

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN

### 2.1 BIOMASA

Antes de comenzar este capítulo es preciso señalar ciertos aspectos importantes los cuales se mencionan a continuación:

La materia orgánica constituye energía solar almacenada y es denominada energía de la biomasa. La formación de materia viva o biomasa a partir de la luz solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis. Mediante el cual, los vegetales transforman productos minerales sin valor energético, dióxido de carbono y agua, en materias orgánicas de alta energía. La fotosíntesis sólo tiene lugar en plantas verdes, que contienen clorofila, ya que este compuesto es el que posibilita toda la serie de reacciones químicas que tienen lugar. Los productos que fabrican para sí las plantas (azúcares, proteínas, grasas, etc.) y el oxígeno que simultáneamente eliminan, sirven, a su vez, directa e indirectamente, de alimentos constituyentes o energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta.

Ahora bien, en todo proceso de conversión energética un importante factor a considerar es el rendimiento con que éste tiene lugar, es decir, la fracción del total de energía incidente (energía solar) que queda convertida en la forma de energía de interés (energía de la biomasa). Teniendo en cuenta las reacciones que gobiernan la fotosíntesis, se puede obtener el valor teórico del rendimiento fotosintético, que resulta ser, aproximadamente, de un 30%. Sin embargo, del total de la radiación solar que llega a la Tierra, sólo algo más del 40% es fotosintéticamente activa; además, sólo el 70% de ésta es absorbida por las hojas, ya que el resto, suele ser reflejada, con lo cual, la eficacia máxima teórica del proceso será de alrededor del 8% ( $0,3 \times 0,4 \times 0,7$ ). Por otra parte, las pérdidas de energía debidas a la respiración de las plantas (estimadas es cerca de un 40%) lleva a un rendimiento máximo teórico de transformación de la energía solar en biomasa que no llega al 5%. La realidad es que los valores más altos que se encuentran en condiciones óptimas de campo son del 3%, mientras que la media para el caso de plantas de cosecha anual sobrepasa el 1%. A pesar de lo anterior, mediante el desarrollo de una adecuada tecnología es evidente que podría utilizarse el potencial energético de la biomasa para cubrir un porcentaje de la demanda energética anual (Jarabo y Elortegui, 2000).

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. También se le considera biomasa a la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU). La biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua. Por este motivo, los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles, pudiendo ser, según su estado físico, biocombustibles sólidos, en referencia a los que son utilizados básicamente para fines térmicos y eléctricos, y líquidos como sinónimo de los biocarburantes para automoción (Fernández, 2008 a). De una forma más técnica, la OECD considera que la biomasa es cualquier material orgánico, de origen vegetal y animal, el cual es obtenido como producto o subproducto de la producción agrícola y silvícola, además de desechos urbanos e industriales, los cuales son desechos producidos por los hogares, industrias, hospitales, y el sector terciario, los cuales contienen materiales biodegradables (OECD, 2004; OECD/IEA, 2004)

La biomasa: Se puede clasificar por el tipo o fuente de biomasa que pueden ser utilizada energéticamente, una de las clasificaciones generalmente más aceptada es la siguiente (CONAE y GTZ, 2007):

- Biomasa natural: Es la que se encuentra en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Los recursos generados por los desechos naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa.
- Biomasa residual seca: Se incluyen en este grupo los productos sólidos no utilizados de las actividades agrícolas y ganaderas, las forestales y de los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son el estiércol, la paja, el orujo, la madera de podas y raleo, el aserrín, etc.
- Biomasa residual húmeda: Son los vertidos denominados biodegradables como lo son las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos principalmente

excrementos. La fermentación de este tipo de biomasa genera un gas (biogás) para combustión.

- Cultivos energéticos: Son cultivos realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustible. Se encuentran en este grupo el maíz, raps, girasol y plantaciones dendroenergéticas.

También existen otro tipo de desechos, los cuales no son considerados como biomasa, y estos son: Desechos sólidos municipales (no-renovables), los cuales son desechos producidos por los hogares, industrias, hospitales, y el sector terciario, los cuales contienen materiales no-biodegradables que son incinerados en instalaciones específicas (OECD/IEA, 2004).

- Bioenergía: Energía renovable producida a partir de la biomasa cuando se utiliza para producir calor y/o potencia y combustibles para el transporte (OECD, 2004).

## 2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS URBANOS DE TIPO ORGÁNICO (RUO)

### 2.1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Las características físicas más importantes de los residuos orgánicos incluyen: Peso específico, contenido de humedad, tamaño de la partícula y distribución del tamaño, capacidad de campo y porosidad de los residuos compactados (Tchobanoglous y Col. 1994 a).

#### 2.1.1.1.1 PESO ESPECÍFICO

El peso específico se define como el peso de un material por unidad de volumen (por ejemplo,  $\text{Kg}/\text{m}^3$ ). Como el peso específico de los RUO frecuentemente se refiere a residuos sueltos encontrados en los contenedores, no compactados, compactados, etc., la base utilizada para los valores presentados siempre debe ser citada. Los datos sobre el peso específico a menudo son necesarios para valorar la masa y el volumen total de los residuos que tiene que ser gestionados. En la Tabla 2.1 se presentan pesos específicos típicos para varios tipos de residuos tal como son encontrados en los contenedores, compactados o no compactados (Tchobanoglous y Col. 1994 a).

Cabe hacer notar que los pesos específicos de los residuos varían notablemente con la localización geográfica, la estación de año y el tiempo de almacenamiento, por lo cual se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionar los valores típicos.

#### 2.1.1.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad de los residuos normalmente se expresa de dos formas. En el método de medición peso-húmedo, la humedad de una muestra se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; en el método peso-seco, se expresa como un porcentaje de peso seco del material.

El método peso-húmedo se usa más frecuentemente en el campo de la gestión de residuos. En forma de ecuación, el contenido de humedad peso-húmedo se expresa de la forma siguiente en la ecuación 2.1 (Tchobanoglous y col., 1994 a):

$$M = \frac{W-d}{w} * 100 \dots\dots\dots 2.1$$

Donde:

M: Contenido de humedad

w: Peso inicial de la muestra según se entrega (kg)

d: peso de la muestra después de secarse a 105° C (kg)

Los datos típicos sobre el contenido de humedad de los componentes de los residuos urbanos de tipo orgánico, se muestran en la Tabla 2.1.

### 2.1.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

Si los RUO van a utilizarse como combustible, las propiedades más importantes que es preciso conocer son:

- Análisis físico
- Punto de fusión de la ceniza
- Análisis elemental
- Contenido energético

La información sobre la composición química de los RUO es importante para evaluar las opciones de procesamiento y recuperación. Cuando los residuos orgánicos se van a compostaje o se van a utilizar como alimentación para la elaboración de otros productos de conversión biológica, no solamente será importante tener información sobre los elementos mayoritarios que los componen, sino también será importante tener información sobre los elementos en cantidades traza que se encuentran en este tipo de residuos (Tchobanoglous y col., 1994 a).

#### 2.1.1.2.1 ANÁLISIS FÍSICO

El análisis físico para los componentes combustibles de los RUO incluye los siguientes ensayos (Singer, 1981; Drobny y col., 1971):

1. Humedad: Pérdida de humedad cuando se calienta a 105°C durante una hora.
2. Materia volátil combustible: Pérdida de peso adicional con la ignición resultado de estar un cuerpo encendido o incandescente a 950°C en un crisol cubierto.
3. Carbono fijo: Rechazo combustible dejado después de retirar la materia volátil.
4. Ceniza: Peso del rechazo después de la incineración en un crisol abierto.

Los componentes combustibles de los RUO se presentan en la Tabla 2.2. El ensayo utilizado para determinar las materias combustibles volátiles en un análisis físico es diferente del ensayo de sólidos volátiles utilizado en las determinaciones biológicas.

#### 2.1.1.2.2 PUNTO DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS

El punto de fusión de las cenizas, es la temperatura en la que la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólido (escoria) por la fusión y aglomeración. Las

temperaturas típicas de fusión para la formación de escorias de residuos sólidos oscilan entre 1,100 y 1,200 ° C (Tchobanoglous y col., 1994 a).

*Tabla 2. 1 Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos orgánicos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas (Kaiser, 1966; Neissen, 1977).*

TIPO DE RESIDUO	PESO ESPECIFICO, Kg/m <sup>3</sup>		CONTENIDO EN HUMEDAD, PORCENTAJE EN PESO	
	RANGO	TÍPICO	RANGO	TÍPICO
<b>DOMÉSTICOS NO COMPACTADOS</b>				
Residuos de comida (mezclados)	131-481	291	50-80	70
Residuos de jardín	59-255	101	30-80	60
<b>RESIDUOS DE JARDÍN DOMÉSTICOS</b>				
Hojas (sueltas y secas)	30-148	59	20-40	30
Hierva verde (suelta y húmeda)	208-297	237	40-80	60
Hierva verde (húmeda y compactada)	293-831	593	50-90	80
Residuos de jardín (tritutados)	267-356	297	20-70	50
Residuos de jardín (compost)	267-386	326	40-60	50
<b>COMERCIALES</b>				
Residuos de comida (húmedos)	475-950	540	50-80	70
Podas de árboles	101-181	148	20-80	5
<b>AGRÍCOLAS</b>				
Agrícolas (mezclados)	400-751	561	40-80	50
Animales muertos	202-498	359	-	-
Residuos de frutas (mezclados)	249-751	359	60-90	75
Estiércol (húmedo)	899-1,050	1,000	75-96	94
Residuos de vegetales (mezclados)	202-700	359	60-90	75

#### 2.1.1.2.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO

El análisis elemental de un residuo normalmente implica la determinación del porcentaje de C (carbono), H (hidrógeno), O (oxígeno), N (nitrógeno), S (azufre) y cenizas. Los resultados del

análisis elemental se utilizan para caracterizar la composición química de la materia orgánica en los RUO. También se usan para definir la mezcla correcta de materiales residuales necesaria para conseguir relaciones C/N aptas para los procesos de conversión biológica (Tchobanoglous y col., 1994 a). Los datos sobre el análisis elemental de materiales combustibles individuales se presentan en la Tabla 2.3.

#### 2.1.1.2.4 CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO

El contenido energético de los RUO se puede determinar: 1) Utilizando una caldera a escala real como calorímetro, 2) Utilizando una bomba calorimétrica de laboratorio y 3) Por cálculo, si se conoce la composición elemental. Por las dificultades que existen para instrumentar una caldera a escala real, la mayoría de los datos sobre el contenido de energía de los componentes orgánicos están basados en los resultados de ensayos con una bomba calorimétrica. Los datos típicos del contenido energético y de los rechazos inertes de los componentes de los RUO, se representan en la Tabla 2.4. Los valores kJ/kg dados en la tabla, pueden convertirse a una base seca mediante la ecuación 2.2 (Tchobanoglous y col., 1994 a):

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{base seca}) = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{residuos desechados}) \left( \frac{100}{100 - \% \text{humedad}} \right) \dots\dots\dots 2.2$$

La ecuación 2.3 es la correspondiente para kJ por kilogramos en una base seca y libre de cenizas:

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{base seca libre de cenizas}) = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{residuos desechados}) \left( \frac{100}{100 - \% \text{humedad} - \% \text{cenizas}} \right) \dots\dots\dots 2.3$$

Tabla 2. 2 Análisis próximo y datos energéticos típicos para materiales encontrados en los RUO (Kaiser, 1966; Neissen, 1977).

TIPO DE RESIDUO	ANÁLISIS PRÓXIMO, PORCENTAJE EN PESO				CONTENIDO ENERGÉTICO Kcal/kg		
	HUMEDAD	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	NO COMBUSTIBLE	COMO RECOGIDOS	SECO	SECO Y LIBRE DE CENIZAS
COMIDA Y PRODUCTOS DE COMIDA							
Grasas	2	95.3	2.5	0.2	8,964	9,148	9,353
Residuos de comida mezclados	70	21.4	3.6	5.0	998	3,324	3,989
Residuos de frutas	78.7	16.6	4.0	0.7	948	4,452	4,603
Residuos de carne	38.8	56.4	1.8	3.1	4,235	6,919	7,289
MADERA ARBOLES ETC.							
Residuos de jardín	60	30	9.5	0.5	1,445	3,613	3,658
Madera verde	50	42.3	7.3	0.4	1,167	2,333	2,352
Madera dura	12	75.1	12.4	0.5	4,084	4,641	4,668
Madera mezclada	20	68.1	11.3	0.6	3,689	4,620	4,657

Tabla 2. 3 Datos típicos sobre el análisis del material combustible presente en los RUO (Kaiser, 1966).

TIPO DE RESIDUO	PORCENTAJE EN PESO (BASE SECA)					
	CARBONO C	HIDRÓGENO H	OXÍGENO O	NITRÓGENO N	AZUFRE S	CENIZAS
COMIDA Y PRODUCTOS DE COMIDA						
Grasas	73.0	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Residuos de comida (mezclados)	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carne	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
Madera, arboles etc.						
Residuos de jardín	46.0	6.0	38.0	3.4	0.3	6.3
Madera verde	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1.0
Maderas duras	49.6	6.1	43.2	0.1	<0.1	0.9
Madera mezclada	49.5	6.0	42.7	0.2	<0.1	1.0
Viruta de madera (mezclada)	48.1	5.8	45.5	0.1	<0.1	0.4

Tabla 2. 4 Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RUO domésticos (Kaiser, 1966; Neissen, 1977).

