

## CAPÍTULO 3

### BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA

#### 3.1 Energía de la Biomasa

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa es aquella que se obtiene de productos y residuos animales y vegetales. Así, la energía contenida en la leña, los cultivos energéticos, el carbón vegetal, los residuos agrícolas, los residuos urbanos y el estiércol puede ser calificada como energía de la biomasa y clasificarse como formas primarias a los recursos forestales y como formas secundarias a los residuos forestales, agrícolas, ganaderos y urbanos.

Desde el punto de vista energético, la biomasa se puede aprovechar de dos maneras: (a) Quemándola para producir calor o (b) Transformándola en combustible (sólido, líquido o gaseoso) para su transporte y/o almacenamiento. La energía neta disponible en la biomasa por combustión es de alrededor de 8 MJ/kg para la madera verde, 20 MJ/kg para la materia vegetal seca en horno, 55 MJ/kg para el metano; en comparación con cerca de 23 a 30 MJ/kg para el carbón. La eficiencia del proceso de la conversión se determina dependiendo de cuánta energía real puede ser utilizada en forma práctica.

El potencial técnico de la bioenergía en México se estima entre 2,635 y 3,771 Petajoules al año. Del potencial estimado, un 40% proviene de los combustibles de madera, 26% de los agro-combustibles y 0.6% de los subproductos de origen municipal. Se estiman además 73 millones de toneladas de residuos agrícolas y forestales con potencial energético, y aprovechando los residuos sólidos municipales de las 10 principales ciudades para la generación de electricidad a partir de su transformación térmica, se podría instalar una capacidad de 803 MW y generar 4,507 MWh/año (Deublein y Steinhäuser, 2008).

#### 3.2 Conversión de la biomasa en energía

Para transformar a la biomasa se pueden llevar a cabo varios procesos. De manera genérica estos procesos son de cuatro tipos:

- **Físicos.** Estos son los procesos en los que se actúa físicamente sobre la biomasa e incluyen al triturado, astillado, compactado e incluso secado.
- **Químicos.** Estos son los procesos relacionados con la digestión química, generalmente mediante hidrólisis, pirólisis y gasificación.
- **Biológicos.** Este proceso ocurre por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.
- **Termoquímicos.** En este caso la transformación química de la biomasa ocurre al someterla a altas temperaturas (300°C - 1500°C).

### 3.2.1 Procesos termoquímicos

La gasificación puede definirse como un proceso de combustión incompleta del que, como producto principal se obtiene un gas combustible. El oxidante utilizado juega un papel importante en la composición del gas generado, en el caso del aire se genera el llamado gas pobre por su bajo poder calorífico (4 a 7 MJ/m<sup>3</sup>), como consecuencia del alto contenido en nitrógeno, mientras que en el caso del oxígeno o vapor de agua dan lugar al llamado gas de síntesis que tiene un poder calórico mayor (10 a 18 MJ/m<sup>3</sup>). La composición típica del gas de la gasificación de biomasa se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición del gas de la gasificación (Bernard y Gouzé, 2004)

Componente	Contenido (% en volumen)
Monóxido de carbono, CO	20-25
Hidrógeno, H	15-20
Metano, CH <sub>4</sub>	1-2
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	10-12
Nitrógeno, N	48-50

### 3.2.2 Procesos fisicoquímicos

El pellet es un tipo de combustible granulado alargado a base madera. Se realizan mediante prensado, la propia lignina hace de aglomerante. El pellet procede de los residuos de industrias forestales y agroforestales. Los pellets tienen varias ventajas respecto a la madera y otros combustibles fósiles ya que suelen ser más baratos y producen menos contaminantes (SO<sub>x</sub>, dioxinas).

Las briquetas de madera son productos desarrollados en base a serrín prensado que corresponde a una nueva forma de calefacción amigable con el medio ambiente. Su baja humedad permite una combustión eficiente, logrando bajas emisiones de contaminantes, ahorrando energía y ayudando a preservar el entorno más limpio.

En la fabricación de briquetas la primera operación común a todos los procesos es el corte y/o la trituración de los desechos combustibles. En la tecnología rural simple, donde los materiales que hay que preparar son ramas y paja, el mejor instrumento para cortarlos es el hacha de mano o el hacha de carpintero. Para la producción en gran escala se requieren diferentes instrumentos, como la máquina para cortar paja utilizada comúnmente por los agricultores.

