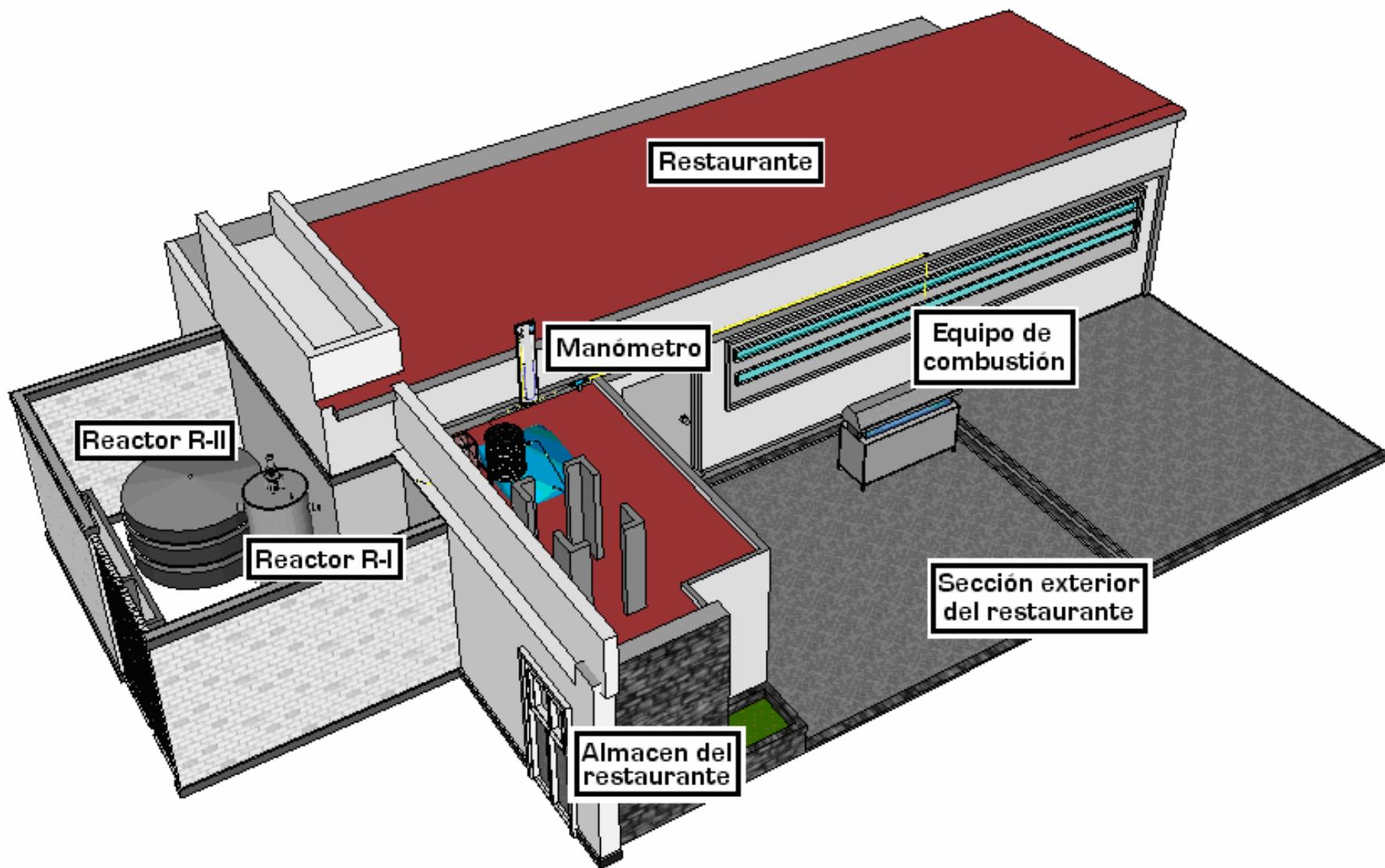


Figura V.13 - Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (I)

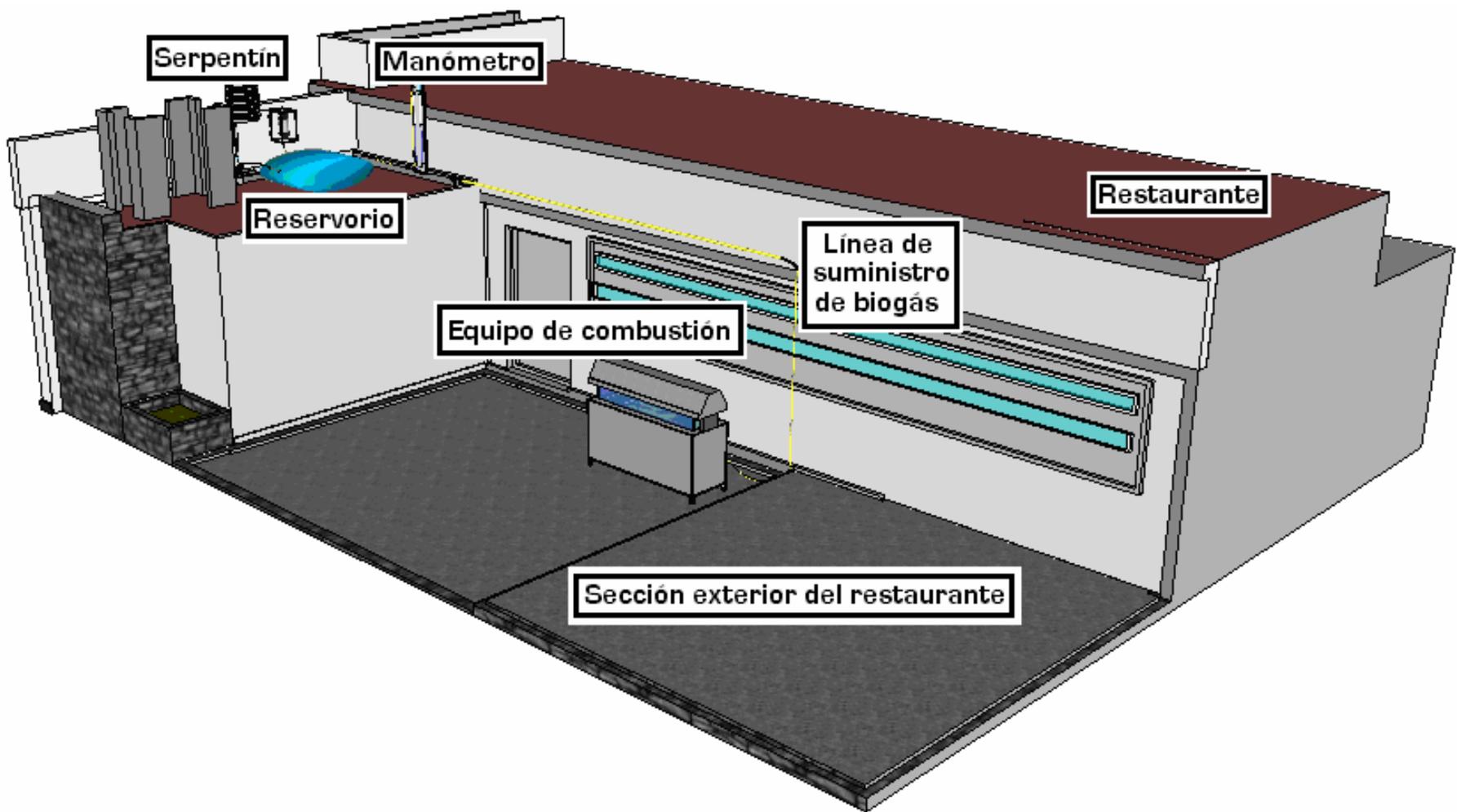


Figura V.14 - Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (II)