COMPONENTES	RECHAZOS INERTES PORCENTAJE <sup>b</sup> %		ENERGÍA <sup>c</sup> , Kcal /kg	
	RANGO	TÍPICO	RANGO	TÍPICO
Residuos de comida	2-8	5	833-1 667	1 111
Residuos de jardín	2-6	4.5	556-4 444	1 556

b: Después de combustión total

c: Sobre una base como desechados

Si no se puede disponer de valores de poder calorífico, los valores aproximados del poder calorífico para los materiales individuales de los residuos pueden determinarse mediante el uso de la ecuación 2.4 (Tchobanoglous y col., 1994 a).

$$\frac{kJ}{kg} = \left[ 145 C + 610 \left( H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 405 + 10 N \right] * 2.326 \dots \dots \dots 2.4$$

Donde

C= Carbono, porcentaje en peso

H<sub>2</sub> = Hidrógeno, porcentaje en peso

O<sub>2</sub>= Oxígeno, porcentaje en peso

S= Azufre, porcentaje en peso

N= Nitrógeno, porcentaje en peso

En la ecuación 2.4, el contenido de oxígeno está dividido por ocho y restado del hidrógeno para justificar la cantidad de hidrógeno que reacciona con el oxígeno presente y, por lo tanto, no contribuye al contenido energético del residuo.

#### 2.1.1.2.5 NUTRIENTES ESENCIALES Y OTROS ELEMENTOS

Cuando los RUO se van a utilizar como alimentación para la elaboración de productos biológicos de conversión, tales como compost, metano y etanol, la información sobre los nutrientes esenciales y los elementos del material residual es importante respecto a la disponibilidad de nutrientes de microorganismos, y para valorar los usos finales que puedan tener los materiales restantes después de la conversión biológica. Los nutrientes esenciales y los elementos encontrados en los principales materiales que conforman los RUO se presentan en la Tabla 2.5.

#### 2.1.1.3 PROPIEDADES BIOLÓGICAS

La mayoría de los RUO se pueden clasificar de la forma siguiente:

1. Constituyentes solubles en agua, tales como azúcares, féculas, aminoácidos, diversos ácidos orgánicos.
2. Hemicelulosa, un producto de condensación de azúcares con cinco y seis carbonos.

3. Celulosa, un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos.
4. Grasas, aceites y ceras, que son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
5. Lignina, un material polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi ( $-\text{OCH}_3$ ), cuya fórmula exacta aún no se conoce (presente en algunos productos de papel como periódicos y en tablas de aglomerado).
6. Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosas.
7. Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.

Quizás la característica biológica más importante de la fracción de los residuos orgánicos, es que casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos relativamente inertes (Tchobanoglous y col., 1994 a).

#### 2.1.1.3.1 BIODEGRADABILIDAD DE LOS COMPONENTES DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El contenido en sólidos volátiles (SV), determinado a 550°C, frecuentemente se utiliza como una medida de la biodegradabilidad de los RUO. El uso de SV para la descripción de los RUO es erróneo, porque algunos de los constituyentes de los RUO son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad (por ejemplo, el papel periódico y algunos recortes de plantas). Alternativamente, se puede usar el contenido de lignina de un residuo para estimar la fracción biodegradable, mediante la relación siguiente (Chandler y col., 1980):

$$BF = 0.83 - (0.028 * LC) \dots\dots\dots 2.5$$

Donde

BF = Fracción biodegradable expresada en base a los sólidos volátiles (SV)

0.83 = Constante empírica

0.028 = Constante empírica

LC = Contenido de lignina de los SV expresado como un porcentaje en peso seco

Como puede observarse en la Tabla 2.6 los residuos con altos contenidos de lignina, tales como papel periódico, son significativamente menos biodegradables.

Tabla 2. 5 Análisis elemental de los materiales orgánicos utilizados como alimentación en los procesos de conversión biológica (Tchobanoglous y col., 1994a).

CONSTITUYENTE	SUSTRATO DE ALIMENTACIÓN (BASE SECA)		
	UNIDAD	RESIDUOS DE JARDÍN	RESIDUOS DE COMIDA
$NH_4-N$	ppm	149	205
$NO_3-N$	ppm	490	4,278
$P$	ppm	3,500	4,900
$PO_4-P$	ppm	2,210	3,200
$K$	%	2.27	4.18
$SO_4-S$	ppm	882	855
$Ca$	%	0.42	0.43
$Mg$	%	0.21	0.16
$Na$	%	0.06	0.15
$B$	ppm	88	17
$Se$	ppm	<1	<1
$Zn$	ppm	20	21
$Mn$	ppm	56	20
$Fe$	ppm	451	48
$Cu$	ppm	7.7	6.9
$Co$	ppm	5	3
$Mo$	ppm	1	<1
$Ni$	ppm	9	4.5
$W$	ppm	4	3.3

Tabla 2. 6 Datos sobre la fracción biodegradable de componentes seleccionados de RUO basándose en el contenido de lignina (Tchobanoglous y col., 1994a).

COMPONENTE	SÓLIDOS VOLÁTILES (SV) PORCENTAJE DE SÓLIDOS TOTALES (ST)	CONTENIDO DE LIGNINA (CL) PORCENTAJE DE SV	FRACCIÓN BIODEGRADABLE (FV) <sup>a</sup>
Residuos de comida	7-15	0.4	0.82
Papel			
Papel de periódico	94	21.9	0.22
Papel de oficina	96.4	0.4	0.82
Cartón	94	12.9	0.47
Residuos de jardín	50-90	4.1	0.72

a. Calculado utilizando la ecuación 2.5.

#### 2.1.1.3.2 PRODUCCIÓN DE OLORES

Los olores pueden desarrollarse cuando los RUO se almacenan durante largos periodos de tiempo.

Normalmente la formación de olores se produce por la descomposición anaerobia de los RUO fácilmente degradables. Por ejemplo, bajo condiciones anaerobias (reducción), el sulfato  $SO_4^{2-}$ , puede ser reducido a sulfuro  $S^{2-}$ , que se combina con el hidrógeno para formar  $H_2S$ . El ion sulfuro también puede combinarse con sales metálicas que pueden estar presentes, como hierro, para formar sulfuros metálicos. El color negro de los residuos sólidos que han experimentado descomposición anaerobia, se debe principalmente a la formación de sulfuros metálicos (Tchobanoglous y col., 1994a).

## 2.2 TECNOLOGÍAS PARA LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

Las tecnologías más adecuadas para convertir la biomasa en energía y/o en combustibles dependen, entre otros factores de (Concheiro y Rodríguez, 1985):

- La clase de biomasa
- Su contenido de humedad
- Las condiciones del proceso de conversión (tasa de alimentación, tamaño de las partículas, relación biomasa-aire, temperatura de conversión, etc)

d. El uso final de producto energético

La transformación de la biomasa en energía y/o en combustibles puede dividirse en tres grupos, de acuerdo con la naturaleza de los procesos implicados (Jarabo y Elortegui, 2000).

- a. Procesos termoquímicos
- b. Procesos bioquímicos
- c. Extracción directa (conversión mecánica)

En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente los procesos de conversión de la biomasa a electricidad y/o energía térmica.

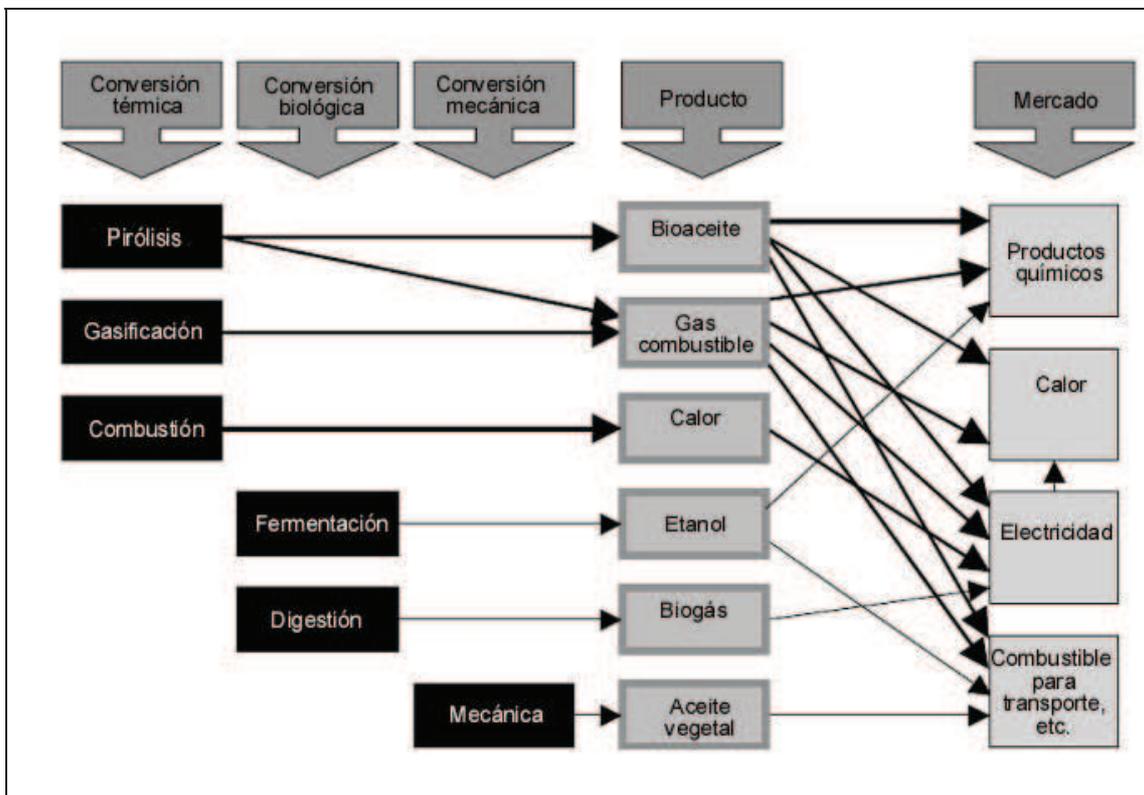


Figura 2. 1 Procesos de conversión de la biomasa, productos y aplicaciones (OECD, 2004).

### 2.2.1 PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Estos procesos se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas, en condiciones variables de oxidación, encontrándose implicadas reacciones químicas irreversibles. Pueden subdividirse en tres amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo con exceso de oxígeno (combustión), en presencia de cantidades limitadas de oxígeno (gasificación) o en ausencia de oxígeno (pirólisis).

Los materiales más idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido de humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc. Estos métodos de conversión dan como resultado, mezclas de combustibles, sólidos, líquidos y gaseosos, con diversos valores energéticos (Jarabo y Elortegui, 2000).

#### 2.2.1.1 COMBUSTIÓN

Es la oxidación completa de la materia para dar dióxidos de carbono, vapor de agua, cenizas, y principalmente, calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso. Las variables que afectan principalmente al buen funcionamiento de este proceso son:

a. La proporción de oxígeno en el gas de entrada: La insuficiencia de oxígeno impide que la reacción sea completa, dando lugar a la producción de carbón y monóxido de carbono (gas altamente contaminante). Para evitar este tipo de complicaciones, generalmente se trabaja con un exceso de oxígeno comprendido entre el 20 y 40% del teórico necesario.

b. Temperatura de combustión: Es aquella que alcanzan los productos de la combustión debido al calor generado en la reacción, que es exotérmica, descontando las pérdidas debidas a la radiación y al combustible no quemado o quemado de forma incompleta. Los valores normales se encuentran en el rango de 600 a 1,300°C; niveles inferiores producen un efecto similar en el proceso que el defecto de oxígeno.

c. Características del combustible: Estas características se pueden dividir en tres grupos:

c.1. Físicas: Tal como la densidad, la granulometría y el contenido de humedad, siendo este último muy importante debido a que la vaporización del agua consume gran parte de la energía producida. Por lo anterior, se aconseja utilizar para este proceso solo biomasa de bajo contenido de agua.

c.2. Características químicas: En cuanto a éstas, el combustible debe tener bajos contenidos de azufre, cloro y flúor (aspecto que cubre satisfactoriamente la biomasa vegetal), ya que en caso contrario se produciría corrosión en el equipo y gases altamente contaminantes.

c.3. Características térmicas: Las propiedades energéticas de la biomasa dependen ostensiblemente de sus características físicas y químicas, principalmente de su contenido de carbono.

La combustión presenta una elevada eficiencia térmica. Cuando se utiliza biomasa seca (<20% de humedad), el rendimiento oscila entre 80 y 85%, mientras que en el caso más general de biomasa (>50% de humedad), el rendimiento se encuentra entre el 65 y el 70%. No obstante, la eficiencia global del proceso, considerando en sus productos finales (electricidad y vapor de baja presión), oscila alrededor del 30%.

La energía obtenida puede destinarse a la producción de calor (en forma de agua o de aire caliente) para el uso doméstico o industrial y la producción de electricidad (Jarabo y Elortegui, 2000).

#### 2.2.1.2 GASIFICACIÓN

En la gasificación, la biomasa se convierte en una mezcla de gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno como principales combustibles. La gasificación se basa en la oxidación incompleta de la biomasa empleada como materia prima, produciendo gases de bajo a alto contenido calorífico (Concheiro y Rodríguez, 1985). En este proceso, la temperatura de operación es un factor importante. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesario una temperatura mínima de 700 a 800°C y una máxima de 1,500°C.

La utilización como comburente de aire u oxígeno, da lugar a dos procesos de gasificación sustancialmente distintos. La presencia o no de nitrógeno en el comburente hace que se obtengan dos tipos diferentes de gas (Jarabo y Elortegui, 2000), tal como se muestra en la Figura 2.2.