La segunda operación consiste en el secado de los principales ingredientes combustibles. Cuando se aplica una tecnología simple, el secado debe realizarse sin utilizar combustible. Por lo tanto, la única opción real consiste en el secado natural en lugares bien ventilados protegidos de la lluvia. Este tipo de secado requiere mucho tiempo y en consecuencia los ingredientes básicos para la fabricación de briquetas deben prepararse con mucha anticipación (Mosey y Hughes, 1975).

En tercer lugar, se mezclan los varios tipos de desechos y materiales aglutinantes para obtener una consistencia y un valor calorífico óptimos. Si se dispone de lubricante para motores usado se puede añadir a los desechos, pero, aunque aumenta el valor calorífico de las briquetas, las hace desmenuzables. Por lo tanto, se debe añadir con mucha

precaución. En algunos casos, para dar plasticidad al material, es necesario añadir un aglutinante húmedo o, tratándose del papel, mojarlo antes de someterlo a presión para obtener briquetas.

La cuarta operación consiste en comprimir las briquetas, y la quinta en secarlas al aire libre, bajo techado. Con apego a las condiciones del material aglutinante y del secado, se requerirán varios días y varios meses para obtener briquetas secas. El secado aumenta considerablemente el valor calorífico de las briquetas y, por lo tanto, ahorra combustible. Por consiguiente, las briquetas deberán producirse con bastante antelación al momento previsto para su uso. En la Figura 3.1 se muestra el diseño de una línea de producción para la fabricación de briquetas a partir de desechos de madera (Mosey y Hughes, 1975).

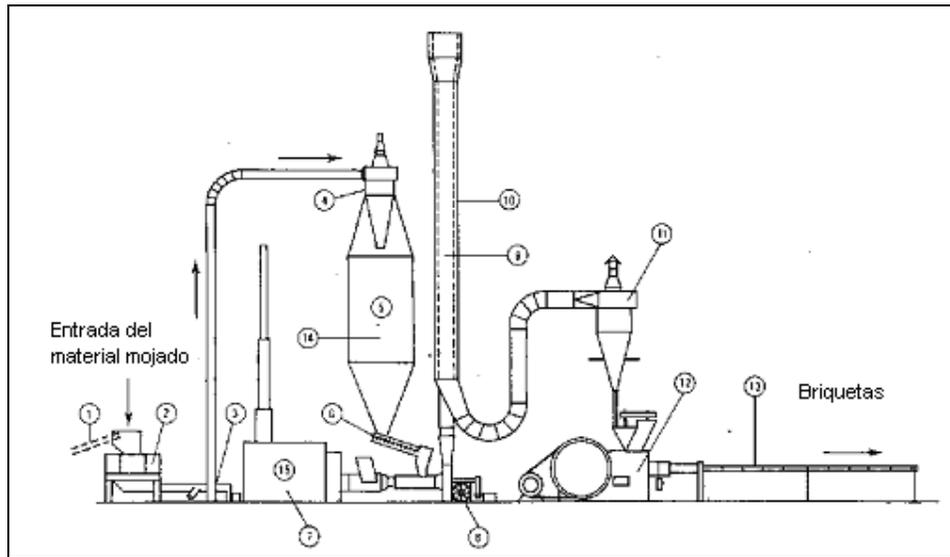


Figura 3.1 Línea de producción para la fabricación de briquetas (Mailleret y col., 2002)

1. Cinta transportadora. 2. Trituradora. 3. Ventilador. 4. Extractor de polvo. 5. Depósito para el material húmedo. 6. Descarga del depósito. 7. Horno para calentar las briquetas. 8. Ventilador. 9. Secador de suspensión. 10. Aislamiento. 11. Extractor de polvo. 12. Prensa para la fabricación de briquetas. 13. Línea de enfriamiento. 14. Material triturado húmedo. 15. Aire caliente.

En la mayoría de los países en desarrollo existen cantidades considerables de desechos de biomasa que podrían elaborarse mediante la compresión y la densificación. Por lo general se consiguen mejores resultados si se mezclan diversas clases de material con un aglutinante. El valor calorífico de los desechos biocombustibles bien secados y comprimidos es similar al de la leña. Sin embargo, el uso sin control de los desechos de la biomasa podría tener consecuencias ecológicas negativas para el suelo, como la disminución de la fertilidad. En la Tabla 3.2 se muestra la composición de diversos biocombustibles sólidos (Mosey y Hughes, 1975).