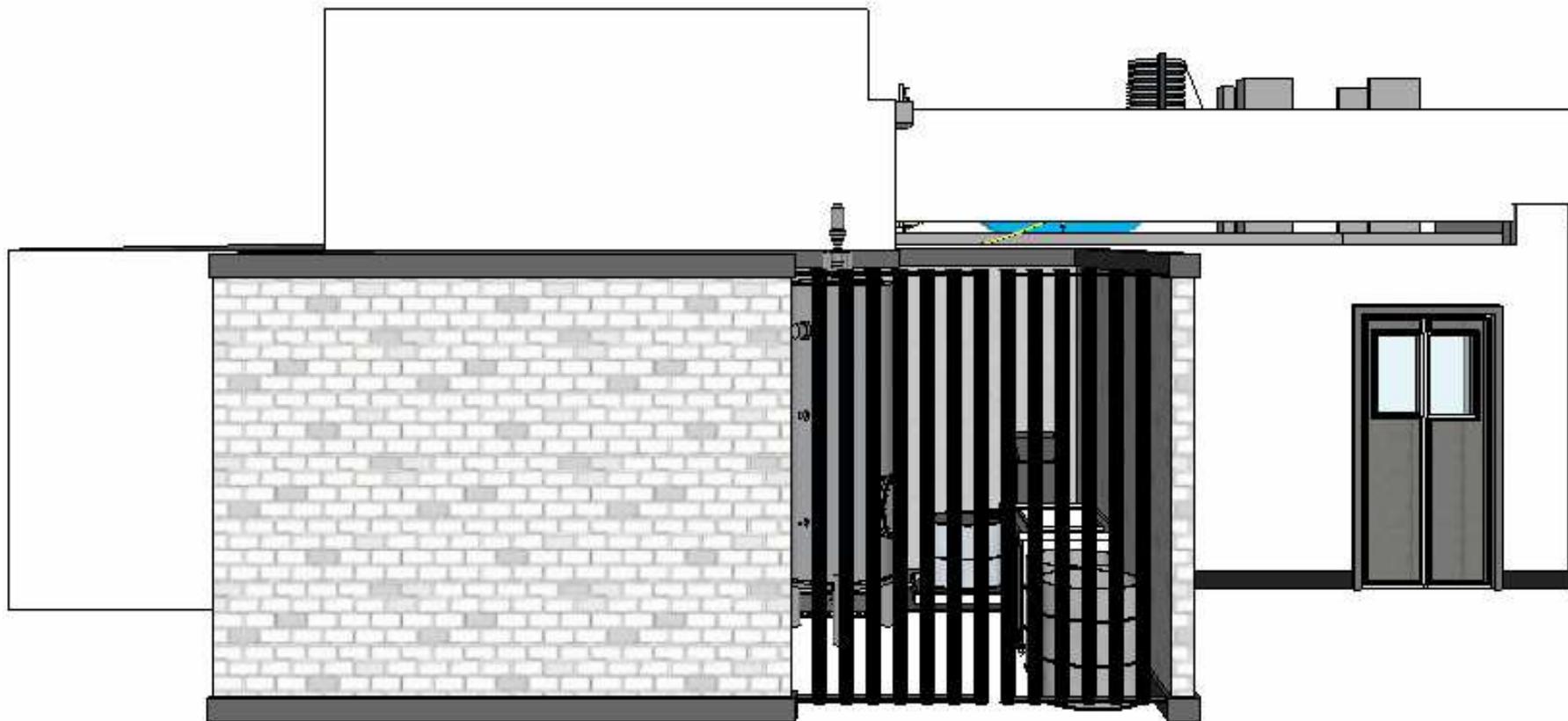


Figura V.15 - Vista frontal del habitáculo y de algunos otros componentes de la planta de biogás

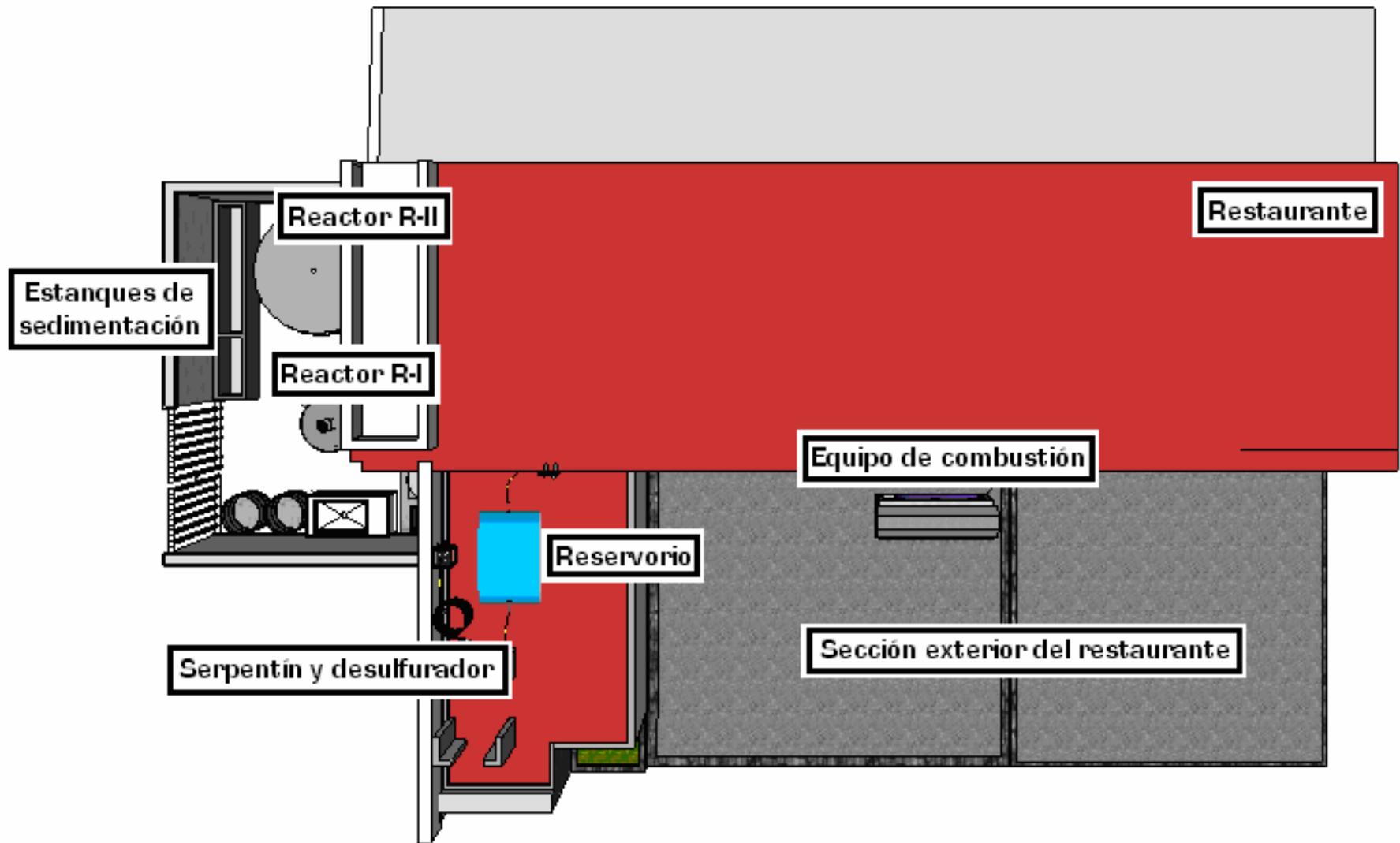


Figura V.16 – Vista superior de planta de biogás donde se distinguen los sistemas para el tratamiento anaerobio de los residuos, para el manejo del biogás y para su aprovechamiento energético

**Esta página se dejó en
blanco intencionalmente**

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la planeación, el diseño y la instalación de una planta prototipo para, por medio de la degradación anaerobia de los residuos sólidos orgánicos generados en un restaurante, obtener biogás combustible y con él producir energía térmica. La planta se diseñó partiendo de una disponibilidad diaria promedio de 40.46 kg de desechos orgánicos, los cuales registraron un contenido de sólidos totales de 22.96% de los que 94.21% constituyen sólidos volátiles. Para la operación de la planta, se eligió la modalidad de digestión húmeda, de ahí que los residuos deban ser pre-tratados a fin de obtener un sustrato con una concentración de sólidos inferior al 15%. El sistema de digestión está pensado para operar a temperatura ambiente, con una velocidad de carga orgánica de 1.94 kgSTV/m³-día y un tiempo de residencia hidráulico de 65 días. Dicho sistema está compuesto por dos digestores, uno de 1.25 m³ y el otro de 5.0 m³, además de un par estanques para la sedimentación de los lodos digeridos y que en conjunto suman 1.20 m³.