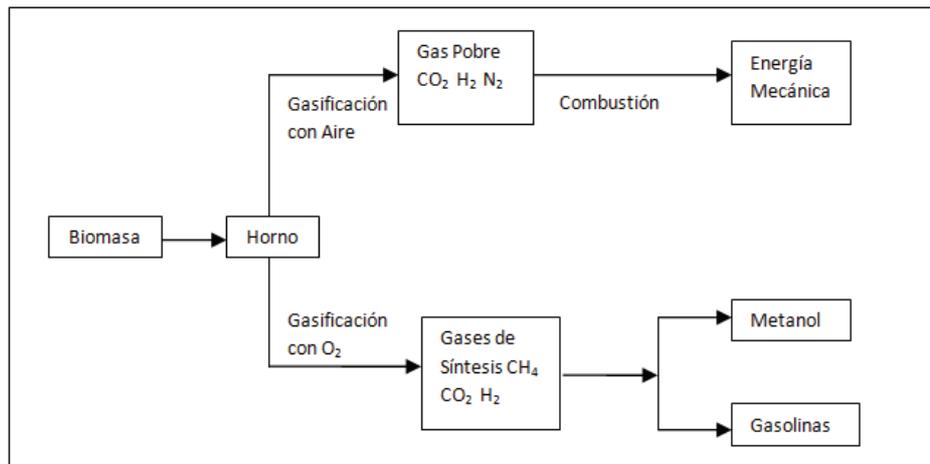


Figura 2. 2 Procesos de gasificación (Jarabo y Elortegui, 2000).

Gas de gasógeno o gas pobre: Su poder calorífico es muy bajo entre 3.4 y 5.4 MJ/m<sup>3</sup>. La presencia de nitrógeno impide su transformación en productos más nobles, y no se recomienda su almacenamiento y transporte por su baja densidad energética. La biomasa necesaria para la producción de este gas debe presentar humedad inferior al 20%.

Gas de síntesis: Su poder calorífico oscila entre 5.0 y 10.9 MJ/m<sup>3</sup>. Este gas tiene la posibilidad de transformarse en combustibles líquidos como el metano y gasolinas (Jarabo y Elortegui, 2000).

### 2.2.1.3 PIRÓLISIS

Es un proceso que consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor en ausencia de oxígeno, para la recuperación del material volátil de las materias líquidas y sólidas, en especial de las orgánicas, así como la obtención de residuo sólido carbonizado. De manera general, se puede decir que la temperatura a la que comienza y finaliza la pirólisis, se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7 Temperaturas de inicio y fin del proceso de pirólisis (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

PROCESO DE PIRÓLISIS		
TEMPERATURA DE INICIO DEL PROCESO EN °C	TEMPERATURA DE FIN DEL PROCESO EN °C	REFERENCIA
200	500	Creus, 2004
275	450	Jarabo y Elortegui, 2000

La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor. Así los productos de reacción se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1. Gases compuestos por hidrógeno ( $H_2$ ), óxidos de carbono ( $CO$ ,  $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), etano  $C_2H_6$  y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros (éstos son de peso molecular bajo). Estos gases pueden convertirse en energía quemándose en motores de gas con un rendimiento efectivo del 33% en la producción de electricidad (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

2. Líquidos que contienen compuestos hidrocarbonados complejos, entre los que destacan los de carácter oxigenado, como pueden ser cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, etc (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

3. Residuos sólidos carbonos que contienen carbono y alquitranes, así como cenizas. Este residuo de carbón vegetal o coque de pirólisis puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo. Así, el coque de pirólisis puede introducirse en un gasificador y convertirse en gas combustible (gas de síntesis) y en un granulado vítreo totalmente inerte que puede ser usado como producto energético en centrales de energía o en la industria de la construcción o ser depositado en vertederos de basura sin provocar ningún problema medioambiental (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

Existen diferentes tipos de procesos de pirólisis en función de las condiciones físicas que se mantengan en el horno como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión,

etc., que influyen en la distribución de los productos obtenidos (Creus, 2004), algunos de estos procesos se muestran en la Tabla 2.8

Tabla 2. 8 Procesos de pirólisis (Creus, 2004).

PIRÓLISIS	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	PRESIÓN bar	TEMPERATURA MÁXIMA °C	PRODUCTO PRINCIPAL
Carbonización	Horas- días	Muy baja	1	400	Sólido (carbón vegetal)
Convencional	5-30 minutos	Baja	1	600	Gas, líquido y sólido
Rápida	0.5-5 segundos	Muy alta	1	650	Líquido
Líquido- flash	< 1 segundo	Alta	1	< 650	Líquido
Gas-flash	< 1 segundo	Alta	1	> 650	Gas
Ultra	<0.5 segundos	Muy alta	1	1,000	Gas productos químicos y bioaceites
Vacio	2-30 segundos	Media	< 0.1	400	Líquido

### 2.2.2 PROCESOS BIOQUÍMICOS

Son aquellos procesos que se llevan a cabo mediante diversos tipos de microorganismos, ya sean contenidos en la biomasa original o añadidos durante el proceso. Estos microorganismos producen la degradación de las moléculas complejas constituyentes de la biomasa a compuestos más simples, de alta densidad energética. Se utilizan estos procesos, fundamentalmente, para tratar biomasa natural o residual de alto contenido en humedad y los más corrientes son la

fermentación alcohólica para producir etanol y la degradación anaerobia, para producir metano (Jarabo y Elortegui, 2000).

#### 2.2.2.1 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Las plantas almacenan la mayor parte de la energía solar que captan en forma de hidratos de carbono, compuestos que pueden presentarse de manera simple, en forma de azúcares, o en forma de polímeros: Almidón o celulosa. Cualquier producto que contenga azúcares fermentables o hidratos de carbono transformables en almidón o celulosa puede servir para obtener alcohol. Cuando la materia prima es rica en almidón o celulosa, es necesario someterla previamente a ciertos procesos para transformarla en compuestos fermentables.

El proceso global de obtención de etanol a partir de la biomasa se puede dividir en las siguientes etapas (Jarabo y Elortegui , 2000):

**1. Pre tratamiento de la biomasa:** Tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando ésta es poco asequible a la fermentación. El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas es el mecánico, ya que su objetivo fundamental es reducir la biomasa a partículas pequeñas, de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores. En esta fase se emplea la trituración.

**2. Hidrólisis:** Es la ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).

La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidas de microorganismos, dependiendo de las condiciones óptimas del proceso, de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos de pretratamiento efectuado y del sustrato empleado. La hidrólisis química no es específica y exige condiciones de proceso muy cuidadas. Una vez que la biomasa que contiene hidratos de carbono se ha transformado en una disolución azucarada, se puede someter a un proceso de fermentación, con objeto de convertir los azúcares en etanol.

**3. Fermentación alcohólica:** Es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos, que se produce a través de una compleja secuencia de reacciones químicas, desde el punto de vista técnico:



Según esta reacción, el rendimiento en etanol es de 51.1 % en peso, pero en la práctica este valor es algo inferior, ya que alrededor de un 5% de la glucosa es utilizada por los microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae*) para producir nuevas células y otros compuestos de su metabolismo.

En la actividad de las levaduras influyen una gran cantidad de factores, entre los que destacan:

- a. Temperatura: La velocidad óptima de fermentación se obtiene operando a temperaturas entre 27 y 32°C.
- b. Acidez: El pH de la disolución debe controlarse entre 4 y 5, ya que durante el proceso se forman ácidos.
- c. Concentración de azúcares: Valores superiores al 22% en peso pueden inhibir el crecimiento celular en las fases iniciales.
- d. Concentración de etanol: Valores superiores al 14% en peso destruyen las levaduras antes de que se complete la fermentación.

Tradicionalmente la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación.

**4. Separación y purificación del etanol:** En la fermentación, el etanol solo se encuentra en una concentración máxima comprendida entre el 8 y 12% en peso, lo que obliga a una separación y purificación del etanol, si se quiere obtener éste libre agua. Industrialmente se emplea para ello la rectificación (destilación con enriquecimiento del vapor), operación que se lleva a cabo normalmente en dos etapas, al final de las cuales se obtiene un alcohol del 96% en volumen de pureza. Esto es imposible de superar por destilación, ya que se trata de una mezcla azeotrópica, es decir, de punto de ebullición constante. Este tipo de etanol es el que se comercializa normalmente. Sin embargo, si se desea obtener etanol absoluto es necesario llevar a cabo una destilación adicional utilizando un tercer componente (benceno, éter, hexano, etc) que forme a su vez un azeotropo con el agua y libere el etanol seco (con una pureza mínima del 99.5%). En la figura 2.3 se muestra un esquema global de la obtención del etanol.

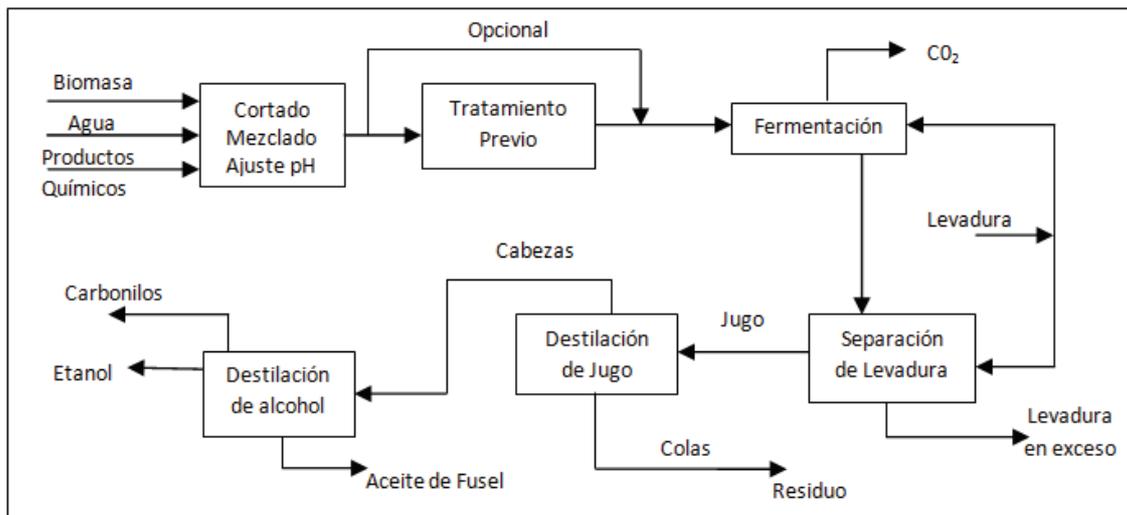


Figura 2. 3 Esquema global del proceso de obtención del etanol (Jarabo y Elortegui, 2000).

### 2.2.2.2 DIGESTIÓN

La digestión es una fermentación microbiana en rigurosas condiciones de ausencia de oxígeno (medio anaerobio), que da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodo o fango), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa (Jarabo y Elortegui, 2000).

Cabe destacar que los RUO tienen alto contenido de humedad lo que los hace muy susceptibles de ser digeridos. Aunque la digestión es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Esto es debido a que, por una parte, bajo el punto de vista químico, se desarrollan cientos de posibles reacciones, cada una de ellas catalizada por enzimas específicas para dar compuestos intermedios distintos.

Por otro lado, en el aspecto microbiológico, el número de especies bacterianas presentes es muy elevado y las relaciones entre ellas son altamente complejas.

En líneas generales, se puede decir que durante la digestión, la biomasa de partida, compuesta de moléculas complejas, se descompone en moléculas más pequeñas en las tres etapas siguientes:

hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Jarabo y Elortegui, 2000). Se explicará más a detalle este proceso, en el punto 2.3.

### 2.2.2.3 COMPOST

El proceso de compostaje, es la descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico, bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo (35° C) como resultado del proceso biológico aerobio exotérmico, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa. Este producto final estable y beneficioso para el suelo, recibe el nombre de compost, y el sustrato orgánico o materia prima a la que se le aplica el proceso puede ser cualquier residuo orgánico biodegradable, en la Figura 2.4 se describe este proceso.

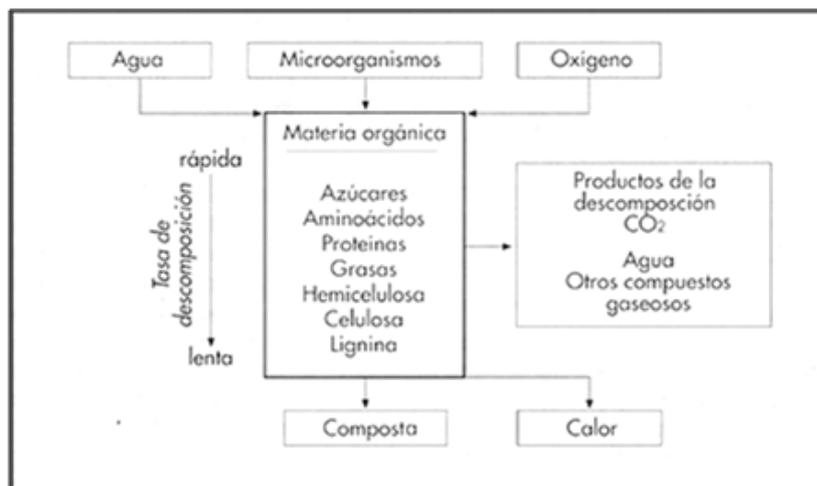


Figura 2. 4 Proceso de compostaje. (Castells, 2005)

#### 2.2.2.3.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El proceso está constituido por dos fases consecutivas: Descomposición y maduración tal como se muestra en la Figura 2.5 En la primera, diferentes poblaciones de bacterias, actinomiceto y hongos, trabajando de forma simultánea o consecutiva, descomponen los constituyentes de la materia orgánica como hidratos de carbono, proteínas, lípidos, estableciéndose relaciones de sinergia en algunos casos y de competencia por el sustrato en otros. En medio aerobio, las

reacciones son exotérmicas, de manera que si se dan las condiciones físicas adecuadas, se produce un aumento de la temperatura de la masa de descomposición, pudiendo llegar a superar los 70° C en un día.

Este aumento de la temperatura favorece el crecimiento de microorganismos termófilos, y si ésta se mantiene durante el tiempo suficiente, se consigue la destrucción de semillas de malas hierbas, huevos y larvas de insectos y de microorganismos patógenos. Esta es la base de las propiedades de higienización del proceso.