Tabla 3.2 Comparación de biocombustibles sólidos (Mosey y Hughes, 1975).

Composición	Valor calorífico bruto	Humedad	Cenizas	Valor calorífico neto	Observación
	kcal/kg	%	%	kcal/kg	
Madera seca de haya	4,554	8.0	0.3	4,224	Tipo de madera que casi nunca se encuentra en las zonas rurales pobres
Madera verde de abedul	3,308	42.9	0.25	2,889	Tipo de madera que se encuentra en las zonas rurales pobres de los países en desarrollo
Bolas de papel de desecho (de periódicos mojados)	4,143	6.9	2.9	8,325	Hechas a mano arden mejor si se añade ceniza de madera
Briquetas hechas de: 30-45% de polvo de carbón vegetal, 30-45% de ramas cortadas y 15-20% de estiércol	4,626	2.4	32.2	4,408	Comparables a la antracita de calidad media; elevado contenido de cenizas probablemente debidas a la arena del suelo
Briquetas hechas de: 25% de carbón vegetal, 25% de paja, 30% de ramas cortadas y 20% de estiércol	3,397	7.2	13.7	3,109	El menor porcentaje de polvo de carbón vegetal reduce la producción calorífica
Briquetas hechas de: 50% de paja y 50% de estiércol de vaca	3,898	5.4	9.5	3,599	Se pueden producir en cualquier lugar, pero con elevado contenido de estiércol; éste se puede utilizar mejor como fertilizante
Briquetas hechas de: 40% de paja, 40% de serrín y 20% de estiércol	3,561	9.2	14.0	3,266	Necesita un secado esmerado a causa del serrín
Briquetas hechas de: polvo de carbón vegetal con arcilla de aglutinante	1,064		73.0	975	El elevado contenido mineral disminuye el valor calorífico y produce mucha ceniza

La producción de biocombustibles líquidos, tales como, el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte. El uso extenso del etanol en Brasil ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente factibles en gran escala. La producción de biocombustibles en los EEUA. y Europa (etanol y biodiesel ) está aumentando, siendo la mayoría de los productos utilizados en combustible mezcla, por ejemplo E20 está compuesto por 20% de etanol y 80% de gasolina y se ha demostrado que es eficaz en la mayoría de los motores de ignición sin ninguna modificación. Actualmente la producción de biocombustibles es apoyada con incentivos del gobierno, pero en el futuro, con el crecimiento de los sembradíos dedicados a la bioenergía, y las reducciones de costos, pueden hacer competitivos a los biocombustibles.

### 3.2.3 Procesos bioquímicos

Una composta es la aglomeración de restos de materia orgánica (vegetal o animal) que se descomponen de manera controlada por la actividad de los microorganismos (hongos y

bacterias). Luego intervienen organismos como hormigas, lombrices, cucarachas, moscas, caracoles, grillos y otros. Éstos convierten los residuos orgánicos en un material de color marrón oscuro, con olor similar al de la tierra. El material resultante puede ser reutilizado como acondicionador de suelo. Los beneficios que tiene el uso de la composta son:

- Útil para reducir, reutilizar y reciclar los residuos orgánicos
- Se devuelve material valioso a la naturaleza
- Ayuda a aumentar la fertilidad del suelo y a mejorar la salud de las plantas
- Reduce la necesidad de espacios en sistemas de relleno sanitario
- Disminuye la utilización de fertilizantes químicos
- Aumenta la capacidad de los suelos para retener agua y nutrimentos, previene la compactación y erosión
- No mata la flora bacteriana del suelo como ocurre con los abonos inorgánicos, de tan amplio uso y venta comercial

Existen dos métodos de elaborar composta:

**Aerobio:** Los residuos se degradan en presencia de oxígeno con la ayuda de los microorganismos (bacterias y hongos). En el proceso de biodegradación la pila alcanza una temperatura superior a los 90° Fahrenheit. Se puede compostar en estructuras con dimensiones desde 3 x 3 x 3 pies hasta 5 x 5 x 5 pies. La degradación de los residuos puede durar de 3 a 4 meses.