Se espera que la planta produzca 6.10 m³ de biogás por día con un 56% en volumen de metano. La planta dispone además de dispositivos para la remoción del H₂S y el vapor de agua del biogás con objeto de disminuir la presencia de estos agentes corrosivos y de paso elevar la calidad del energético. El biogás que genere la planta servirá para producir energía térmica, por medio de su combustión, misma que se destinará al uso final de cocción de alimentos para beneficio del mismo restaurante que aporta los residuos. Un equipo de combustión con tres quemadores de 1.5 kW_i cada uno, es el encargado de convertir el biogás en energía térmica.

La contribución del biogás a la demanda total de energía final para cocción del restaurante alcanza sólo el 6%. Respecto a la evaluación económica, es preciso subrayar la notable influencia del precio del GLP y de su tasa de incremento anual, que finalmente determinan la magnitud de los ingresos, sobre la rentabilidad de la planta. La operación de la planta conduce a que anualmente 10.52 t de residuos sólidos orgánicos eludan disposición final, al tiempo que se evita la emisión de gases de efecto invernadero hasta por un monto equivalente a 14.46 t-CO₂-eq. Todo lo anterior lleva a que la sustentabilidad energética en general del restaurante registre una ligera mejoría como resultado de la incorporación de la planta de biogás.

La propuesta aquí presentada resulta totalmente pertinente a la luz del crecimiento sostenido en la generación de residuos sólidos urbanos que se registra en todo el orbe. Esta situación,

que como bien se sabe comporta variados y severos impactos ambientales y sanitarios, extiende fuertes nexos con variables de tipo demográfico y económico. Poblaciones en aumento producen, como es de esperarse, mayor cantidad y diversidad de desechos materiales. A lo anterior se añade el progresivo aunque muchas veces magro aumento en los ingresos que perciben los individuos, en especial en los países en vías de desarrollo, lo cual tiende a acrecentar el consumo de bienes y servicios de toda índole. Así pues, el caudal de desechos que requiere ser recolectado, transportado y confinado, aumenta de manera colosal. No hay duda entonces que la perspectiva en torno de la problemática asociada a la gestión de los residuos sólidos urbanos es por demás inquietante.

Pese a contar con un repertorio relativamente variado de técnicas y estrategias para hacer frente a la exorbitante cantidad de desechos sólidos que generan las actividades humanas, la manera preferida de atender este asunto ha consistido en el sepultamiento de prácticamente la totalidad de los desechos, lo que demanda porciones vastas de terreno. Ello responde esencialmente a motivos económicos ya que opciones como el reciclaje o las distintas alternativas para el tratamiento de los desechos, precisan tecnología e imponen costos que con frecuencia son inaccesibles para la mayoría de los países.

No obstante, la magnitud y afectaciones recientes de la problemática, han presionado para que de forma paulatina se estén implementando esas y otras acciones como cimientos de un plan para la gestión integral y sustentable de los residuos sólidos urbanos. De esta manera, muy lentamente se han abierto paso la reutilización, el reciclaje y los métodos de tratamiento como la compactación, la incineración y los procesos aerobios y anaerobios. Éstos en conjunto han ayudado a aminorar varias de las repercusiones asociadas al manejo y disposición de los desechos sólidos.

Para algunas de estas estrategias de gestión de los residuos sólidos urbanos, los beneficios que reportan no se limitan únicamente al plano ambiental. Desde hace ya algún tiempo se viene insistiendo, cada vez con mayor vehemencia, en la necesidad de reducir el uso intensivo de combustibles de origen fósil. Primero, por la finitud de las existencias de esos combustibles, y segundo, por las graves secuelas ambientales y últimamente también sociales que acarrearán las distintas fases de sus procesos de extracción, transporte y consumo. Tal suerte que se ha dado aliento a la búsqueda y aprovechamiento de fuentes alternas para la obtención de energía, es especial de aquellas cuya explotación esté en consonancia con los lineamientos planteados por el concepto de Desarrollo Sustentable.

En ese sentido, diferentes clases de desechos materiales se han incorporado al repertorio actual de insumos para la producción de energía, toda vez que en algunos casos las mismas técnicas para su tratamiento ofrecen esta posibilidad. Así pues, se emplean residuos de tipo inorgánico y orgánico, mezclados o por separado, en procesos que a la par de suprimir muchos de sus potenciales efectos nocivos sobre el entorno y el bienestar de los individuos, son capaces de transformar parte de su energía química almacenada en formas útiles de energía, como la térmica, luminosa, mecánica o eléctrica.

Tratándose en particular de los residuos sólidos de naturaleza orgánica, su utilización como materia prima en procesos energéticos está considerada, a diferencia de lo que sucede con el empleo para ese fin de la fracción inorgánica, como una fuente renovable de energía. En efecto, se aprovecha biomasa o materia orgánica no fósil de origen vegetal y animal que, al menos virtualmente, se encuentra en renovación continua. En virtud de las características de los residuos sólidos orgánicos, la ruta idónea para darle un tratamiento y en paralelo aprovecharla como recurso energético, consiste en someterla al proceso de degradación anaerobia. Por medio de este proceso se obtiene metano, el mismo alcano presente en el gas

natural de procedencia fósil, coincidencia que revela la estrecha similitud en los orígenes de ambos energéticos, y también en relación a su compatibilidad en términos de usos y aplicaciones.

La degradación anaerobia implica una serie de transformaciones de tipo bioquímico de los compuestos biodegradables de que están constituidos los residuos orgánicos. Esto implica que para llevarlas a cabo se requiere necesariamente de la intervención efectiva y coordinada de microorganismos de distinta especie. Es precisamente ésta la principal de las limitantes del proceso de descomposición anaerobia, en el entendido de que la supervivencia, proliferación y óptimo desempeño de esos millones de microorganismos, y por consiguiente del éxito del propio proceso, dependen del correcto establecimiento y permanente vigilancia de las condiciones del entorno en donde ocurre la descomposición. La acción de esos organismos se ve seriamente disminuida, o de plano interrumpida, ante condiciones adversas del entorno en términos de temperatura, acidez, sustancias tóxicas e insuficiencia de nutrientes. De todas ellas depende la estabilización final de la materia orgánica, pero sobre todo, para alcanzar el volumen producción y la composición deseadas del biogás que lo hagan candidato a un proceso de conversión energética.

Cabe apuntar que monitorear y controlar oportuna y eficientemente tales variables del entorno de la descomposición, no es una tarea imposible. Al menos eso puede suponerse a juzgar por los centenares de instalaciones en todo el mundo que a diferentes escalas hacen uso de la tecnología de degradación anaerobia como herramienta para reducir, estabilizar y aprovechar, desde la perspectiva energética, la FORSU.

Sin embargo, el desconocimiento o la ligereza con que en ocasiones se plantean las peculiaridades del tratamiento anaerobio de biomasa residual, han propiciado que en algunos casos los proyectos emprendidos no logren los resultados esperados. Aquí se incluyen desde plantas para el tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales, hasta digestores de distintos tamaños para residuos pecuarios y para otras clases de residuos sólidos orgánicos. De ahí que en el presente trabajo se hayan intentado abordar con suficiencia, que en ocasiones se torna incluso repetitiva, los aspectos que revisten mayor importancia para el buen curso de la degradación anaerobia de biomasa residual, así como en el posterior manejo y aprovechamiento energético del biogás emanado de esa transformación.