Esta fase de descomposición puede dividirse en tres etapas. Una inicial mesofílica durante la cual diversas familias de microorganismos mesófilos inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento de la temperatura y un ligero descenso del pH debido a la formación de ácidos orgánicos. En la segunda etapa, termofílica, aparecen los microorganismos termófilos y se superan los 40 °C. Si se llega a los 60 °C, los hongos se inactivan y la descomposición tiene lugar debido a los actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Las sustancias fácilmente degradables como proteínas, azúcares y lípidos, son rápidamente consumidas y la mayoría de patógenos son eliminados. A su vez, el pH se recupera y se alcaliniza debido al consumo de los ácidos orgánicos y al aumento de la concentración de amonio por descomposición de proteínas. Conforme la concentración relativa de compuestos orgánicos resistentes aumenta, la velocidad de descomposición y el consumo de oxígeno decrecen.

En la tercera etapa de la fase de descomposición, la temperatura empieza a disminuir, los hongos termofílicos reinviden el material en proceso de compostaje, y la celulosa y hemicelulosa inician su descomposición. Esta etapa es la más exigente del proceso y su buen desarrollo condiciona su continuidad. Estas tres etapas tienen una duración entre dos semanas y algunos meses, dependiendo de la composición inicial y del control de las condiciones de operación. En esta fase, biopolímeros como la celulosa y la lignina quedan parcialmente alterados, y pasan a ser, en la fase de maduración, las estructuras básicas para la formación de nuevas macromoléculas, que incluirán el amonio liberado durante la primera fase.

El aumento de temperatura y la necesaria renovación de aire para mantener concentraciones adecuadas de oxígeno favorecen la evaporación del agua, provocando un enfriamiento, obteniendo un producto más seco y favoreciendo la pérdida de compuestos volátiles que, como el

amoníaco, debe evitarse. Debe mantenerse un control sobre el proceso, de manera que el descenso de la temperatura y el secado no se produzcan hasta que la etapa de descomposición e higienización se hayan completado. Este control también ha de servir para evitar temperaturas suficientemente altas como para producir una esterilización de medio y por tanto un paro en la actividad biológica.

En la etapa de maduración tienen lugar procesos de biopolimerización, para formar moléculas complejas y estables, y microorganismos mesófilos y diversa microfauna colonizan el material para obtener, en un tiempo del orden de unos pocos meses, un compost completamente estabilizada y parcialmente humificado. La optimización del proceso consiste en encontrar las condiciones de operación que permitan el mínimo tiempo de las reacciones de la fase de descomposición. Trabajar con tecnologías que permitan tener la masa en descomposición en recinto cerrado y en condiciones controladas de aireación, humedad y temperatura, permite obtener tiempos de descomposición del orden de pocas semanas (Castells, 2005).

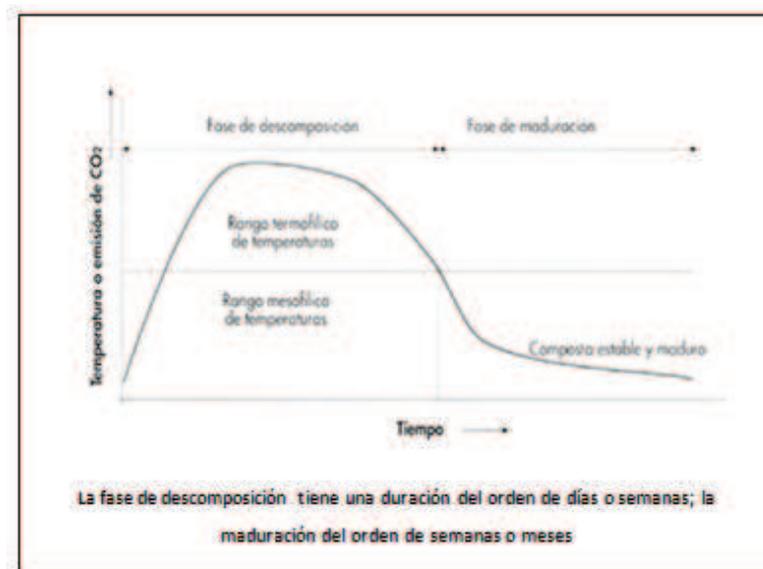


Figura 2. 5 Fases del proceso de compostaje. (Castells, 2005).

### 2.2.2.3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Las principales consideraciones de diseño asociadas con la descomposición biológica aerobia de RUO se presentan en la Tabla 2.9.

*Tabla 2.9 Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio (Tchobanoglous y col., 1994 b). Parte 1.*

PARÁMETRO	OBSERVACIONES
Tamaño de partícula	Para obtener resultados óptimos el tamaño de los residuos sólidos debería estar entre 25 y 27 mm.
Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)	Las relaciones carbono-nitrógeno iniciales (por masa) de entre 25 y 50 son óptimas para el compostaje aerobio. Con relaciones más bajas se emite amoníaco. También se impide la actividad biológica con relaciones más bajas. Con relaciones más altas, el nitrógeno puede ser un nutriente limitante.
Mezcla e inoculación	El tiempo de compostaje puede reducirse mediante el inóculo con residuos sólidos parcialmente descompuestos, aproximadamente del 1 al 5 % en peso. También pueden añadirse fangos de aguas residuales a los residuos sólidos preparados. Cuando se añaden los fangos, el contenido en humedad final es la variable fundamental.
Contenido en humedad	El contenido en humedad debería estar entre el 50 y el 60 % durante el compostaje. El valor óptimo parece ser el 55%.
Mezcla / volteo	Para prevenir el secado, encostramiento y la canalización de aire, el material que está compostándose debería ser mezclado o volteado regularmente o cuando sea necesario. La frecuencia de la mezcla o volteo dependerá del tipo de compostaje.

Tabla 2. 10. Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio (Tchobanoglous y col., 1994 b). Parte 2.

PARÁMETRO	OBSERVACIONES
Temperatura	Para obtener mejores resultados, la temperatura debería mantenerse entre 50 y 55 °C durante los primeros días y entre 55 y 60 °C para el resto del período de compostaje activo. Si la temperatura sube por encima de 66 °C, la actividad biológica se reduce significativamente.
Control de patógenos	Si se lleva a cabo correctamente, se pueden destruir todos los patógenos, hierbas malas y semillas, durante el compostaje. Para conseguir esto, la temperatura debe mantenerse entre 60 y 70 °C durante 24 horas.
Requisitos de aire	El aire con por lo menos el 50 % de la concentración del oxígeno inicial restante debería llegar a todas las partes del material que está compostándose para conseguir resultados óptimos, especialmente en los sistemas mecánicos.
Control de Ph	Para lograr una descomposición aerobia óptima, el pH debería permanecer en el rango de 7 a 7.5. Para minimizar la pérdida de nitrógeno en la forma de gas amonio, el pH no debería sobrepasar un valor de 8.5.
Grado de descomposición	El grado de descomposición puede estimarse mediante la medición de la bajada final de temperatura, el grado de la capacidad de autocalentamiento, la cantidad de materia orgánica descomponible y resistente en el material de compostaje, la subida en el potencial redox, la absorción de oxígeno, el crecimiento del hongo <i>Chaetomium gracilis</i> , y el ensayo almidón-yodo.
Necesidades de terreno	Las necesidades de terreno para una planta con una capacidad de 50 Ton/día serán de 6,000 a 8,000 m <sup>2</sup> . El área de terreno necesario para una planta mayor será menor en relación a Ton/día.

### 2.2.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN QUÍMICA DIRECTA

Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa directamente por extracción, ya que se tienen diversas especies vegetales que producen en su metabolismo hidrocarburos o compuestos afines, de elevado poder calorífico, que se pueden utilizar directamente como combustibles. Estos compuestos se pueden obtener mediante un proceso de extracción directa, aunque en la actualidad no está completamente definido el esquema de operación, debido a que está muy condicionado a cada tipo de especie vegetal. En general, las plantas cortadas se secan y se muelen a tamaños pequeños, que se someten a extracción con acetona u otro disolvente similar. Extracciones posteriores con hexano y benceno permiten obtener varios tipos de aceites, formados por hidrocarburos, y un residuo rico en proteínas e hidratos de carbono, que puede ser utilizado como materia prima para la producción de etanol por fermentación (Jarabo y Elortegui, 2000).

### 2.2.4 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES

La biomasa es una excelente alternativa energética por dos razones. La primera es que, a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos; la segunda, se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, mediante procesos específicos, se puede obtener toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser aplicados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria (Fernández, 2008a).

#### 2.2.4.1 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Dentro del grupo de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza. La paja, los restos de poda de árboles, la leña, las cortezas, entre otras, son materia típica para elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrícola.

También las cáscaras de frutos secos, huesos de aceituna y otros frutos y los restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una buena materia prima para la

fabricación de biocombustibles sólidos. Otro grupo de biocombustibles sólidos lo constituye el carbón vegetal, que resulta de un tratamiento térmico con bajo contenido en oxígeno de la biomasa-leña, pero al ser el resultado de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, debe ser considerado de naturaleza secundaria. Aunque una parte importante de la biomasa se utiliza directamente, como por ejemplo la leña en hogares y chimeneas, la utilización energética moderna de los biocombustibles sólidos requiere un acondicionamiento especial (Fernández, 2008a).

#### 2.2.4.2 BIOCMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La denominación de biocombustibles líquidos se aplica a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sustitución de los derivados del petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores. Se pueden utilizar tanto en los motores de explosión de encendido por chispa (ciclo Otto), como en los de combustión interna por compresión (ciclo Diesel) (Fernández, 2008b). Estos productos se obtienen mediante la transformación de materias primas de origen vegetal y presentan determinadas características físico-químicas similares a las de los combustibles convencionales derivados del petróleo.

Los tipos de biocombustibles líquidos para el transporte, engloban en la actualidad dos tipos de productos: El bioetanol y sus derivados, para sustituir parcial o totalmente a las gasolinas o a los aditivos que se utilizan en los motores de explosión para aumentar el índice de octano; y el biodiésel como sustituto del gasóleo (fracción destilada del petróleo crudo, que se purifica especialmente para eliminar el azufre) de automoción (también denominado biogasóleo o diéster), producido por transesterificación (reacción entre un éster y un alcohol) de aceites vegetales, naturales o usados (Fernández, 2008a).

El etanol se puede obtener a partir del petróleo o por vía biológica mediante procesos de fermentación. El alcohol etílico de origen vegetal (bioetanol) se obtiene por fermentación de mostos azucarados, que dan lugar a "vinos" de grado alcohólico variable (normalmente entre el 10 y el 15 %). Este alcohol se puede concentrar más tarde por destilación hasta la obtención del denominado "alcohol hidratado" (4-5 % de agua) o llegar hasta el alcohol absoluto tras un proceso específico de deshidratación.

La fabricación de biodiésel es un proceso sencillo y bien conocido desde el punto de vista técnico. Se parte de un aceite vegetal, que se somete a un proceso llamado de transesterificación, en el que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos y se obtienen nuevos ésteres con los ácidos grasos liberados en la hidrólisis y un alcohol sencillo que se utiliza como reactivo (normalmente metanol o etanol). El proceso se realiza a una temperatura moderada (alrededor de 60°C) en presencia de un catalizador (por lo general sosa o potasa) y como subproducto se obtiene glicerol, que tiene infinidad de aplicaciones en los sectores agrario, industrial, de la medicina, los cosméticos y la alimentación. A partir de 1,000 kg de aceite, 156 kg de metanol y 9.2 kg de potasa se puede obtener 965 kg de biodiésel y 178 kg de glicerina (sin refinar) con una recuperación de 23 kg de metanol (Fernández, 2008 b).

#### 2.2.4.3 BIOCMBUSTIBLES GASEOSOS

Entre los biocombustibles gaseosos que se pueden obtener a partir de la biomasa están el gas de gasógeno, el biogás y el hidrógeno. El gasógeno se produce al someter la biomasa o pedazos de carbón vegetal y la brea resultantes de la pirólisis a altas temperaturas entre 800 y 1,500°C en ausencia de oxígeno, se originan productos gaseosos, con un poder calorífico bajo de 1,000 a 1,200 Kcal/m<sup>3</sup> consistentes, principalmente, en N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en proporciones variables. Este proceso se realiza en los llamados gasógenos, que se utilizan con fines térmicos o, en combinación con motores, para producir energía mecánica o eléctrica. En principio, el destino del gas de gasógeno suele ser la producción de calor por combustión directa en un quemador o la generación de electricidad por medio de un motor o turbina.

El biogás se produce por la digestión de la biomasa, su producción aproximada es de unos 300 l por kg de materia seca, con un valor calórico de unos 5,500 kcal/m<sup>3</sup>. La composición de biogás es variable, pero está formado principalmente por CH<sub>4</sub> (55-65%) y CO<sub>2</sub> (35-45%); y, en menor proporción, por nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas). El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (9,500 Kcal /m<sup>3</sup>), pudiéndose aumentar ésta, eliminando todo o parte del CO<sub>2</sub> que le acompaña. Este tipo de transformación se produce de manera espontánea en pantanos o fondos de lagunas y lagos en los que haya depósitos de materia orgánica. Por este motivo al metano se le ha llamado el “gas de

los pantanos”. También se produce en los vertederos de RSU, pudiéndose obtener el gas mediante perforaciones.

El biogás se suele utilizar para generar electricidad. En el caso de los vertederos, su uso para este fin tiene como ventajas añadidas la quema del metano y su transformación en CO<sub>2</sub> y agua. De esta forma se reduce el efecto perjudicial del metano como gas de efecto invernadero (su potencial de absorción de la radiación infrarroja es muy superior al del CO<sub>2</sub>). La digestión es un proceso típico de depuración, por lo que también se emplea para el tratamiento de aguas residuales y efluentes orgánicos de industrias agrarias o de explotaciones ganaderas.