**Anaerobio:** Los residuos se biodegradan en ausencia de oxígeno. La composta puede ser elaborada bajo tierra o en un lugar cerrado. Las temperaturas que llegan a obtenerse bajo este proceso son similares a las del método aerobio. En la mayoría de los casos estas compostas trabajan con activadores bacterianos para reducir el proceso de degradación hasta 6 semanas.

El material que se composta pasa por las siguientes etapas:

**Degradación:** La materia orgánica es degradada, según los microorganismos consumen las proteínas y carbohidratos presentes en los materiales.

**Conversión:** Se forma una sustancia rica en nutrientes, de coloración oscura y semejante a la tierra.

**Curación:** La actividad microbiana se reduce, la temperatura de la pila disminuye y ocurre un regreso gradual de los insectos, lombrices de tierra y los ácaros (Pande y Fabian, 1989).

Los factores que afectan el compostaje son los siguientes:

**Nitrógeno/Carbono:** Es necesario, para que ocurra un proceso adecuado de compostaje, un balance entre materiales con una concentración alta de carbono (residuos de color marrón), empleados para generar energía, y materiales con una concentración alta de nitrógeno (residuos color verde), que son necesarios para el crecimiento y la reproducción. Si hay poco nitrógeno la degradación se retarda y el exceso causa malos olores. Se recomienda preparar mezclas con la misma cantidad de cada residuo.

**Humedad:** Ésta debe ser entre 40% y 60%. Si se reduce a menos de 40% las bacterias disminuirán su labor y entrarán en una etapa inactiva. Si sobrepasa el 60% la degradación disminuirá y se producirán malos olores. Por tal razón, es muy importante que se aplique agua en una cantidad adecuada hasta que quede como una esponja recién exprimida.

**Oxígeno:** Los microbios que trabajan con oxígeno para producir composta son aerobios, por lo que requieren de oxígeno para realizar el proceso. De no estar presente el aire, los microbios aeróbicos causarán una degradación más lenta de la materia orgánica. Para inyectar el oxígeno se recomienda voltear la pila.

**Temperatura:** Según avanza el proceso de degradación, la temperatura aumenta. Una mezcla con temperatura entre los 90° Fahrenheit y 140° Fahrenheit es indicativo de un compostaje rápido. Temperaturas mayores a los 140° Fahrenheit reducen la actividad de los microorganismos y menores de 90° Fahrenheit retardan el proceso.

**Área superficial:** El área superficial de los materiales aumenta si se trituran los mismos. Los microorganismos podrán digerir el material más rápidamente y se generará el calor necesario para acelerar el proceso (Pande y Fabian, 1989).

### 3.3 Tipos de reactores anaerobios

#### 3.3.1 Digestión de velocidad estándar a condiciones ambientales

Este tipo de digestión es la más simple para un período de 30 a 60 días. Una representación esquemática de este tipo de digestor se muestra en la Figura 3.2. Generalmente el contenido del lodo ni se calienta ni se mezcla. Aunque el biogás generado proporciona algunas formas de mezcla dentro del reactor. La digestión ocurre en cuatro zonas: (i) Una capa de nata, (ii) Una capa líquida (o sobrenadante), (iii) Una capa para digerir los sólidos, y (iv) Una capa de sólidos digeridos. El sobrenadante se retira y se recicla a la depuradora de aguas residuales. Los sólidos digeridos acumulados en la parte inferior del digestor son periódicamente extraídos. Estas unidades de tasa estándar se construyen hoy en día esporádicamente a excepción de las PTAR pequeñas (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006).

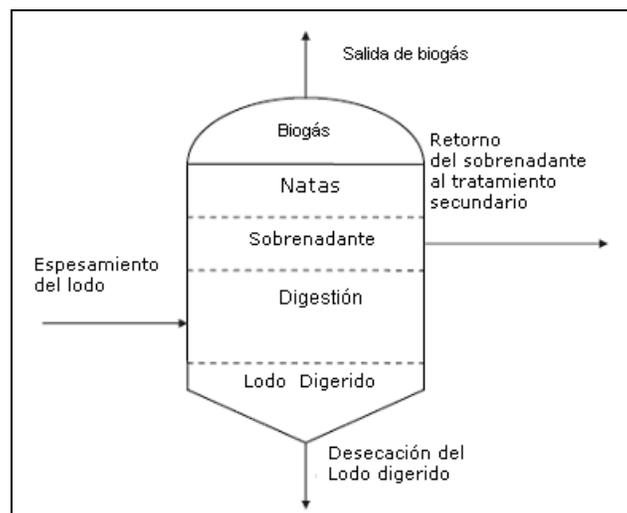


Figura 3.2 Digestor de velocidad estándar (Appels y col., 2008).