En lo que se refiere en específico al tratamiento anaerobio de la FORSU, emerge un inconveniente de consideración que está vinculado a las condiciones en que se obtiene esa biomasa residual. Una de las condiciones para que el proceso de degradación anaerobia rinda resultados satisfactorios, es que en la FORSU no existan remanentes de la porción inorgánica, toda vez que estos últimos reducen la biodegradabilidad del sustrato, y por ende afectan el rendimiento en términos del volumen de producción de biogás. Se advierte entonces la enorme importancia que tiene la separación de ambas fracciones de los desechos. Por desgracia, la correcta separación de origen de los residuos sólidos urbanos es una práctica que, pese a las ventajas que reporta, no ha sido acogida aún como un hábito indispensable dadas las circunstancias imperantes.

Esa indiferencia o desatención, que no se limita a una sola entidad o región del país, quedó de manifiesto durante el proceso de muestreo de los residuos del restaurante. Ello plantea la necesidad de hallar el modo de que la segregación de los desechos en el establecimiento, labor compartida tanto por los empleados como por los comensales, se realice de mejor manera y sea más selectiva. Es una medida fundamental para simplificar la etapa de pre-tratamiento de los residuos y obtener el sustrato de alimentación en la cantidad y con las características apropiadas. De momento, se urgió al personal del establecimiento que

interviene directamente en la preparación de los alimentos a que preste más atención a la hora de depositar los desechos en los cestos de basura y que, en la medida de lo posible, colabore en la segregación de aquellos pocos residuos orgánicos que de inicio no se tiene previsto introducir al sistema anaerobio.

La cantidad, composición y condiciones en que se encuentren los residuos a emplear, son factores de peso a la hora de estimar la producción de biogás y su contenido de metano. Este gas constituye el subproducto de interés energético de la degradación anaerobia, y del cual depende un alto porcentaje de los dividendos que genere todo proyecto que involucre el uso de esa vertiente de aprovechamiento de la biomasa residual. Esos dividendos, y en sí la rentabilidad económica de los proyectos, están subordinados en buena medida a los precios de los energéticos convencionales de origen fósil contra los que compite directamente el biogás, lo que es igualmente aplicable para el resto de las opciones de energías renovables.

El control que se ejerce sobre los precios de los combustibles fósiles, precios en los que además no se toman en cuenta los costos ambientales y sociales que comporta su cadena de producción y consumo, se erige sin embargo como uno de los principales obstáculos para el despliegue masivo de las fuentes renovables en general. En el caso que aquí se examinó, pudo apreciarse con nitidez la magnitud de la influencia del precio del gas LP y de su tasa de incremento anual, sobre los indicadores de rentabilidad de la propuesta. Se encontró que con los valores vigentes de esas variables, la propuesta no logra ser económicamente viable, siendo preciso para revertir tal situación la modificación conjunta de parámetros operativos como factor de planta y los montos correspondientes a los costos fijos y variables.

Por otra parte, aun cuando la biomasa como fuente renovable de energía logra distanciarse un poco de dos de los inconvenientes mayores que exhiben sus similares, en lo que respecta a intermitencia y dispersión del recurso, no lo consigue de un tercero, que alude a la baja densidad energética de esta clase de recursos frente a los combustibles fósiles dominantes. Esta situación obliga al acopio y traslado de enormes cantidades del recurso renovable, o bien a la instalación de un gran número de artefactos para su conversión a fin de que la energía que de ellos se obtenga sea sustantiva. De lo contrario, su contribución mantiene un carácter marginal, siendo si acaso apenas suficiente para cubrir los requerimientos energéticos de pequeños consumidores a nivel residencial.

Para ejemplificar el punto anterior, baste recordar la aportación de únicamente 6% que se estima hará el biogás al consumo total del energía para cocción del restaurante. Esta débil aportación en cierta forma contrasta con el tamaño de los reactores, del resto de los equipos y de la infraestructura, así como del trabajo humano que demandan el pre-tratamiento de los residuos y la operación y mantenimiento de toda la planta.

Surge entonces la interrogante de si tal disminución en el consumo de gas LP, teniendo en mente los costos en términos de inversión inicial y operación de la planta de biogás, hubiese sido más simple y atinado alcanzarla a través de medidas como la sustitución de los equipos de combustión actualmente en uso en el restaurante por otros más eficientes, o mediante sencillas prácticas de uso racional del GLP por parte de los empleados del establecimiento. Lo que es más, ello hubiese significado un verdadero ahorro de energía, ya que se habría conservado el nivel de productividad pero con un gasto inferior de energía. En cambio, con la incorporación del biogás, lo que en realidad se consigue es una disminución en el consumo de GLP, no así en el consumo total de energía para cocción de alimentos, el cual se mantiene en el mismo nivel antes y después de la inclusión del biogás, toda vez que éste aporta la energía proporcional a la cantidad de GLP desplazado.

No obstante, en defensa de la planta prototipo de biogás, se debe hacer mención del impacto ambiental positivo que conlleva la utilización de la FORSU para la producción de biogás y el empleo de éste como insumo energético. En esta lógica, mediante la planta prototipo de biogás se estará desviando anualmente un total estimado de más de 10.5 toneladas de FORSU. Se trata de una cantidad importante de desechos orgánicos que de ser inadecuadamente manejados o confinados, provocarían afectaciones de diversa índole y magnitud en el medio ambiente y en la salud de las personas, como ya se advirtió anteriormente.

Asimismo, gracias a la operación de la planta de biogás se consigue una rebaja en cuanto a emisiones de gases que abonan al recrudecimiento de la problemática del calentamiento del planeta, gases de efecto invernadero (GEI). Por un lado, están las emisiones de GEI evitadas a raíz del tratamiento de los residuos. Por este medio se impide que el metano producto de la degradación de la materia orgánica en circunstancias no controladas, ascienda a la atmósfera y desde ahí bloquee la salida de la radiación infrarroja.

Por otro lado, están las emisiones de GEI suprimidas como resultado del descenso pronosticado en el consumo de GLP. Ello implica el dejar de producir y arrojar las moléculas de dióxido de carbono formadas durante la quema de ese energético fósil. Empero, el principal inconveniente al momento de ponderar los beneficios en materia ambiental, tiene que ver con la manera en cómo tasar objetivamente esos beneficios en términos monetarios. Esta es una cuestión que desde hace algunos años se encuentra a debate, dado que es uno de los ingredientes esenciales para el desarrollo y fortalecimiento de las fuentes renovables de energía en el marco de la reconfiguración de los sistemas energéticos.

Para finalizar, y en lo que toca al montaje de la planta generadora de biogás, es importante resaltar lo siguiente. Aun cuando la instalación de los equipos y las diversas conexiones se hayan efectuado conforme a lo que, luego de escuchar sugerencias y consultado el mayor número posible de documentos alusivos al tema, se evaluó como conveniente y plausible, seguramente se precisarán de ajustes, cambios o correcciones. Éstas sólo se harán visibles luego de que la planta comience a operar en forma rutinaria. Lo anterior, sin embargo, no debe causar alarma, toda vez que es normal que suceda en proyectos e instalaciones de toda naturaleza. De igual modo, previo a la puesta en marcha de la planta, se recomienda efectuar una revisión amplia y exhaustiva de los componentes de cada una de sus secciones.

**Esta página se dejó en
blanco intencionalmente**

REFERENCIAS

Alcántara, V., Cruz Gavilán, I. y Santos, E. 2004. *Caracterización y cuantificación de los residuos sólidos en Ciudad Universitaria*. Publicación de la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Álvarez, C. 2009. *Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional*. ***Economía Informa***, 359:63-89.