El hidrógeno se considera actualmente como un “vector energético” de enorme potencial. Su combustión produce agua y una gran cantidad de energía (27 kcal/g), por lo que resulta idóneo para múltiples aplicaciones en la industria, el transporte y el hogar. La obtención del hidrógeno a partir de compuestos orgánicos hidrogenados, tales como hidrocarburos o alcoholes, se realiza mediante un proceso denominado “reformado”. Consiste en romper las moléculas orgánicas en sus componentes elementales (carbono e hidrógeno y eventualmente oxígeno) mediante reacciones con vapor de agua en presencia de un catalizador. Entre las moléculas orgánicas con posibilidad de ser la vía limpia de obtención de hidrógeno destaca el bioetanol, que se puede obtener a gran escala a partir de biomásas alcoholígenas (Fernández, 2008a).

### 2.3 DIGESTIÓN

Es el método utilizado para descomponer materia orgánica bajo condiciones controladas con producción de gas metano. Éste consiste, en lo esencial, en llenar un recipiente cerrado (el digestor) con el material orgánico, dejándolo dentro durante un periodo de semanas o meses, a lo largo de los cuales, dadas unas condiciones ambientales y químicas favorables, el proceso biológico pertinente tendrá lugar. Como la descomposición anaerobia solo puede producirse en ausencia de oxígeno, habrá un periodo inicial de descomposición en que tendrá lugar un proceso aerobio y se utilizará todo el oxígeno disponible, produciendo CO<sub>2</sub>. A partir de ese momento comenzará el proceso anaerobio propiamente dicho (Steadman, 1978).

Existen dos etapas o fases de descomposición, caracterizadas por diferentes tipos de bacterias, que generalmente se suceden una a la otra pero que pueden estarse produciendo

simultáneamente en diferentes partes del recipiente: Una fase de fermentación y, una fase de metanogénesis. Al empezar el proceso de descomposición dentro de un reactor nuevo es necesario inocular con una mezcla inicial de una pequeña cantidad de estiércol fresco o de lodos de que flota en las alcantarillas, para que estén presentes las bacterias necesarias. Una vez que se ha iniciado el proceso, cada lote inocula al siguiente, y el material de un recipiente al siguiente. Si no están presentes las bacterias responsables de la producción del gas metano, el resultado sería simplemente la fermentación de todo el material descompuesto (Steadman, 1978).

En la primera fase, la licuefacción, las grandes moléculas orgánicas (grasas, proteínas, almidones) se descomponen en sustancias más sencillas, azúcares, alcohol, glicéridos péptidos y amino ácidos. Uno de los productos orgánicos ácidos principales en esta primera fase es el ácido acético. En la segunda, la fase de gasificación, actúa una segunda población de bacterias que convierten los ácidos orgánicos en gas metano. Las bacterias productoras de metano se multiplican menos rápidamente que las que producen la licuefacción, y son más sensibles a las variaciones del medio ambiente dentro del recipiente de descomposición o digestor (Steadman, 1978).

Otros autores dividen el proceso de la digestión en tres procesos degenerativos:

a) Hidrólisis enzimática, en que los sólidos fermentables como hidratos de carbono, lípidos y proteínas, son convertidos en compuestos solubles como, ácidos grasos de cadena larga, azúcares, alcoholes, etc (Concheiro y Rodríguez, 1985; Castells, 2005).

b) Acidulación o acidogénesis, en esta etapa los compuestos solubles (azúcares), se convierten en ácidos orgánicos volátiles (ácidos grasos de cadena corta), como el acético, butírico y el propiónico. Asimismo, se produce hidrógeno y dióxido de carbono, siendo todos los compuestos anteriores utilizados como alimento para las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa (Concheiro y Rodríguez, 1985; Jarabo y Elortegui, 2000).

c) Metanación o metanogénesis, esta etapa implica la degradación de las sustancias producidas en etapas anteriores (como ácidos orgánicos volátiles) a metano y dióxido de carbono, por parte de un grupo de bacterias estrictamente anaerobias, denominadas metanogénicas. La magnitud de su población condiciona fuertemente la producción del metano, ya que su velocidad de reproducción es muy baja y necesita unas condiciones del medio muy propicias, las cuales se abordarán más adelante (Concheiro y Rodríguez, 1985; Jarabo y Elortegui, 2000).

Las bacterias productoras de gas metano, llamadas por ello metanogénicas, se encuentran entre los organismos más estrictamente anaerobios que se conocen e incluyen los siguientes géneros: *Metanococcus*, *Metanobacterium*, *Metanosarcina*, *Metanospirillum* y *Metanobacillus*. Usualmente no son móviles crecen con lentitud (en tres días) y se encuentran en forma natural en estiércol, pantanos y aguas negras (Concheiro y Rodríguez, 1985).

### 2.3.1 DISEÑO DE UN DIGESTOR

Para desarrollar tecnología comercial y económicamente atractiva, para la digestión de biomasa, es necesario homogeneizar las propiedades físicas y químicas de la materia prima, con las consideraciones de diseño y las cualidades técnicas del proceso. La selección de las propiedades de diseño del digestor, para una materia prima en particular, es una clave elemental para el desarrollo apropiado del proceso. Por tanto el entendimiento de los principios de operación de la mayoría de los tipos de digestores puede ayudar a seleccionar un esquema de proceso y a reducir las posibilidades de un desarrollo largo y complicado.

La relativa importancia de ciertos parámetros técnicos, para la alta producción y velocidad de metano depende de la materia prima y de los costos del reactor para el costo final del uso del biogás.

#### 2.3.1.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)

El tiempo de retención hidráulica en un digestor está determinado por el cálculo del número de días requeridos para desplazar un volumen en el reactor. Cuando se utilizan alimentaciones sin diluir, el TRH en el digestor a cierta velocidad de carga, está en función del contenido de agua de la biomasa. Como el TRH puede disminuirse al realizar alimentaciones con bajo contenido de sólidos, con alta velocidad de carga, o aplicando ambos, esto puede ocasionar que un gran número de las bacterias responsables del proceso de digestión, sean lavadas hacia afuera del sistema. A no ser que alguna parte del efluente sea retenida en el reactor, para mantener cierta medida de sólidos y organismos en el sistema, la eficiencia de conversión disminuirá, la producción de metano bajará y probablemente ocurrirá una inestabilidad grande en el digestor. Las bacterias metanogénicas de lento crecimiento, serán lavadas o arrastradas fuera del digestor más

rápidamente que las de crecimiento acelerado, mientras que las bacterias responsables de producir ácidos causan un desbalance microbiológico, acumulación de grandes niveles de ácidos volátiles y una eventual desestabilización del sistema.

Discusiones acerca de digestores convencionales han destacado la importancia del TRH, ya que se considera que es similar al TRS (Tiempo de Retención de Sólidos) que determina el tamaño del digestor. Sin embargo, en los reactores que promueven la retención de sólidos y microorganismos, el TRS no es un parámetro muy usado para definir la operación del digestor. En términos de operación de digestores a gran escala, el problema crítico es para determinar la cantidad de alimentación que puede ser agregada al digestor por unidad de tiempo, no la cantidad de agua que es retenida por día. La operación del digestor depende en mayor medida del TRS que del TRH.

La forma de calcular el TRH es mostrada a continuación en la ecuación 2.7.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad 2.7$$

Donde

TRH: Tiempo de retención hidráulica en días.

V: Volumen del reactor en m<sup>3</sup>

Q: Gasto en m<sup>3</sup>/día

### 2.3.1.2 TAMAÑO DEL DIGESTOR Y DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS

Para decidir el tamaño correcto y el diseño apropiado para una planta generadora de biogás, deben considerarse cuidadosamente algunos puntos, además es necesario tener datos correctos sobre los cuales basar el diseño y tamaño.

Para especificar el tamaño de una planta debe determinarse:

1. Tamaño del digestor

2. Tamaño del colector de gas

### 3. Tamaño de la tubería para gas

El tamaño de cada uno de éstos depende de factores diferentes e independientes entre sí. El tamaño del digestor debe ser capaz de permitir el manejo adecuado de la cantidad de materia prima suministrada procurando que no sea menor de lo requerido para evitar que el digestor trabaje sobrecargado de materia orgánica, lo cual afecta la producción de gas, disminuyendo gradualmente hasta frenarse por completo. Además una sobrecarga en el digestor causa abundante espuma sobre la superficie del material, producida por materia semidigerida. En caso de que el digestor se opere muy abajo de la capacidad para la cual fue diseñado, presentará una constante y considerable pérdida de nitrógeno.

Por otra parte, el empleo de un digestor más grande del necesario resulta ante todo costoso en su construcción, y debe recordarse que todo aumento excesivo del costo hace la planta incosteable.

La ecuación siguiente puede utilizarse para determinar el tamaño o volumen del digestor.

$$VD = (D + CS) \times \frac{TRH}{365} \quad \text{2.8}$$

Donde:

VD: Volumen del digestor (m<sup>3</sup>)

D: Desecho (m<sup>3</sup>/año)

CS: Co-sustrato (m<sup>3</sup>/año)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (días)

365 (días)

La ecuación siguiente puede utilizarse para determinar el diámetro del digestor:

$$D(m) = 2 \times \sqrt{\frac{V}{A \times 3.1416}} \quad \text{2.9}$$

Donde

V=Volumen del digestor en (m<sup>3</sup>)

A= Altura del digestor (m)

La recolección del biogás, o su almacenamiento puede efectuarse de dos formas diferentes: La primera, mediante el domo colector instalado en el digestor, en cuyo caso el colector de gas debe diseñarse con capacidad suficiente para recibir por lo menos el 50% de la producción diaria de gas. La segunda manera es mediante la construcción de un tanque almacén separado del digestor. Debe instalarse una tubería adecuada para llevar el biogás desde el digestor hasta el tanque de almacenamiento en un caso, o bien hasta el lugar de consumo cuando no se considera su almacenamiento. La tubería poseerá el diámetro conveniente para evitar en lo posible, las caídas de presión.

La ecuación siguiente puede utilizarse para determinar el tamaño o volumen del tanque de almacenamiento del biogás.

$$VG = PG \cdot 20\% \cdot 2.10$$

Donde:

VG= Volumen del tanque de almacenamiento de biogás en m<sup>3</sup>

PG= Producción diaria de biogás en  $\frac{m^3}{día}$

### 2.3.1.3 SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO

Para lograr que el sistema tenga un sistema de seguridad adecuada se debe saber que, el biogás puede causar explosiones provocadas por el metano, su componente principal, el cual tiene los siguientes niveles de explosión (proporción en volumen con aire).

Nivel bajo de explosión 5.4%

Nivel alto de explosión 13.9%

Tomando en cuenta que en la composición del biogás, el metano está entre 60 y 70%, los niveles de explosión se elevan a:

Nivel bajo de explosión 9.0%

Nivel alto de explosión 23.0%

En estas condiciones, el biogás necesita una temperatura entre 650 y 750 °C para inflamarse o explotar, la cual puede ser alcanzada al encender un fósforo o al producir chispas por choques metálicos.

La densidad y su composición son también factores importantes en la seguridad, pues tomando en cuenta que la densidad del aire es de 1.293 g/l, la del metano 0.27 g/l y la del bióxido de carbono 1.98 g/l; y considerando una composición entre 30 y 40% de CO<sub>2</sub>, la densidad del biogás llega a 1.09 g/l lo que lo hace más ligero que el aire y puede diluirse fácilmente, perdiendo peligrosidad. Si la proporción de CO<sub>2</sub> rebasa 45.7%, el biogás se vuelve más denso que el aire subiendo su límite de peligrosidad por varios factores:

-El biogás puede ser asfixiante cuando hace que el oxígeno del aire baje a 17.3%, y si llega a 13% es positivamente sofocante;

-Si en la composición del biogás se tiene CO en proporción de 0.1%, es fatal en 4 h y si la proporción de H<sub>2</sub>S es de 0.6% es fatal en menos de media hora.

Por todas estas razones hay que tener precauciones similares a las que se tienen con el gas doméstico (butano-bajo propano):

-Al llenar tanques de biogás, éstas deben estar libres de oxígeno al igual que las líneas de transporte de biogás;

-Se deben realizar pruebas de fugas con agua jabonosa;

-Cuidar que no haya flamas, brasas, cigarrillos encendidos o calzado con clavos capaces de producir chispas en las áreas de compresión y carga;

-Los locales donde se maneje biogás deben ser de preferencia altos y ventilados;

-Los extinguidores deben ser de CO<sub>2</sub> y polvo ABC.

En cuanto al tema de mantenimiento se puede decir que es esencial que todos los componentes del sistema estén libres de fugas de biogás para eliminar pérdidas del mismo, y acumulación de biogás combustible en áreas confinadas, por motivos de seguridad, así como la entrada de aire al sistema lo que inhibe el proceso. Por lo tanto, se deberán efectuar inspecciones rutinarias por lo menos una vez por semana, para asegurar que no se presente este tipo de fallas, y permitir su corrección en el momento de ser detectadas.

En las ocasiones en que se vacía el digestor, se deberá efectuar una inspección cuidadosa del interior del mismo para detectar y corregir problemas de construcción que pudieran haberse presentado. Se deberá también aplicar un recubrimiento a base de pintura anticorrosiva a todas las partes metálicas internas del sistema, así como a las tuberías y conexiones en constante contacto con el biogás.

En digestores tipo hindú con campana metálica, es recomendable quitar ésta por lo menos una vez al año, para pintarla como se ha mencionado, y al mismo tiempo extraer las "natas" que se han formado en la superficie de la fase líquida.