### 3.3.2 Digestor de alta velocidad con regulación de temperatura

Este digestor es una mejora importante del digestor de velocidad estándar. El lodo es calentado y totalmente mezclado, se espesa el lodo crudo y la alimentación es uniforme. Todos estos elementos combinados crean un ambiente uniforme dando como resultado que el volumen del tanque se pueda reducir, se alcance más rápido la estabilidad del proceso y se mejora la eficiencia (Turovskiy y Mathai, 2006). El lodo es mezclado por la recirculación del biogás, bombeo o por mezcladores; al mismo tiempo que es calentado por los intercambiadores de calor externos de fácil mantenimiento. Otras maneras de calefacción incluyen intercambiadores de calor interno e inyección de vapor (Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006). La alimentación uniforme es muy importante, y el lodo se debe alimentar continuamente o en intervalos regulares para ayudar a mantener condiciones de estado estacionario en el digestor y reducir cargas de choque, especialmente importante por la sensibilidad de las bacterias metanogénicas (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006). Este tipo de digestor se muestra en la Figura 3.3.

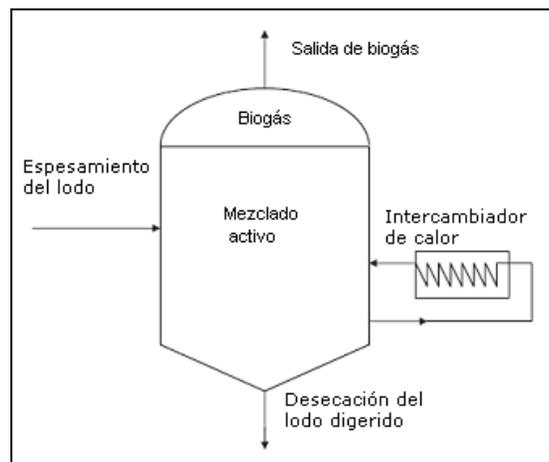


Figura 3.3 Digestor de alta velocidad (Appels y col., 2008)

### 3.3.3 Digestor de dos etapas

En la digestión de dos etapas, un digestor de alta velocidad se junta con un segundo tanque, a veces llamado un digestor secundario como se muestra en la Figura 3.4, se utiliza simplemente para almacenar los sólidos digeridos y para decantar el sobrenadante, ni se calienta ni se mezcla el lodo. Los tanques pueden tener fija la parte superior o puede ser de cubiertas flotantes. Si el tanque secundario es del tipo de cubierta flotante, puede también ser utilizado para almacenar el gas del digestor. La reducción de los sólidos y la producción del biogás ocurren en el segundo tanque. A veces, los tanques primarios y secundarios son de igual diseño, cada uno con la calefacción y capacidad de mezclar para funcionar como un digestor de espera. El sobrenadante del segundo tanque puede contener altas concentraciones de sólidos suspendidos y estos fenómenos se asocian comúnmente a una digestión incompleta en el digestor primario, llevando pequeñas burbujas de gas en la suspensión del segundo tanque. Por otra parte, debido a la mezcla y a la digestión natural de los sólidos, partículas finas o flóculos se producen, los cuales no son fáciles de remover (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006).

Aunque este tipo de doble digestión fue muy popular en el pasado, es raramente usado en plantas nuevas.

### 3.3.4 Digestión mesofílica y termofílica

La mayoría de los digestores de alta velocidad funcionan en la gama mesofílica, con una temperatura entre 30 y 38 °C (Qasim, 1999).