APHA, 1995. *Standard Methods for Water and Wastewater Examination*. 19th Ed. American Public Health Association/Water Works Association/Water Environment Federation. Washington D.C., EE.UU.

Arias, J. 2008. *Las grandes bondades de la biomasa y del biogás*. ***Energía a debate***. Año 5, tomo V, no. 29. Pp. 41-44. México, D.F., México.

Arreguín, F., Alcocer, V., Marengo, H., Cervantes, C., Albornoz, P. y Salinas, M. 2010. *Los retos del agua*. En: **El agua en México: Cauces y Encauces**. Editores: Jiménez, B., Torregrosa, M. y Aboites, L. Publicación de la Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México.

Arvizu, J. 2002. *Estimación del recurso y prospectiva energética de la basura en México*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Gerencia de Energías no Convencionales. Cuernavaca, Morelos, México.

Arvizu, J. 2008. *Generación de electricidad con el biogás producido en el relleno sanitario de Bordo Poniente*. ***Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas***. Publicación del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos, México.

Arvizu, D., Bruckner, T., Chum, H., Edenhofer, O., Estefen, S., Faaij, A., Fishedick, M., Hansen, G., Hiriart, G., Hohmeyer, O., Hollands, K., Huckerby, J., Kadner, S., Killingtveit, Å., Kumar, A., Lewis, A., Lucon, O., Matschoss, P., Maurice, L., Mirza, M., Mitchell, C., Moomaw, M., Moreira, J., Nilsson, L., Nyboer, J., Pichs-Madruga, R., Sathaye, J., Sawin, J., Schaeffer, R., Schei, T., Schlömer, S., Seyboth, K., Sims, R., Sinden, G., Sokona, Y., von Stechow, C., Steckel, J., Verbruggen, A., Wiser, R., Yamba, F. y Zwickel, T. 2011. *Technical Summary*. En: **IPCC Special**

Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S. y von Stechow, C. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido - Nueva York, EE.UU.

Arsova, L. 2010. *Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product*. M.S. thesis in Earth Resources Engineering. Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University. Nueva York, EE.UU.

Ashare, E., Wise, L. y Wentworth, L. 1977. *Fuel gas production from animal residue*. Engineering Report by Dynatech R/D Company, Cambridge, MA, prepared for US ERDA under contract FY-76-C-02-2991, 212 pp.

Austin, G. 2003. *Biogas energy and sanitation provision in South Africa*. Publicación de AGAMA Energy. Ciudad del Cabo, Sudáfrica.

Baraza, X., Galimany, F. y Torres, R. 2003. *Digestión anaerobia en el tratamiento de efluentes y lodos residuales*. **Tecnología del Agua**. 233:34-46.

Bauen, A., Berndes, G., Junginger, M., Londo, M., Vuille, F., Ball, R., Bole, T., Chudziak, C., Faaij, A. y Mozaffarian, H. 2009. *Bioenergy: A Sustainable and Reliable Energy Source: A Review of Status and Prospects*. Publicación de IEA Bioenergy. International Energy Agency. París, Francia.

Bazán, G. y Ortíz, G. 2009. *Sobre la calidad del gas natural*. **Energía a debate**. Año 5. No. 34. Pp. 27-28. México, D.F., México.

Bennett, R. 2007. *Fundamental principles of diaphragm meters*. Publicación de la American Meter Company. Nebraska, EE.UU.

Bertolini, G. 2003. *World-wide variations in municipal waste combustion and the reasons for them*. Publicación de Waste Management World. Illinois, EE.UU.

Bolzonella, D., Fatone, F., Pavan, P. y Cecchi, F. 2005. *Anaerobic Fermentation of Organic Municipal Solid Wastes for the Production of Soluble Organic Compounds*. **Ind. Eng. Chem. Res.** 44:3412-3418.

Botero, R. y Preston, T. 1987. *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización*. Publicación del Centro para la Investigación es Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria. Cali, Colombia.

BP. 2010. *BP Statistical Review of World Energy June 2010*. BP p. l. c. Londres, Reino Unido.

Calderón, F. y Calderón, S. 2007. *Gas Licuado*. En: **Energía para México. Cuadernos de Trabajo No. 1**. Fundación Rafael Preciado Hernández, A.C. México, D.F., México.

CalRecovery, 1992. *Criterio de Diseño - Planta de Selección y Recuperación de Subproductos de los Residuos Sólidos Municipales*. Documento preparado por CalRecovery a encargo del Gobierno de la Ciudad de México. México, D.F., México.

CalRecovery, 1993. *Handbook of Solid Waste Properties*. Governmental Advisory Associates, Inc., Nueva York, EE.UU.

Campos, E., Elías, X. y Flotats, X. 2005. *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*. En: **Tratamiento y valorización energética de residuos**. Elías, X. (director) Ediciones Díaz de Santos – Fundación Universitaria Iberoamericana. España.

Careaga, J. 1993. *Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes*. Serie Monografías No. 4. Secretaría de Desarrollo Social. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.

Carreras, N. 2010. *Tipos de biodigestores, selección en función del residuo*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (coordinadores). Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

CEC, 2011. Ocean Energy. Publicación de The California Energy Commission. Gobierno del Estado de California. California, EE.UU.

Cecchi, F., Traverso, P. y Cescon, P. 1986. *Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste-digester performance*. **The Sci. of Total Env.**, 56:183-197.

Cecchi, F., Traverso, P., Mata-Alvarez, J., Clancy, J. y Zaror, C. 1988. *State of the art of R&D in the anaerobic digestion process of municipal solid waste in Europe*. **Biomass**, 16:257-284.

Cecchi, F., Vallini, G. y Mata-Alvarez, J. 1990. *Anaerobic digestion and composting in an integrated strategy for managing vegetable residues from agro-industries or sorted organic fraction of municipal solid waste*. **Wat. Sci. & Technol.**, 22(9):33-41.

Cecchi, F., Pavan, P., Mata-Alvarez, J., Bassetti, A. y Cozzolino, C. 1991. *Anaerobic digestion of municipal solid waste: thermophilic versus mesophilic performance at high solids*. **Waste Manag. & Research**, 9(4):305-15.

Cecchi, F., Pavan, P. y Mata-Alvarez, J. 1997. *Kinetic study of the thermophilic anaerobic digestion of the fresh and pre-composted mechanically selected organic fraction of MSW*. **Journal of Environmental Science and Health A32(1)**:195-213.

Cecchi, F., Traverso, P., Pavan, P., Bolzonella, D. y Innocenti, L. 2002. *Characteristics of the OFMSW and behaviour of the anaerobic digestion process*. En: **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Mata-Alvarez, J. (editor) IWA Publishing. Londres, Reino Unido.

Chernicharo, C. 2007. *Anaerobic Reactors*. IWA Publishing. Londres, Reino Unido.

Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Goss Eng, A., Lucht, W., Mapako, M., Masera Cerutti, O., McIntyre, T., Minowa, T. y Pingoud, K. 2011. *Bioenergy*. En: **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation** [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S. y von Stechow, C. (eds)] Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido; Nueva York, EE.UU.

Chynoweth, P e Isaacson, R. 1987. *Anaerobic digestion of biomasa*. Elsevier Applied Science. Nueva York, EE.UU.

CONEVAL. 2007. *Los mapas de Pobreza en México: Anexo técnico metodológico*. Publicación del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social de México. México, D.F., México.

Daintith, J. 1982. *Diccionario de Biología*. **Colección Llave de la Ciencia**. Editorial Norma. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Daintith, J. 1985. *Diccionario de Química*. **Colección Llave de la Ciencia**. Editorial Norma. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Damien, A. 2010. *La biomasa. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. AMV y Mundi-Prensa. España.

De Baere, L. 1999. *Anaerobic digestion of solid waste: State-of-the-art*. II International Symposium on anaerobic digestion of split waste. Barcelona, España.