### 2.3.2 TIPOS DE DIGESTORES

Existen diversos tipos de digestores tipo anaerobio:

#### 2.3.2.1 DIGESTORES DE UNA ETAPA

En este tipo de digestores el proceso se realiza en un solo lugar o reactor, e incluyen:

a. Lagos de estabilización: Rellenos sanitarios y fosas sépticas que generalmente son empleados para resolver problemas de tipo sanitario y no con propósitos energéticos.

b. Digestores convencionales: Son tanques para desechos en los que tiene lugar la estabilización biológica y la separación sólido- líquido. Los tiempos de retención son grandes de 15 a 30 días para líquidos y de 40 a 60 para sólidos; operan a bajas velocidades de carga; existen dos diseños básicos: El hindú y el chino; en el primero los domos son flotantes y las paredes y el fondo planos;

en el segundo el domo está fijo, no tiene paredes separadoras en el fondo del digestor, sus paredes y fondo son cóncavos.

c. Digestores tipo bolsa: Son originados en Taiwán, están contruidos totalmente con materiales plásticos, son compactos y ligeros, de fácil ensamble y operación, con geometría cilíndrica e instalados con el eje en posición horizontal.

d. Digestores de alto rendimiento: Incluyen un mecanismo para agitar la mezcla (para un mayor contacto entre bacterias y sustrato) y algún medio de calentamiento para asegurar una temperatura estable optima para la reacción; tiene tiempos de retención menores que los convencionales (Concheiro y Rodríguez, 1985).

#### 2.3.2.2 DIGESTORES DE DOS ETAPAS

Consisten en un primer digestor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un digestor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Si la primera etapa consiste en un digestor discontinuo, el liquido tratado en la segunda es el obtenido por precolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo digestor. Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: Frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, excremento de ganado vacuno, etcétera (Castells, 2005).

#### 2.3.2.3 DIGESTORES DE DOS FASES

Están formados por dos digestores de alto rendimiento conectados en serie, uno para la fase de acidogénesis (producción de ácido) y otro para la fase de metanogénesis (producción de metano). Su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único digestor convencional. La separación de los dos tipos de bacterias se logra agregando inhibidores tales como oxígeno, nitratos, sulfatos, metales pesados, etcétera, con envenenamiento potencial, que aporta un control cinético que consiste en controlar el tiempo de retención de cada digestor, el cual será inferior en el primero, debido a las altas tasas de

crecimiento de las bacterias acidogénicas, o mediante diálisis (proceso de difusión selectiva a través de una membrana que permite el paso de ciertos cuerpos y evita el de otros) (Castells, 2005; Concheiro y Rodríguez, 1985).

#### 2.3.2.4 DIGESTORES DE CONTACTO ANAEROBIO

a. Con recirculación de sólidos: Una fracción de los sólidos que llegan al segundo tanque de un digestor de dos etapas se recirculan hacia el primero. Así se reduce el volumen requerido en el segundo (el tiempo de retención de líquidos es menor que el de los sólidos).

b. Biomix (Biomechanics Ltd.): Consiste en una bomba tipo termosifón para mezclar el digestor y controlar la formación de nata, y un cambiador de calor para elevar la temperatura a 35° C. Cuenta con un enfriador-separador por gravedad que separa los sólidos por choque térmico y una sedimentación posterior. El líquido reduce su temperatura de 35 a 25°C en el enfriador en 30 segundos, cortando temporalmente la actividad microbiana y la producción de biogás (Concheiro y Rodríguez, 1985).

#### 2.3.2.5 DIGESTORES DE PELÍCULA ADHERIDA O FILTRO ANAEROBIO

Este digestor consta de una capa de piedras o arena a la que se adhieren los microorganismos, aumentándose con ello la zona de actividad biológica: Los tiempos de retención son pequeños y la eliminación de sólidos suspendidos alta por lo que pueden presentar problemas de taponamiento (Concheiro y Rodríguez, 1985). Este sistema ha estado extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y para residuos ganaderos (Castells, 2005).

#### 2.3.2.6 DIGESTORES DE FLUJO PISTÓN

También son conocidos como canales fermentadores, estos consisten en un tubo o tanque estrecho, largo, alimentado por un extremo. Los desechos avanzan hacia el otro extremo por gravedad; usualmente se aplican a desechos con alto contenido de sólidos, los tiempos de retención son largos de 30 a 50 días (Concheiro y Rodríguez, 1985).

El hecho de que la tasa de crecimiento de microorganismos sea más elevada a la entrada del digestor, donde la concentración del sustrato también es elevada, hace que la concentración media en el digestor sea superior a la correspondiente a la de un digestor convencional, o en todo caso superior a la de salida, con lo cual el tiempo de retención será inferior. Este tipo de digestor ha sido aplicado a diferentes tipos de residuos orgánicos, como a los residuos orgánicos urbanos, excremento porcino y bovino. Una de las dificultades que presenta es la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal (Castells, 2005).

#### 2.3.2.7 DIGESTOR DE LECHO DE LODO

En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido (biomasa) - líquido/biogás. El diseño más común es el reactor anaerobio de de lodos de flujo ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket UASB por sus siglas en inglés), el cual está siendo extensamente aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria (Castells, 2005).

### 2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DIGESTORES SEGÚN EL TIPO DE ALIMENTACIÓN

#### 2.3.3.1 DIGESTOR DE LLENADO INTERMITENTE

El tipo de digestor más sencillo es simplemente un contenedor cerrado, que puede ser un bote, tanque, o un hoyo en el suelo, que se carga con el material para descomposición. El recipiente a continuación se cierra herméticamente para que no le entre aire. Hay que encontrar algún medio para recoger el gas que se produce; la forma más sencilla es dejar flotar un recipiente invertido sobre la mezcla de descomposición, que se elevará a medida que se llene de gas: Este puede luego extraerse por medio de un grifo o un tubo. Aunque son muy sencillos y necesitan poca atención una vez que ha empezado el proceso de descomposición, este tipo de digestores de llenado intermitente tiene algunos inconvenientes.

Hace falta mucho trabajo para cargarlo y para retirar el lodo una vez terminada la descomposición. Durante las semanas que tiene lugar la descomposición cambia el ritmo de producción de gas, alcanzando el máximo al cabo de unos diez días y reduciéndose luego a un nivel menor que puede mantenerse durante dos o tres meses más. Para asegurar un nivel continuo y constante de producción de gas en este tipo de recipientes, es necesario tener por lo menos dos unidades, y lo ideal serían cinco o seis funcionando simultáneamente pero en diferentes etapas cada uno, para que mientras uno se vacía y se vuelve a llenar, otro esté produciendo al máximo (Steadman, 1978).

En cuanto al tiempo de retención de los desechos de este tipo de digestores, se recomienda reducirlo, calentando y/o agitando el digestor.

#### 2.3.3.2 DIGESTOR DE LLENADO CONTINUO

Este digestor se rellena continuamente con pequeñas cantidades de alimentación al tiempo que el lodo final se saca ininterrumpidamente por el otro extremo del recipiente. Éste puede tener la forma de un contenedor vertical único, con tuberías por las que se introduciría el material nuevo y se extraería el lodo final. En ocasiones puede haber el inconveniente de que se extraiga antes de tiempo materia no totalmente descompuesta, de que la descomposición no sea equilibrada o de que se produzcan remolinos dentro del material en descomposición que impidan también un proceso continuo y equilibrado. Se ha adoptado un mecanismo que evita en parte estos problemas, consistente en dividir el recipiente en dos cámaras por medio de un muro central, de modo que la descomposición preliminar se produzca en uno de los lados, y se pase luego al otro. Así quedan separadas las dos etapas de descomposición, y el material nuevo se introduce sólo por un lado, y el lodo final se extrae sólo del otro (Steadman, 1978).

#### 2.3.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN

Los factores más importantes que condicionan el éxito del proceso de descomposición son la temperatura, el pH y la composición química de los materiales empleados, sobre todo la proporción de sólidos-líquidos y de nitrógeno-carbono presentes (Steadman, 1978).

#### 2.3.4.1 PROPORCIÓN DE CARBONO-NITRÓGENO

Las bacterias que intervienen en el proceso de descomposición consumen carbono 30 a 35 veces más rápidamente que nitrógeno (Steadman, 1978). Por lo tanto, la relación proporcional de ambas sustancias debe ser alrededor de 20:1 a 30:1 en la materia prima (Concheiro y Rodríguez, 1985). Si hay demasiado carbono, el proceso es más lento. Si por lo contrario, existe nitrógeno en exceso, en el proceso este se perderá en forma gaseosa (como amoníaco,  $\text{NH}_3$ ), que reduce en gran medida el valor nutritivo del efluente final (Steadman, 1978).

#### 2.3.4.2 TEMPERATURA

Dentro de un margen bastante amplio de temperaturas, siempre se producirá cierta descomposición de 0°C hasta 69°C, pero el ritmo de descomposición y de producción de biogás es bastante sensible a la temperatura y por lo general el proceso es más rápido a mayor temperatura. Por debajo de los 15°C el proceso prácticamente se detiene. Hay dos intervalos de temperatura dentro de los cuales, la descomposición se desarrolla en las mejores condiciones: Desde los 30°C hasta los 40°C y desde los 50°C hasta los 60°C. En este último intervalo de temperaturas actúa una serie distinta de bacterias, las "termofílicas", pero éstas son muy sensibles a los cambios ambientales, y su acción resulta en la formación de un lodo de bajo valor fertilizante. Por lo general parece más conveniente que el proceso se realice a unos 32-35°C (Steadman, 1978).

Según las temperaturas a las que ocurren, los procesos de digestión pueden clasificarse de la forma que indica la Tabla 2.10.

#### 2.3.4.3 ACIDEZ Y ALCALINIDAD

En lo que respecta al pH, una acidez excesiva impide la descomposición y lo mejor es mantener el pH entre los 7.5 y los 8.5, es decir un poco por encima del neutro (7). Durante las primeras fases de descomposición, cuando se produce mucho  $\text{CO}_2$ , formando ácido carbónico en solución, y más tarde cuando se producen los ácidos orgánicos, el pH puede descender a 6 ó menos. Pero como estos ácidos se consumen al producirse el metano, el pH aumenta de nuevo, y la mezcla se hace menos sensible al ácido o álcali adicional. Es decir se auto-equilibra o amortigua. En la fase inicial

la mezcla es propensa a convertirse en excesivamente ácida si se agrega con demasiada rapidez la alimentación, y si esto ocurre debe frenarse el ritmo. Si el pH es demasiado alto a causa de la alcalinidad excesiva de la materia prima, poco más se puede hacer que esperar que el CO<sub>2</sub> producido reduzca poco a poco el grado de acidez (Steadman, 1978).

Tabla 2. 11 Clasificación de los procesos de digestión, en base a la temperatura a la que ocurren.

PROCESO	RANGO DE TEMPERATURA EN EL QUE OCURRE	REFERENCIA
Sicrofílicos	10 - 25°C	(Bailie, 1979)
Mesofílicos	32 - 45°C	(Concheiro y Rodríguez, 1985)
	20 - 40°C	(Braunstein, 1981)
	30 - 37°C	(Bailie, 1979)
	30 - 40°C	(Steadman, 1978)
	5 - 40°C	(Jarabo y Elortegui, 2000).
Termofílicos	45 - 50°C	(Concheiro y Rodríguez, 1985)
	45 - 65°C	(Braunstein, 1981)
	55 - 60°C	(Bailie, 1979)
	50 - 60°C	(Steadman, 1978)
	40 - 65°C	(Jarabo y Elortegui, 2000).

#### 2.3.4.4 RELACIÓN PROPORCIONAL DE SÓLIDOS A LÍQUIDOS

El porcentaje de sólidos recomendable en cualquier mezcla en descomposición está entre el 7 y el 9%. Es una proporción algo mayor que la habitual en los productos de alcantarillado de cualquier ciudad (5% de sólidos) que van muy diluidos en el agua de desagüe. Pero es menor que la proporción de materia sólida en el estiércol animal y en los desperdicios vegetales (18% de materia sólida en las heces frescas de vaca y de un 30 a 40% en desperdicios vegetales), que deberán mezclarse con agua en cantidad apropiada antes de arrojarse en los recipientes para su descomposición. La “materia sólida” a que nos estamos refiriendo incluye solo la materia orgánica sólida “volátil” que puede descomponerse, y se calcula por su peso en seco (Steadman, 1978).

#### 2.3.4.5 PREPARACIÓN Y MEZCLA DE LOS MATERIALES

Conviene tener un depósito separado para hacer la mezcla previa de los materiales, ya que en la mayoría de los casos será necesario diluirlos un poco en agua. La materia vegetal, sobre todo para los digestores de funcionamiento continuo, también deberá cortarse en trozos no mayores de 2-3 cm. Por regla general, cuanto menores sean los trozos, más rápida será la descomposición. En los residuos vegetales suele haber bastante cantidad de material leñoso.

#### 2.3.4.6 AGITACIÓN Y MEZCLADO

Hay diferentes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión:

- a. Mezclado y homogenizado del substrato de alimentación con el substrato en digestión
- b. Distribución uniforme de calor para mantener una isoterminia suficientemente correcta
- c. Evita la formación de espumas o la sedimentación
- d. Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el substrato

La agitación puede ser mecánica o neumática (burbujeo de gas recirculado a la presión adecuada). En todo caso nunca debe ser violenta ya que podría destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable (Castells, 2005).

#### 2.3.4.7 TIEMPO DE RETENCIÓN

El tiempo de retención es el tiempo durante el cual los substratos están dentro del digestor. El tiempo de retención requerido para la producción óptima del biogás depende de la temperatura. Para la gama de temperaturas psicrófila se requiere un tiempo de retención de 40-100 días, para la gama mesófila 25-40 días, y para la gama termófila se requieren de 15-25 días.

### 2.3.5 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJA CONCENTRACIÓN

La digestión de sólidos en baja concentración es un proceso biológico en el cual se fermentan los residuos orgánicos en concentraciones de sólidos iguales que el 4-8 %. Este proceso se usa para producir gas metano a partir de residuos humanos, animales, agrícolas y a partir de los RUO. Una de las desventajas del proceso de digestión de sólidos en baja concentración, tal como se aplica a los residuos sólidos, es que se deben añadir considerables cantidades de agua a los residuos para que el contenido en sólidos llegue al rango requerido. La adición de agua produce un lodo digerido muy diluido, que hay que deshidratar antes de su evacuación (Tchobanoglous y col., 1994 b).