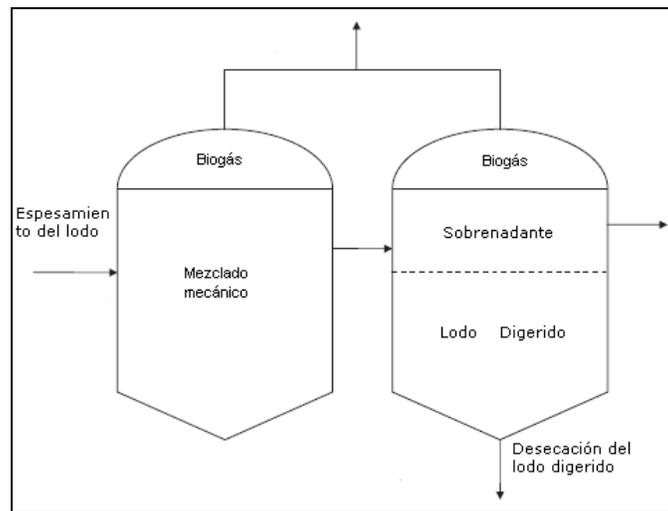


Figura 3.4 Digestor de dos etapas (Appels y col., 2008)

La digestión también puede ser posible a temperaturas más altas, en la región termofílica, donde la digestión ocurre en las temperaturas entre 50 y 57 °C convenientes para las bacterias termofílicas. La digestión termofílica es más rápida que la digestión mesofílica puesto que las tasas bioquímicas de la reacción aumentan con el aumento de temperatura. Otras ventajas son el incremento en la reducción de sólidos y destrucción creciente de organismos patógenos. El uso de temperaturas termofílicas tiene una necesidad energética más alta, una baja calidad del sobrenadante con grandes cantidades de sólidos en suspensión, un potencial más alto de olor y una estabilidad de proceso mucho más pobre que requiere gran cuidado. Este último es debido al hecho de que las bacterias termofílicas son más sensibles a las fluctuaciones de la temperatura que las bacterias mesofílicas (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006).

### 3.4 Criterios de diseño para digestores de una sola etapa y de alta velocidad

Existen varios parámetros para el diseño y la operación de digestores de alta velocidad y de una sola etapa. Éstos son usados para el diseño preliminar de los digestores. (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006; Igoni y col., 2008).

#### 3.4.1 Base de la población

Los tanques de digestión se pueden diseñar basándose en datos per cápita en un cierto volumen (en m<sup>3</sup>). En la Tabla 3.3 se enumeran algunos valores típicos de diseño. Los factores per cápita de carga se deben usar solamente para el diseño preliminar del digestor puesto que el digestor necesita valores constantes para diferentes parámetros

importantes como la eficiencia de remoción de sólidos. Estos parámetros pueden variar considerablemente de una PTAR a otra. Si las cargas de la basura industrial son parte del influente de las aguas residuales, los valores de la Tabla 3.3 para los criterios de diseño deben aumentar sobre una base población-equivalente (Turovskiy y Mathai, 2006).

### 3.4.2 Carga volumétrica de los sólidos

Uno de los métodos más comunes para definir el volumen del digestor es la velocidad de carga de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) según se muestra en la Tabla 3.3. Los criterios de diseño se basan comúnmente en condiciones de carga continuas, típicamente en base al pico mensual de la producción máxima de dos semanas de los sólidos. Los cargamentos bajos de los sólidos disminuyen la eficiencia del digestor (Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006).

Tabla 3.3 Criterios de diseño típicos para la digestión mesofílica (Appels y col., 2008)

Parámetros	Unidades	Valor	
		Velocidad estándar	Alta velocidad
Criterios de volumen			
Lodo primario	m <sup>3</sup> /capita	0.06-0.08	0.03-0.06
Lodo primario + lodos activados	m <sup>3</sup> /capita	0.06-0.08	0.07-0.11
Flujo de carga de sólidos	KgSSV/m <sup>3</sup> d	0.64-1.60	1.6-4.8
Tiempo de residencia de sólidos	d	30-60	10-20
Concentración del lodo			
Lodo primario+lodo biológico	%	2-4	4-7
Lodo digerido	%	4-6	4-7