De Baere, L. 2000. *Anaerobic digestion of solid waste: State-of-the-art*. **Water Science and Technology**, 41(3):283-290.

Delgado, G. 2009. *Sin energía. Cambio de paradigma, retos y resistencias*. Plaza y Valdés. México, D.F., México.

Deublein, D. y Steinhauser, A. [editores] 2008. *Biogas from Waste and Biological Resources. An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. República Federal de Alemania.

Díaz, F. y Golueke, G. 1979. *How Maya Farms Recycles Wastes in the Philippines*. **Compost Science/Land Utilization**, 20:32-33.

Díaz, F. y Golueke, G. 1985. *Solid Waste Management in Developing Countries*. **BioCycle**, 26:46-52.

Díaz, I., Pérez, S. y Fernandez-Polanco, M. 2010. *Planta de producción de biogás*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. [coordinadores]. Pressas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

Elías, X. 2005. Sistemas de tratamiento térmico: La incineración. En: **Tratamiento y valorización energética de residuos**. Dirigido por: Elías, X. Ediciones Díaz de Santos - Fundación Universitaria Iberoamericana. España.

Elías, X. y Velo, E. 2005. *La gasificación*. En: **Tratamiento y valorización energética de residuos**. Dirigido por: Elías, X. Ediciones Díaz de Santos - Fundación Universitaria Iberoamericana. España.

EMCON, 1980. *Methane Generation and Recovery from Landfills*. Ann Arbor Science Publishers Michigan, EE.UU.

ESCAP, 1980. *Guide Book on Biogas Development*. Publicación de la Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Energy Resources Development Series, No. 21. Organización de las Naciones Unidas. Nueva York, EE.UU.

Esquivel, R., Méndez y Casarín, M., Preston, T. y Pedraza, O. 2002. *Aspectos importantes al introducir biodigestores en explotaciones lecheras a pequeña escala*. **Livestock Research for Rural Development**, 14(3).

Esteban, L. 2010. *Fuentes y evaluación de recursos*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (coordinadores). Pressas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

Estrada, C. e Islas, J. 2010. *Energías alternativas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México*. Publicación de la Academia Mexicana de Ciencias, Academia de Ingeniería y la Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México.

Fernández, J. 2009. *Tecnología de las energías renovables*. AMV Ediciones – Mundi-Prensa. España.

Fernández-Polanco, F. y García, P. 2000. *Procesos biológicos anaerobios. Bases y parámetros de operación*. Jornadas sobre tratamientos biológicos de residuos orgánicos. Gobierno de la Rioja. Dirección General de Calidad Ambiental. Logroño, España.

Ferrer, I., Garfí, M., Uggetti, E., Ferrer-Martí, L., Calderón, A. y Velo, E. 2011. *Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes*. **Biomass & Bioenergy**. 35(2011):1668-1674.

FIRCO-SAGARPA, 2010. *Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México*. Publicación del Fideicomiso de Riesgo Compartido y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

Flores, J. 1980. *Química. Aplicaciones industriales de los compuestos del carbono*. Sistema de Enseñanza Abierta. Colegio de Bachilleres. Editorial Trillas. México, D.F., México.

Frisch, O. 1965. *La física atómica contemporánea*. **Colección Popular**. Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México.

Fulford, D. 1996. *Biogas Stove Design. A short course*. Kingdom Bioenergy Ltd - University of Reading. Londres, Reino Unido.

García, D. 2010. *Introducción al aprovechamiento de la biomasa residual húmeda*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (coordinadores). Pressas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

García, J. y Elías, X. 2005. *Energía y medio ambiente: Generalidades*. En: **Tratamiento y valorización energética de residuos**. Dirigido por: Elías, X. Ediciones Díaz de Santos – Fundación Universitaria Iberoamericana. España.

García, J., Elías, X. y Gaya, J. 2005. *Impactos ambientales y energía*. En: **Tratamiento y valorización energética de residuos**. Dirigido por: Elías, X. Ediciones Díaz de Santos – Fundación Universitaria Iberoamericana. España.

García, D. y Rezeau, A. 2010. *Introducción al aprovechamiento energético de biocombustibles sólidos*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (coordinadores). Pressas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

García-Heras, J. L., 2002. *Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes*. En: **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Mata-Alvarez, J. (editor) IWA Publishing. Londres, Reino Unido.

GBEP, 2008. *A Review of the Current State of Bioenergy Development in G8+5 Countries*. Publicación del Global Bioenergy Partnership – FAO. Roma, Italia.

Gidarakos, E., Havas, G., y Ntzamilis, P. 2006. *Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete*. **Waste Management**, 26(6):668-679.

Goldemberg, J., Johansson, T., Reddy, A. y Williams, R. 2001. *Energy for the New Millennium*. **Ambio**, 30(6):330-337.

Goldemberg, J. y Johansson, T. 2004. *World Energy Assessment. Overview*. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council. Nueva York, EE.UU.

Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L. y Castells, F. 2008. *Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico*. **Waste Management**, 28(12):2465-2471.

GP. 2010. *Gasificación, pirólisis y plasma. Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: Viejos riesgos y ninguna solución*. Publicación de Greenpeace Argentina - Campaña contra la contaminación. Buenos Aires, Argentina.

Graves, R. 1993. *Cooking with gas!* Publicación de Colleges of Agricultural Science and Engineering. Agricultural and biological engineering notes. PennState University. Pennsylvania, EE.UU.

Gutiérrez, E. y Labastida, J. 2005. *Estudio de la aplicabilidad del Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto a la generación de electricidad con base a biogás*. Tesis de Licenciatura. Ingeniería Eléctrica-Electrónica. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Gutiérrez, J., Trejo, O., Camacho, S., Castillo, R., Cruz, S. y Castañeda, J. 1997. *Distrito Federal. Educación ambiental, caminos ecológicos*. Limusa Noriega Editores. México D.F., México.

Hamilton, J. 2010. *Historical Oil Shocks*. Department of Economics. University of California. San Diego, California, EE.UU.

Heisler, M. 1981. *Biogas Filtration and Storage*. En: **Methane Technology for Agriculture**. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, Nueva York, EE.UU.

Henze, M. y Harremoës, P. 1983. *Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors – A literature review*. **Water Science and Technology**, 15:1-101.

Herrera, R. 2004. *Cómo y por qué separar la basura. Una solución al problema de los residuos sólidos en la Ciudad de México*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. México D.F., México.

Heukelekian, H. 1933. *Digestion of solids between thermophilic and nonthermophilic range*. **Sewage Works Journal**, 5:757-62.

IEA. 2003. *Renewables for power generation. Status and prospects*. Publicación de la International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

IEA, 2008. *Deploying Renewables. Principles for Effective Policies*. Publicación de la International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

IEA. 2010a. *World Energy Outlook 2010. Resumen Ejecutivo*. Publicación de la International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

IEA. 2010b. *Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios and Strategies to 2050*. Publicación de la International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

IEA. 2011a. *Key World Energy Statistics 2011*. Publicación de la International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

IEA, 2011b. *Energy Technology Systems Analysis Programme* (serie de boletines tecnológicos que presentan un análisis pormenorizado de distintas alternativas energéticas). International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

INEGI. 2010a. *Estadísticas Ambientales – Residuos Sólidos*. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F., México.

INEGI. 2010b. *México en cifras – Información nacional por entidad federativas y municipios - Producto interno bruto estatal 2009*. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F., México.

INEGI. 2011. *Estadísticas de Población – Tasa de crecimiento media anual de la población por entidad federativa, 1990 a 2010*. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F., México.

INE. 2010. *Cocción de alimentos. Portal del INE sobre vivienda sustentable*. Publicado por el Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.

INE-SEMARNAT. 2001a. *Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera reedición. México, D.F., México.

INE-SEMARNAT. 2001b. *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.

IPCC, 1995. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change: Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report*. Publicación del Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza.

IPCC. 1996. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual*. Vol. 3. Publicación conjunta de la World Meteorological Organization y el United Nations Environment Programme. Ginebra, Suiza.

IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Nougier, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K. y Johnson, C. [editores] Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.

IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. [redactores] Publicación del Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza.

JICA. 1985. *Master Plan and Feasibility Study on Seoul Municipal Solid Waste Management System in the Republic of Korea, Draft Final Report*. Japan International Cooperation Agency, Tokio, Japón

Jiménez, B., Durán, J. y Méndez, J. 2010. *Calidad*. En: **El agua en México: Cauces y Encauces**. Jiménez, B., Torregrosa, M. y Aboites, L. [editores] Publicación de la Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México.

Juárez, S. 2009. *Producción de hidrógeno a partir de los residuos de C.U. como biocombustible del ECOVIA*. Tesis de Licenciatura. Ingeniería Eléctrica Electrónica. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, D.F., México.

JC. 2008. *Briefing document on the pyrolysis and gasification of MSW*. Publicado por Juniper Consulting. Belfast, Reino Unido.

Karagiannidis, A., Perkoulidis, G. y Malamakis, A. 2006. *Development of a methodology for the evaluation of different municipal solid waste anaerobic digestion technologies*. En: **Proceedings Venice 2006 Biomass and Waste to Energy Symposium**. Venecia, Italia.

Kefa, D. 2003. *Advance in the thermal treatment of municipal solid waste in China*. Publicación del Institute for Thermal Power Engineering. Zhejiang University, China.

Khandelwal, C. y Mahdi, S. 1986. *Biogas technology: A practical handbook*. Tata - McGraw-Hill. Nueva Delhi, India - México, D.F., México.

Kirkels, A., y G. Verbong. 2011. *Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(1):471-481

Knothe, G. 2010. *Biodiesel and renewable diesel: a comparison*. **Progress in Energy and Combustion Science**, 36(3):364-373.

Lafrance, R. y Schembri, L. 2002. *Purchasing-Power Parity: Definition, measurement and interpretation*. **Bank of Canada Review**, [Otoño]:27-33.

Masera, O. 2003. *Bioenergy Use Patterns in Mexico*. De: The International Seminar on Bioenergy and sustainable Rural Development. Morelia, Michoacán, México.

Lema, J. y Méndez, R. 1997. *Tratamientos biológicos anaerobios*. Capítulo en: **Contaminación e ingeniería ambiental. Volumen III, Contaminación de las aguas**. Bueno, J., Sastre, H. y Lavín, A. [editores]. Oviedo, España.

Loehr, R. 1978. *El metano proveniente de residuos humanos, animales y agrícolas*. En: **Recursos energéticos renovables y aplicaciones rurales en el mundo en vías de desarrollo**. Brown, N. [compilador]. El Cid Editor. México, D.F., México.

López, R. 1996. *Factibilidad técnico-económica del uso de biogás obtenido de la digestión anaeróbica de estiércol porcino para la generación de electricidad*. Tesis de Licenciatura. Ingeniería Mecánica – Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Maly, J. & Fadrus, H. 1971. *Influence of temperature on anaerobic digestion*. **Journal of Water Pollution Control Federation**, 43(4):641-50.

Masera, O., Aguillón, J., Arvizu, J., Berrueta, V., Best, G., de Buen, O., Díaz, R., Fuentes, A., Gamiño, B., Ghilardi, A., Gómez, I., Islas, J., Manzini, F., Riegelhaupt, E. y Saldaña, R. 2006. *La bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable*. Publicación de la Red Mexicana de Bioenergía, Mundi Prensa México y la Comisión Nacional Forestal. México, D.F., México.

Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Pavan, P. y Llabres, P. 1990. *The Performances of Digesters Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes Differently Sorted*. **Biological Wastes**, 33:181-199.

Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Llabrés, P. y Pavan, P. 1992. *Anaerobic Disgestion of the Barcelona Central Food Market Organic Wastes. Plant Design and Feasibility Study*. **Bioresource Technology**, 42:33-42.

Mata-Alvarez, J., Macé, S. y Llabrés, P. 2000. *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives*. **Bioresource Technology**. 74(2000):3-16.

Mata-Alvarez, J. 2002. *Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes: A perspective*. En: **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Mata-Alvarez, J. [editor] IWA Publishing. Londres, Reino Unido.

McCarty, P. 1964a. *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Part One: Chemistry and Microbiology*. **Chemistry and Microbiology. Public Works**, 95:107-112.

McCarty, P. 1964b. *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Part Two: Environmental Requirements and Control*. **Chemistry and Microbiology. Public Works**, 96:123-126.

McCarty, P. 1964c. *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Part Three: Toxic Materials and their Control*. **Chemistry and Microbiology. Public Works**, 97:91-94.

MNRC, 2005. *Clean Energy Projects Analysis*. RETScreen© Engineering & Cases Textbook. Third Edition. Minister of Natural Resources Canada. Canadá.

Moomaw, W., Yamba, F., Kamimoto, M., Maurice, L., Nyboer, J., Urama, K. y Weir, T. 2011. *Introduction*. En: **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation** [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S. y von Stechow, C. (eds)] Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido; Nueva York, EE.UU.

Morwood, R. 1994. *Australian Waste Management - Towards 2000*. En: **Proceedings of 32nd Annual International Solid Waste Exposition**, SWANA, San Antonio, Texas, EE.UU.

Muñoz, F. 1981. *Revisión bibliográfica del proceso de digestión anaeróbica de desechos orgánicos*. Tesis de Maestría en Ingeniería [Sanitaria]. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Mukunda, S., Dasappa, S., Paul, P., Rajan, N., Yagnaraman, M., Kumar, D. y Deogaonkar, M. 2010. *Gasifier stoves - science, technology and field outreach*. **Current Science (Bangalore)**, 98(5):627-638.

Nath, J. 1993. *Solid Waste Management in the Present Indian Perspective*. En: **Proceedings of ISWA 1993 Annual Conference**. International Solid Waste Association. Jönköping, Suecia.

OCDE, 2010. *OECD Factbook 2010. Economic, Environmental and Social Statistics. Environment - Air and land - Municipal waste*. Publicación de la Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

Oetjen-Dehne, R. y Ries, G. 1995. *Was kostet die biologische Abfallbehandlung*. En: **Biologische Abfallbehandlung**. Thomé-Kozmiensky, K. (editor) EF-Verlag. Berlín, Alemania.

OMS. 1997. *Guía para el manejo de los residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales*. Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Agencia Española de Cooperación Internacional. Serie Técnica No. 31. Lima, Perú.

ONU. 2011. *World Population Prospects. The 2010 Revision*. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas. Nueva York, EE.UU.

Orth, W. 1982. *Gas Utilization*. En: *Anaerobic Digestion*. Editores: Hughes y col. Elsevier Biomedical Press. Londres, Reino Unido.

Ostrem, K. y Themelis, N. 2004. *Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes*. M.S. thesis in Earth Resources Engineering. Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University. Nueva York, EE.UU.

Parish, G. 1986. *The Use of Digester Gas in Industrial Applications: An Overview of Design Considerations*. The Purdue Industrial Waste Conference. Indiana, EE.UU.

Perret, J. 1982. *Implementation and end-uses of biogas*. Shell Recherche, Grand-Couronne. Francia.

Petersson, A. y Wellinger, A. 2009. *Biogas Upgrading Technologies - Developments and Innovations*. IEA Bioenergy Task 37. Publicación de IEA Bioenergy. Malmo, Suecia.

Price, E. y Cheremisinoff, P. 1981. *Biogas: Production and utilization*. Ann Arbor Science. Michigan, EE.UU.

Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B. y Williams, R. 2008. *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. Documento preparado por: Department of Biological and Agricultural Engineering. University of California (Davis). Por

encargo de: California Integrated Waste Management Board. California Environmental Protection Agency. California, EE.UU.

Reinhart, D. 2004. *Determining the chemical composition of solid waste*. MSW Learning Tool. University of Central Florida. EE.UU.