#### 2.3.5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Hay dos pasos básicos implicados cuando se utiliza el proceso de digestión de sólidos en baja concentración para producir metano a partir de los RUO. El primer paso implica la adición de humedad y de nutrientes, la mezcla, el ajuste de pH hasta aproximadamente 6.8, y el calentamiento de la masa húmeda entre 55 y 60° C. La digestión se lleva a cabo dentro de un digester de flujo continuo cuyo contenido se mezcla completamente. En la mayoría de las operaciones el contenido de humedad y los nutrientes requeridos se añaden a los residuos que se van a procesar, en forma de fangos de aguas residuales o de estiércol, quizás también tengan que añadirse nutrientes adicionales. Como la formación de espuma y de cortezas ha causado problemas en la digestión de los RUO, una mezcla adecuada es de una importancia fundamental en el diseño y funcionamiento de los digestores.

El segundo paso del proceso implica la captura, almacenamiento y, si es necesario, la separación de los componentes gaseosos. Otra tarea que hay que llevar a cabo es la deshidratación de los lodos digeridos y producidos por la digestión. Por lo general, el procesamiento del lodo digerido producido por la digestión, es un proceso muy caro que raras veces se utiliza (Tchobanoglous y col., 1994 b).

### 2.3.5.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO

Aunque el proceso de digestión de los RUO no se ha desarrollado completamente, en la Tabla 2.12 se resumen algunas de las consideraciones de diseño más importantes para el proceso de digestión de sólidos en bajas concentraciones.

### 2.3.6 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN ALTA CONCENTRACIÓN

La digestión de sólidos en alta concentración es un proceso biológico en el que se produce la fermentación con un contenido de sólidos total de aproximadamente 22 % ó más. La digestión de sólidos en alta concentración es una tecnología relativamente nueva, y su aplicación para la recuperación de energía a partir de los RUO todavía no se ha desarrollado completamente (Cecchi y col., 1988; Chynoweth y col., 1990; Jewell, 1979; Wujcik y Jewell, 1980).

Dos ventajas importantes que tiene el proceso de digestión de sólidos en alta concentración son: Más bajos requisitos de agua y una tasa más alta de producción de biogás por unidad de volumen del tamaño del digester. La mayor desventaja de este proceso es que de momento (1992) hay una limitada experiencia disponible en el funcionamiento a escala real.

#### 2.3.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Los pasos descritos para la digestión de sólidos en baja concentración también se aplican en el proceso de digestión de sólidos en alta concentración. La diferencia más importante se produce en el final del proceso, cuando se requiere menos esfuerzo para deshidratar y evacuar los lodos digeridos.

#### 2.3.6.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO

Aunque el proceso de digestión de sólidos en alta concentración no se ha desarrollado completamente, en la Tabla 2.13 se resumen algunas importantes consideraciones de diseño.

### 2.3.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJAS Y ALTAS CONCENTRACIONES PARA LOS RUO.

En la Tabla 2.14, 2.15, 2.16, se comparan las características operacionales de los procesos de digestión en baja y alta concentración.

### 2.3.8 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN

#### 2.3.8.1 BIOGÁS

Gas que se produce mediante la descomposición anaerobia, es una mezcla cuyo principal constituyente es el metano ( $\text{CH}_4$ ), presente en una porción que varía aproximadamente entre el 54 y el 70%. El siguiente componente mayor es el  $\text{CO}_2$ , que entra en una proporción del 27 al 45%; y en pequeñas cantidades, existe nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, y rastros de mercaptano y de ácido sulfhídrico. Estos últimos y especialmente el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) son los responsables del olor del gas (Steadman, 1978).

La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En la Tabla 2.17 se muestran valores medios de composición del biogás en función del sustrato utilizado (Castells, 2005).

Tabla 2. 12 Consideraciones importantes de diseño para la digestión de sólidos en bajas concentraciones de los RUO (Tchobanoglous y col., 1994 b).

COMPONENTE DE RESIDUOS	OBSERVACIONES
Tamaño del material	Los residuos que se van a digerir deben triturarse hasta un tamaño que no interfiera en el funcionamiento eficaz de las operaciones de bombeo y mezcla.
Equipamiento de mezclado	Para lograr resultados óptimos, para mantener homogeneidad en la temperatura y para evitar la acumulación de capas de impurezas, se recomienda un mezclado mecánico.
Porcentaje de residuos sólidos mezclados aguas residuales.	Aunque se han utilizado unas cantidades de residuos que varían desde el 50 al 90%, el 60% parece ser una proporción razonable.
Tiempo medio de retención hidráulica	El tiempo mínimo esta en el rango de tres a cuatro días. Utilizar de 10 a 20 días para el diseño, o basar el diseño en resultados de estudios piloto.
Tasa de carga	De 0.6 a 1.6 kg/m <sup>3</sup> día. Actualmente no está bien definido. Se ha informado de tasa significativamente más altas.
Concentración de sólidos	Igual o menor que del 8-10 % (del 4-8 %, típico).
Temperatura	De 30 a 38°C para un reactor mesofílico y entre 55 y 60°C para un reactor termofílico.
Destrucción de residuos sólidos volátiles	Depende de la naturaleza de las características de de los residuos. Varía aproximadamente desde el 60 al 80 %; el 70 % puede utilizarse para propósitos de estimación.
Sólidos totales destruidos	Varía desde el 40 al 60 %, según la cantidad de material inerte originalmente presente.
Producción de gas	De 0.5 a 0.75 m <sup>3</sup> /kg de sólidos volátiles destruidos, CH <sub>4</sub> =55 %, CO <sub>2</sub> = 45 %

Tabla 2. 13 Consideraciones importantes de diseño para la digestión anaerobia de sólidos en altas concentraciones de los RUO (Tchobanoglous y col., 1994 b).

COMPONENTE DE RESIDUOS	OBSERVACIONES
Tamaño del material	Los residuos que se van a digerir deberán triturarse hasta un tamaño que no interfiera el funcionamiento eficaz de los mecanismos de alimentación y descarga.
Equipamiento de mezclado	El equipamiento de mezclado dependerá del tipo de reactor que se vaya a utilizar.
Porcentaje de residuos sólidos mezclados con lodos	Depende de las características de los lodos.
Tiempo de retención	Utilizar de 20 a 30 días para el diseño o basar el diseño en resultados de estudios piloto.
Tasa de carga basada en sólidos volátiles biodegradables (SVB).	De 6 a 7 kg/m <sup>3</sup> día. Actualmente no está bien definido. Se ha informado de tasas significativamente más altas.
Concentración de sólidos	Del 20 al 35 % y del 22 al 28 %, típico.
Temperatura	De 30 a 38 °C para un reactor mesofílico y en 55 y 60 °C para un reactor termofílico.
Destrucción de SVB	Varía aproximadamente desde el 90 al 98 % según el tiempo bruto de retención y la tasa de carga de SVB.
Sólidos totales destruidos	Varía según el contenido de lignina del sustrato.
Producción de gas	De 0.625 a 1.0 m <sup>3</sup> /kg de sólidos volátiles biodegradables destruidos. (CH <sub>4</sub> = 50 %; CO <sub>2</sub> = 50 %).

Tabla 2. 14 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 1).

PARÁMETRO DE DISEÑO Y/O OPERACIÓN	OBSERVACIONES	
	SÓLIDOS EN BAJAS CONCENTRACIONES	SÓLIDOS EN ALTAS CONCENTRACIONES
Diseño de reactor	Se han utilizado reactores de mezcla completa en sistemas a gran escala para los RUO. Se utilizan ampliamente los reactores de flujo pistón para otros materiales orgánicos, especialmente estiércol de vaca.	Se han estudiado experimentalmente reactores de mezcla completa, flujo pistón y de cargas discontinuas. Ninguno de estos tipos de reactores han sido utilizados comercialmente para el procesamiento de RUO.
Contenido de sólidos	Del 4 al 8 %	el 22 al 32 %
Volumen de reactor	Se requiere un gran volumen de reactor por volumen unitario de residuos orgánicos.	Se requiere un volumen de reactor mucho más pequeño para el mismo volumen de residuos orgánicos que en el proceso de digestión de sólidos en bajas concentraciones.
Adición de agua	Se requiere un gran volumen de agua para incrementar el contenido en humedad de los RUO.	El requisito de agua es mucho menor, por la alta concentración en sólidos.
Tasa de carga orgánica	Tasas de carga orgánica relativamente bajas por unidad de volumen de reactor	Tasas de carga orgánica relativamente altas por unidad de volumen de reactor.
Tasa de producción de gas	Se ha informado de tasas máximas de producción de gas de hasta 2 volúmenes por volumen activo de reactor	Se han logrado tasas máximas de producción de gas de hasta 6 volúmenes por volumen activo de reactor.

Tabla 2. 15 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 2).

PARÁMETRO DE DISEÑO Y/O OPERACIÓN	OBSERVACIONES	
	SÓLIDOS EN BAJAS CONCENTRACIONES	SÓLIDOS EN ALTAS CONCENTRACIONES
Tasa de sedimentación	La tasa de sedimentación es baja debido al alto contenido de agua.	Se puede lograr una tasa de sedimentación significativamente más alta en el mismo período de retención comparándola con la de la digestión de sólidos en bajas concentraciones.
Mecanismos para la alimentación y descarga de efluente	Se han utilizado bombas de todos los tipos.	Como ésta es una tecnología relativamente nueva, no están definidos los mecanismos para la alimentación y descarga de efluentes del reactor anaerobio. Se han utilizado transportadores en espirales y bombas para sólidos en altas concentraciones.
Problemas de toxicidad	Los problemas de toxicidad en un digestor de sólidos en bajas concentraciones son menos severos debido a la naturaleza diluí-da de los materiales de residuos orgánicos.	La toxicidad de sales y metales pesados es más común en la digestión anaerobia de sólidos en altas concentraciones debido a las grandes concentraciones de estos compuestos y elementos químicos. La toxicidad del amoníaco es más problemática con relaciones C/N bajas menores de 10 a 15.

Tabla 2. 16 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 3).

PARÁMETRO DE DISEÑO Y/O OPERACIÓN	OBSERVACIONES	
	SÓLIDOS EN BAJAS CONCENTRACIONES	SÓLIDOS EN ALTAS CONCENTRACIONES
Problemas de lixiviados	Debido al alto contenido en agua, el efluente estabilizado puede generar un problema de lixiviados.	El efluente de un digestor de sólidos en altas concentraciones normal-mente contiene del 25 al 30 % de sólidos, lo que minimiza el potencial de generación de lixiviados.
Deshidratación de efluente	Se requieren instalaciones grandes y costosas para separar sólidos. Para la evacuación final debería tratarse también el agua separada.	Es adecuado un equipamiento de deshidratación barato.
Estado tecnológico	No comercializado para la recuperación de energía a partir de los RUO. La utilización comercial de digestores anaerobios de sólidos en bajas concentraciones para la producción de energía a partir de residuos agrícolas está muy extendida.	No comercializado para la recuperación de energía a partir de los RUO.

Tabla 2. 17 Componentes del biogás en función del sustrato utilizado (Castells, 2005).

COMPONENTE	RESIDUOS GANADEROS	RESIDUOS AGRÍCOLAS	FANGOS DE DEPURADORAS	RESIDUOS MUNICIPALES	GAS DE VERTEDERO
METANO	50-80 %	50-80 %	50-80 %	50-70 %	45-60 %
DIÓXIDO DE CARBONO	30-50 %	30-50 %	20-50 %	30-50 %	40-60 %
AGUA	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
HIDRÓGENO	0-2 %	0-2 %	0-5 %	0-2 %	0-0.2 %
SULFURO DE HIDRÓGENO	0-1 %	100-700 ppm	0-1 %	0-8 %	0-1 %
AMONIACO	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0.1-1 %
MONÓXIDO DE CARBONO	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-0.2 %
NITRÓGENO	0-1 %	0-1 %	0-3 %	0-1 %	2-5 %
OXÍGENO	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0.1-1 %
CONSTITUYENTES EN CANTIDADES TRAZAS, COMPUESTOS ORGÁNICOS	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0.01-0.6 % (*)

(\*)Terpenos y esterés.

Biogás también se le denomina a los gases que se muestran en la Tabla 2.18.

Tabla 2. 18 Clasificación de biogás en base a la forma de producción (OECD/IEA, 2004).

TIPO DE BIOGÁS	FORMA DE PRODUCCIÓN
Gas de vertederos de basura	Digestión de los desechos orgánicos en vertederos de basura
Gas de lodo de aguas residuales	Fermentación anaerobia del lodo de aguas residuales
Otro biogás	Fermentación anaerobia de excremento animal, desechos de mataderos, cervecerías y otras industrias agroalimentarias

### 2.3. 8.1.1 VALOR DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS

El valor del gas como combustible depende del contenido de metano. El metano puro tiene mayor valor de combustión que el “gas-ciudad” normal, y el “biogás” puede tener un valor calorífico de unas 5,200 a 6,700 Kcal/m<sup>3</sup>. El gas butano y el gas propano tienen respectivamente 28,000 y 21,000 Kcal/m<sup>3</sup> (Steadman, 1978).

El biogás es poco tóxico, ya que contiene poca cantidad de monóxido de carbono. Se quema con una llama violeta, y puede arder continuamente si la proporción de metano a aire es de 1:20 o menos.

### 2.3.8.1.2 ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS

Las variaciones de producción de gas en los digestores se amortiguan mediante depósitos de almacenamiento (gasómetros), que pueden ser de diversos tipos, y de baja, media o alta presión.