### 3.4.3 Tiempo de retención de sólidos (TRS)

El volumen del digestor se puede también definir en base al tiempo de residencia de los sólidos puesto que el proceso de la digestión es una función del tiempo requerido por los microorganismos para digerir el material orgánico y para reproducirse. En digestores sin recirculación o remoción del sobrenadante, el TRS es igual al tiempo de retención hidráulico. El TRS más corto para una temperatura de digestión de 35 °C es 10 días para prevenir la destrucción de los microorganismos. Para TRS cuyos valores exceden de 12 a 13 días a 35 °C, cambios en el aumento de la destrucción de los sólidos volátiles son relativamente pequeños. En la selección del diseño en base al TRS, la carga hidráulica máxima debe ser considerada. La Tabla 3.4 se muestra los valores críticos de TRS que deben ser respetados cuando se usa el TRS como criterio de diseño. Puesto que estos valores se establecen en condiciones ideales de temperatura, mezclado y alimentación, un margen de seguridad debe ser proporcionado al seleccionar el diseño en base al TRS y en la práctica, un factor multiplicativo de alrededor de 2.5 como mínimo se recomienda (Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006).

Tabla 3.4 TRS sugeridos para el diseño de digestores de alta velocidad y de mezcla completa (Metcalf y Eddy, 2003)

Temperatura de operación (°C)	TRS Mínimo (días)	TRS <sub>des</sub> (días)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

### 3.4.4 Reducción de sólidos volátiles

Durante el proceso de la digestión, los sólidos volátiles se degradan hasta cierto punto y se convierten en biogás. El volumen del lodo se reduce por este medio y el sobrenadante se regresa al proceso de la planta. El grado de estabilización se expresa a menudo como el porcentaje de reducción en sólidos volátiles, asimismo esta asociado también con el TRS o el tiempo de retención basado en la alimentación del lodo no tratado. El contenido de materia seca inorgánica (MSI) es asumida para permanecer constante durante el período completo de la digestión. La ecuación empírica siguiente permite la estimación de la cantidad de sólidos volátiles destruidos (Metcalf y Eddy, 2003):

$$V_d = 13.7 \times \ln(\text{TRS}_{\text{des}}) + 18.9 \quad (3-1)$$

donde

$V_d$  = la destrucción de los sólidos volátiles (%)

TRS<sub>des</sub> = el tiempo de la digestión (días)

La destrucción de sólidos volátiles se puede estimar usando los valores de la Tabla 3.5. Este método se utiliza con frecuencia puesto que el flujo del lodo no tratado puede ser medido fácilmente.

Tabla 3.5 Destrucción de sólidos volátiles en digestores mesofílicos completamente mezclados de alta-tasa (Metcalf y Eddy, 2003).

Tiempo de digestión (días)	Destrucción de sólidos volátiles (%)
30	65.5
20	60
15	56

### 3.4.5 Diseño del reactor

Los tanques de digestión son cilíndricos o de forma de huevo (Qasim, 1999). El tanque cilíndrico tiene un diámetro de 6 hasta 40 m, con un piso cónico con una inclinación de alrededor de 15 %, y una remoción del lodo en el centro del tanque. La profundidad de agua tiene que ser de unos 7.5 m como mínimo para permitir una mezcla apropiada y puede ser tan alto como 15 m. Algunos digestores son equipados en su parte inferior por

un tipo de “waffle” para reducir al mínimo la acumulación de la arena y para reducir la limpieza del digestor (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003;; Turovskiy y Mathai, 2006).

### 3.4.6 Mezcla del digestor

La mezcla apropiada en la digestión es esencial para proporcionar un funcionamiento óptimo en el digestor. La mezcla proporciona el contacto íntimo entre el lodo de la alimentación y la biomasa activa, concediendo uniformidad de temperatura de la concentración del sustrato, de otros aspectos químicos, físicos y biológicos a través del digestor, y previene la formación de capas superficiales de nata y la deposición del lodo en la parte inferior del tanque. Debido a la elevación de burbujas de gas y de las corrientes de convección termal creadas por la adición de lodo calentado, hay siempre un cierto grado de mezcla natural en el tanque de digestión. Sin embargo, no es suficiente para un funcionamiento óptimo; por lo tanto, es necesario un auxiliar para la mezcla. Los métodos de mezcla auxiliar son bombeo de recirculación externa, mezcla mecánica interna y mezcla de gas interno (Qasim,1999; Tiehm y col., 2001; Igoni y col., 2008), como se observa en la Figura 3.5.