REN21, 2007. *Renewables 2007 Global Status Report*. Publicación de la Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. París, Francia.

REN21, 2011. *Renewables 2011 Global Status Report*. Publicación de la Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. París, Francia.

Riggle, D. 1998. *Acceptance improves for large-scale anaerobic digestion*. **Biocycle**, 39:51-55.

Rincón, M. 2010. *La inminente transición hacia fuentes renovables*. **Energía a debate**. Año 6 No. 37. Pp. 42-46. México, D.F. México.

Rivard, C. 1994. *Trash to treasure. NRSL's high-solids digester converts waste to biogas and compost*. National Renewable Energy Laboratory. NREL-MK-336-5683. Golden, Colorado, EE.UU.

Safley, L y Westerman, P. 1990. *Psychrophilic Anaerobic Digestion of Animal Manure: Proposed Design Methodology*. **Biological Wastes**, 34:133-148.

SAGARPA-FIRCO. 2007. *Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario*. **Claridades Agropecuarias**. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y el Fideicomiso de Riesgo Compartido. México, D.F., México.

Sancho y Cervera, J. y Rosiles, G. 1999. *Situación Actual del Manejo Integral de los Residuos Sólidos en México*. Publicación de la Secretaría de Desarrollo Social. México, D.F., México

Salgado, R. y Altomonte, H. 2001. *Indicadores de sustentabilidad 1990-1999*. Publicación de la División de Recursos Naturales e Infraestructura de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

Sarasa, J. 2010. *Digestión anaerobia y dimensionado de biodigestores*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (coordinadores). Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

Saxe-Fernandez, J. 2009. *La energía en México. Situación y alternativas*. Colección *El mundo actual: Situación y alternativas*. Publicación del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Coordinación de Humanidades. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Saxena, A. 2004. *Bio-Gas Plants. A Boon for Rural Families*. Publicación del Energy Environment and Development Group (EEDG). Bhopal, India.

Scharff, C. y Vogel, G. 1994. *A Comparison of Collection Systems in European Cities*. **Waste Management & Research**, 12(5):387-404.

SEISA. 2007. *Energía renovable – Bioenergía de Nuevo León*. Sistemas de Energía Internacional S.A. de C.V. Nuevo León, Monterrey, México.

SEMARNAT-INE. 2009. *México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales, Pesca y Alimentación y el Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.

SENER. 2009. *Balance Nacional de Energía 2009*. Publicación de la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Dirección Nacional de Planeación Energética. Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER, 2010a. *Balance Nacional de Energía 2010*. Publicación de la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Dirección Nacional de Planeación Energética. Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER. 2010b. *Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2010 - 2025*. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER, 2012. *Sistema de Información Energética*. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SGC. 2005. *Energy gases and the environment. Gas Quality – Annual Averages*. Publicación del Swedish Gas Centre. Suecia.

SMA. 2009. *Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal 2009*. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. México, D.F., México.

Smith, K. y Uma, R. 2000. *Greenhouse Gases from Small-Scale Combustion in Developing Countries: Household Stoves in India*. Publicación de la Environmental Protection Agency. EE.UU.

Smith, K. y Zhang, J. 2000. *Greenhouse implications of household fuels: An analysis for India. Annual Review of Energy and Environment*, 25:741-763.

Smith, K., Rogers, J. y Cowlin, S. 2005. *Household Fuels and Ill-Health in Developing Countries: What improvements can be brought by LP Gas?* Environmental Health Sciences - School of Public Health. University of California, Berkeley. EE.UU. Documento preparado por encargo de la World LP Gas Association.

SMN. 2012. *Temperaturas mensuales por entidad federativa [1971 - 2012]*. Servicio Meteorológico Nacional. México, D.F., México.

Stafford, D., Hawkes, D. y Horton, R. 1980. *Methane production from waste organic matter*. C.R.C. Press. Florida, EE.UU.

Sutter, K. y Wellinger, A. 1988. *The ACF system: A new low-temperature biogas digester*. En: **Agricultural Waste Management and Environmental Protection. Proceedings 4th International Symposium of CIEC**. Welte, E. y Szabolcs, I. (editores). República Federal de Alemania.

Tagüeña, J. y Martínez, M. 2008. *Fuentes renovables de energía y desarrollo sustentable*. CONACULTA – ADN Editores. México, D.F., México.

Tangri, N. 2005. *Incineración de residuos: Una tecnología muriendo*. Publicación de la Alianza Global para Alternativas a la Incineración. Alianza Global Anti-Incineración. Versión en español publicada con motivo del 4° Día de Acción Global de GAIA. Buenos Aires, Argentina.

Tchobanoglous, G., Theisen H. y Vigil, S. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill. Primera edición. Madrid, España.

Turkenburg, W. 2000. *Renewable energy technologies*. En: **World Energy Assessment. Energy and the challenge of sustainability**. Publicación de la United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council. Nueva York, EE.UU.

Turns, R. 2000. *An Introduction to Combustion. Concepts and Applications*. Second edition. McGraw-Hill. Nueva York, EE.UU.

UNDP, 2010. *Human Development Report 2010. 20th Anniversary Edition. The Real Wealth of Nations: Pathways to Human Development*. Publicación del United Nations Development Programme. Nueva York, EE.UU.

UNEP, 2009. *Developing Integrated Solid Waste Management Plan. Training Manual. Vol 1: Waste Characterization and Quantification with Projections for Future*. Publicación del United Nations Environment Programme. Division of Technology, Industry and Economics. International Environmental Technology Centre. Osaka/Shiga, Japón.

UN-FAO. 2006. *Sustainable Bioenergy: A Framework For Decision Makers*. Publicación de la Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.

UNIDO. 2011. *Renewable and Rural Energy - Vienna Energy Forum 2011*. Publicación de la United Nations Industrial Development Organization. Viena, Austria.

UPC. 2000. *Primera jornada tècnica sobre la gestió de residus municipals*. Col·lecció Jornades Tècniques. Barcelona, España.

Vandevivere, P., De-Baere, L. y Verstraete, W. 2002. *Types of anaerobic digesters for solids wastes*. En: **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Mata-Alvarez, J. (editor) IWA Publishing. Cornwall, Reino Unido.

Verma, S. 2002. Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. M.S. thesis in Earth Resources Engineering. Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University. Nueva York, EE.UU.

Villa, F. 2010. *Compostaje de residuos orgánicos biodegradables*. En: **Energía de la biomasa**. Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (coordinadores). Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

Viqueira, J. 2007. *Energía e impacto ambiental*. Publicación de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Viswanath, P., Sumithra, S. y Nand, K. 1992. *Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production*. **Bioresource Technology**. 40:43-48.

Walsh, J., Ross, C., Smith, M., Harper, S. y Wilkins, W. 1988. *Biogas Utilization Handbook*. Georgia Tech Research Institute. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia, EE.UU.

Ward, A., Hobbs, P., Holliman, P. y Jones, D. 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresour. Technol.** 99:7928:7940.

WEF, 1998. *Operation of municipal wastewater treatment plants. Manual of practice*. No. 11. Volumen III. **Solids Processes**. Quinta edición. Virginia, EE.UU.

Wilkie, A. 1998. *Anaerobic digestion of Livestock Wastes: A Suitable Approach to Odor Abatement*. The North Carolina 1998 Pork Conference and Beef Symposium. North Carolina Pork Council. Raleigh, North Carolina. EE.UU.

Willem, J. y van Leeuwen, S. 2006. *Energy Security and Uranium Reserves*. Oxford Research Group. Reino Unido.

WWF, ECOFYS y OMA, 2011. *The Energy Report. 100% Renewable Energy by 2050*. Publicación del World Wide Fund For Nature y la Office for Metropolitan Architecture. Suiza

Yokoyama, S. y Matsumura, Y. 2008. *The Asian Biomass Handbook: A Guide for Biomass Production and Utilization*. The Japan Institute of Energy, Tokio, Japón.