Gasómetros de baja presión: Entre los más utilizados están los de cúpula o campana flotante sobre depósito de agua, como el que muestra la en la Figura 2.6, que puede alcanzar volúmenes de almacenamiento importantes, aunque no suelen sobrepasar los 1500 m<sup>3</sup>. La presión normalmente no supera los 50 mbar. Otra opción también muy utilizada son los gasómetros hinchables, como el mostrado en la Figura 2.7 (Castells, 2005).

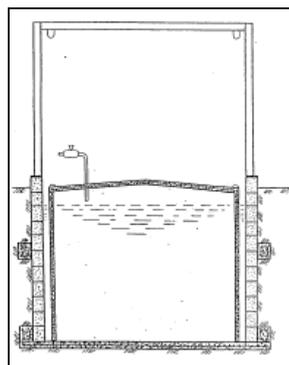


Figura 2. 6 Gasómetro de baja presión (Guevara, 1996).



*Figura 2. 7 Gasómetro inchable*

#### 2.3.8.1.3 USO DEL BIOGÁS

El biogás generado en el proceso de digestión puede ser valorizado de diferentes formas, tal y como se muestra en la Figura 2.8. Los requerimientos de depuración variarán también en función del uso del gas, como se muestra en la Figura 2.9 (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN FUNCIÓN DE SU USO

La necesidad y tipo de tratamiento depende de la composición del biogás y del uso que se le vaya dar. El biogás suele contener ácido sulfhídrico que puede ser corrosivo si hay superficies metálicas. También puede contener hidrocarburos. El gas fluye de los digestores en forma saturada de vapor de agua, que también es perjudicial para las instalaciones y es necesario eliminarlo. En otros casos será preciso concentrar el gas, eliminando el CO<sub>2</sub>, que puede suponer del 60 a 40% en volumen (Castells, 2005).

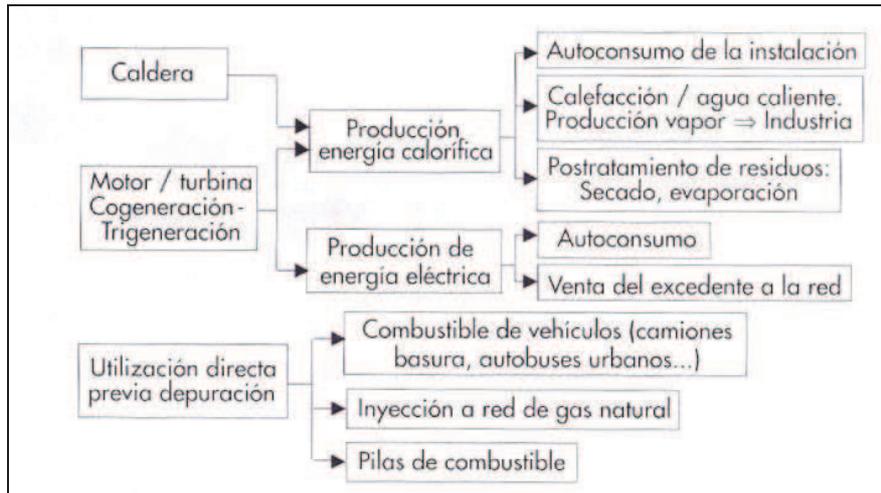


Figura 2. 8 Valoración del biogás (Castells, 2005).

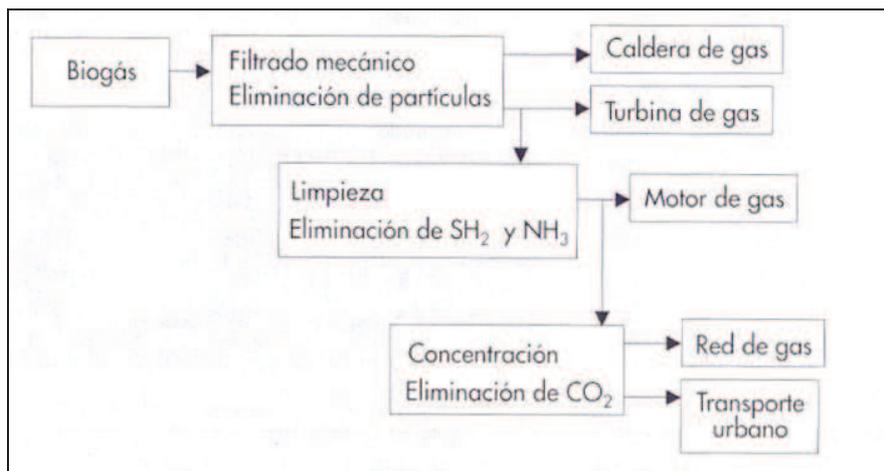


Figura 2. 9 Tratamientos de depuración del biogás de acuerdo a su uso (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.1 ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS

Se trata de métodos sencillos que se basan en el uso de rejillas metálicas, trampas de agua o combinaciones de ambas (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.2 DESHIDRATACIÓN CONDENSADORES

Este proceso se realiza debido a que el biogás normalmente se encuentra saturado de vapor de agua. La eliminación del agua se realiza mediante su condensación en trampas frías. Si la digestión se realiza a 35 °C, el biogás contiene aproximadamente 35 g H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>. La trampa fría o condensador aprovecha la diferencia de temperaturas entre el digestor y la temperatura ambiente exterior para condensar el agua de forma natural. Un condensador consiste en un depósito cerrado en cuyo interior se disponen mamparas metálicas en cuya superficie se produce la condensación. La eficiencia aumenta si se incrementa la superficie de contacto. El efecto de condensación se puede reforzar mediante instalaciones frigoríficas. También se pueden utilizar absorbentes químicos como soluciones de glicol, etileno o trietileno (*Castells, 2005*).

#### 2.3.8.1.4.3 ELIMINACIÓN DE H<sub>2</sub>S

El ácido sulfhídrico es un compuesto altamente corrosivo por lo que su concentración debe reducirse por debajo de los niveles aceptables, para proteger las instalaciones de gas, motores, calderas y turbinas.

Durante el proceso de digestión, en el que se mantienen condiciones reductoras, en presencia de compuestos azufrados en el medio, se desarrollan bacterias sulfato-reductoras que producen H<sub>2</sub>S, en proporciones que pueden llegar al 1 % en volumen. La eliminación de H<sub>2</sub>S del biogás se consigue por diferentes métodos, que básicamente se basan en una oxidación a azufre elemental, sólido. Se puede eliminar usando gran variedad de absorbentes en medio líquido u oxidantes en fase sólida. Los métodos que utilizan absorbentes líquidos son preferiblemente usados si es necesario eliminar también CO<sub>2</sub> para alguna aplicación. Los métodos de eliminación en seco son en general mejores si no es necesario eliminar CO<sub>2</sub> y son más económicos, sobretodo en pequeñas instalaciones. Los principales métodos se relatan a continuación (*Castells, 2005*).

##### 2.3.8.1.4.3.1 BIOLÓGICA

Se basan en la acción de unos organismos capaces de oxidar el sulfhídrico o los sulfuros a azufre elemental. La mayoría de los microorganismos utilizados pertenecen al género *Thiobacillus*. Debe

añadirse la cantidad estequiométricamente necesaria de oxígeno para oxidar todo el H<sub>2</sub>S presente, que dependiendo de la concentración está entre un 2 y 6% de aire en el biogás. A estas concentraciones no se producen problemas de auto inflamación.

El método más simple consiste en la adición de aire/oxígeno al espacio de cabeza del digestor o en el desgasificador. Los *Thiobacilli* crecen en la superficie del licor mezclado del digestor, donde encuentran los nutrientes necesarios, formando una costra amarilla. En función de la temperatura y las condiciones de operación la eliminación puede ser superior al 95%, llegando a concentraciones menores de 50 ppm de H<sub>2</sub>S. El mismo sistema puede realizarse en un tanque postdigestión o en un reactor biológico específico, permitiendo un mayor control del flujo de gases (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.2 BIOFILTROS O BIOSCRUBBER

Este tratamiento combina una torre de lavado de gas y un tanque de aireación. El biogás es introducido en un bioscrubber y es lavado con licor de fangos activos que procede de un tanque de aireación. El lodo conteniendo los sulfuros se recircula al tanque de aireación dónde el sulfuro se oxida a sulfato mediante bacterias sulfuro-oxidantes (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.3 POR ADICIÓN DE CLORURO DE HIERRO

La adición de cloruro de hierro bien en líquido dentro del digestor, bien en el sustrato antes de la alimentación, es un método altamente eficiente, pero económicamente poco ventajoso. El hierro reacciona con los sulfuros formando sulfuro de hierro que precipita. Es recomendable en sistemas con muy alto contenido en sulfuros. Las eliminaciones son altas, pero no se llega a niveles de depuración necesarios para el uso en vehículos (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.4 ÓXIDO DE HIERRO

La cantidad de sulfhídrico que se puede eliminar está estequiométricamente relacionada con la cantidad de hierro presente. El sulfhídrico reacciona con el óxido férrico para formar sulfuro

férrico. La reacción es ligeramente endotérmica, con una temperatura mínima de 12 °C. La temperatura óptima está entre 15 y 50 °C, y se requiere presencia de humedad, por lo que conviene que el biogás no esté demasiado seco, aunque tampoco saturado para condensaciones en el filtro que reducirían la superficie activa. En el proceso de regeneración se añade oxígeno para convertir el sulfuro de hierro en óxido férrico y azufre elemental. El proceso de regeneración debe estar bien controlado, ya que es un proceso exotérmico. Los filtros de hierro pueden ser regenerados de 3 a 5 veces, dependiendo de la cantidad de azufre eliminada. Normalmente se trabaja con dos lechos, uno en operación y el otro regenerándose (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.5 VIRUTAS DE MADERA CUBIERTAS DE ÓXIDO DE HIERRO

Gracias a la baja densidad de la madera se consigue una relación superficie-peso muy alta, optimizando el contacto y favoreciendo la reacción. La relación a obtener es del orden de 20 gramos de sulfhídrico por 100 gramos de virutas (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.6 PELLETS IMPREGNADOS DE ÓXIDO FÉRRICO

La densidad de los pellets es más alta que las virutas. La capacidad de carga es de 50 g de H<sub>2</sub>S por 100 gramos de pellets para concentraciones de H<sub>2</sub>S de 1,000 a 4,000 ppm.

Uso de columnas de adsorción, utilizando un material adecuado, tal como el carbón activo (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.7 FILTROS MOLECULARES

Los filtros moleculares se pueden usar para eliminar ácido sulfhídrico, mercaptanos, agua y otras impurezas. Consisten en compuestos de alúmina o sílice activada que tienen gran afinidad por moléculas polares. Proporcionan superficies activas muy altas y tienen tamaños de poros bien definidos, lo que permite la eliminación selectiva de las diferentes sustancias. El área superficial se puede regenerar haciendo pasar un gas caliente (200 a 315 °C) a través del lecho del reactor.

Este método se puede usar para eliminar agua y/o H<sub>2</sub>S a media o pequeña escala (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.3.8 MÉTODOS EN MEDIO LÍQUIDO

El ácido sulfhídrico puede ser absorbido de forma selectiva en gran variedad de soluciones acuosas. La absorción se lleva a cabo en un scrubber, equipado con un relleno que aumenta la superficie de contacto. Existen diversas tecnologías, pudiéndose utilizar diversas soluciones absorbentes. Si la instalación es bastante grande las soluciones pueden ser regeneradas, y el azufre recuperado para usos industriales. El proceso de absorción se lleva a cabo a bajas temperaturas y altas presiones. Para regenerar la solución normalmente se calienta la solución para disminuir la solubilidad y liberar el gas concentrado (azufre). El azufre puede entonces ser recuperado del gas concentrado mediante el proceso Claus. Los métodos en fase líquida resultan muy caros, tanto por el coste de inversión como por el consumo de compuestos químicos, por lo que tan solo es aplicable en instalaciones de gran tamaño (Castells, 2005).

#### 2.3.8.1.4.4 MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN DEL BIOGÁS Y ELIMINACIÓN DE CO<sub>2</sub>

Los métodos de lavado con soluciones acuosas para eliminar el H<sub>2</sub>S son también aplicables para la eliminación del CO<sub>2</sub>. Normalmente el biogás es presurizado y alimentado por la parte inferior de una columna empacada con una solución acuosa a contracorriente. Igualmente, el CO<sub>2</sub> se puede eliminar mediante filtros moleculares o procesos de membrana, que pueden separar selectivamente diferentes compuestos. Se puede utilizar una solución de yeso (sulfato cálcico hidratado) o hidróxido de calcio que fijan el CO<sub>2</sub> al burbujear el gas a través de la solución. El producto resultante, carbonato de calcio, puede tener aplicación como enmienda caliza. En general, no es justificable desde un punto de vista económico el uso de filtros de CO<sub>2</sub>, a no ser que el gas se vaya a comprimir a elevadas presiones para su uso en vehículos, con el objetivo de enriquecer su contenido en metano (Castells, 2005).

#### 2.3.8.2 LODO DIGERIDO

Aparte del gas producido, el proceso también arroja un efluente líquido, o lodo, que puede devolverse a la tierra como acondicionador y fertilizante. El lodo, es una suspensión negruzca, exenta de olores ofensivos, se sedimenta fácilmente y tiene un pH aproximadamente neutro. Tiene abundante nitrógeno en forma de amonio (NH<sub>4</sub>), así como fósforo, potasio, y sales

metálicas, todos los cuales son importantes para el crecimiento y nutrición de las plantas; también contiene materiales orgánicos no digeridos como proteínas, celulosa, grasas, etc (Steadman, 1978; Jarabo y Elortegui , 2000).

Se puede emplear en la horticultura hidropónica, es decir, en el cultivo de plantas en una solución nutritiva sin tierra. Puede emplearse también para cultivar algas, que pueden servir para alimentar el ganado, o emplearse también para alimentar a los pequeños insectos o invertebrados que comen los peces, o darse directamente como alimento, en sistemas de cría intensiva de especies tales como la carpa y tilapia (Steadman, 1978).