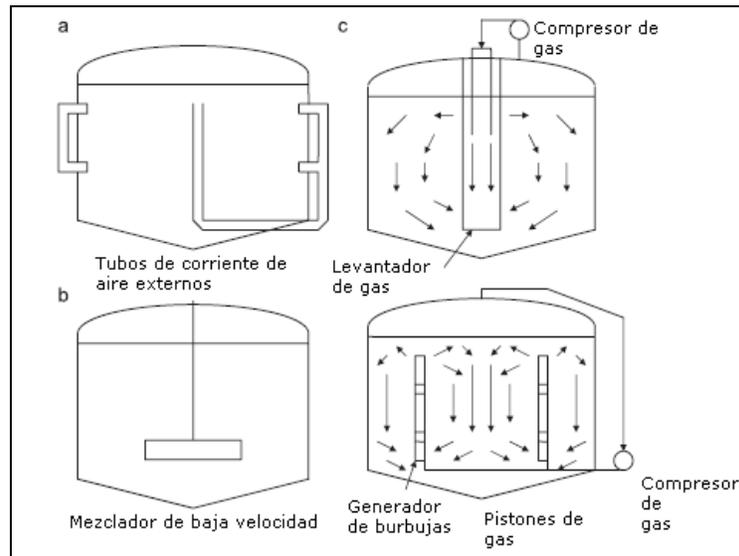


Figura 3.5 Tipos de mezclado en los digestores (a) Recirculación de bombeo externo, (b) Mezclado mecánico interno y (c) Recirculación externa de gas (Appels y col., 2008)

### 3.4.7 Bombeo de recirculación externa

En el bombeo de recirculación externa, una gran cantidad del lodo digerido retirado del centro del digestor se bombea a través de los intercambiadores de calor externos, donde el lodo digerido se mezcla con el lodo crudo y calentado. Entonces se bombea al tanque de digestión a través de inyectores en la base del digestor o en parte superior para romper la nata (Lue-Hing, 1998; Qasim, 1999). El flujo en la recirculación debe, sin embargo, ser muy grande para asegurar una mezcla completa del tanque, esta limitante es solo para este método de mezclado. La energía mínima requerida es de 0.005 a 0.008 kW/m<sup>3</sup> del volumen del digestor y puede ser más alto, si las pérdidas por fricción son excesivas. Otras desventajas de la recirculación de bombeo externo son el taponamiento

de las bombas y desgaste del impulsor de arena (Turovskiy y Mathai, 2006; Igoni y col., 2008).

#### **3.4.8 Mezcla mecánica interna**

Los sistemas de mezcla mecánicos utilizan generalmente turbinas de poca velocidad. En ambos sistemas, el lodo es transportado por impulsores giratorios, de tal modo que se mezcla el contenido del tanque de digestión. La acción de bombeo mecánico es proporcionada por bombas centrífugas, generalmente en disposición en un tubo interno o externo del eje para apoyar la mezcla vertical. La mezcla se apoya por la circulación del lodo. Estos sistemas en su mayoría son adaptados para digestores con cubiertas fijas (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006).

#### **3.4.9 Mezcla interna del gas**

Éste es un método satisfactorio para mezclar el contenido del digestor y evita la acumulación de nata. Los sistemas de mezcla de gas pueden ser confinados o no. En sistemas no confinados, el gas se recoge en la parte superior del tanque de digestión, se comprime y después se lanza a través de una serie de difusores o de una serie de lanzas radialmente colocadas, suspendidas en la parte superior del digestor. El contenido del digestor es mezclado, lanzando las burbujas de gas que se levantan y empujan el lodo a la superficie. El sistema de lanza evita la acumulación de la nata; sin embargo, debido a un régimen de mezcla ineficaz hay un mayor riesgo de depósitos de los sólidos. Lo contrario ocurre con el sistema de difusión, donde si la mezcla completa no es adecuada, da por resultado una acumulación de nata. Este sistema es, sin embargo, eficaz contra la deposición de los sólidos. Por otro lado, hay una posibilidad de que el difusor se tape, y se tiene que drenar el contenido del digestor para la limpieza del tanque. El requisito de flujo del gas para los sistemas no confinados es de 0.0045 a 0.005 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>minuto (Turovskiy y Mathai, 2006).

Hay dos tipos de sistemas confinados: El elevador de gas y el pistón de gas. Generalmente, en sistemas confinados el gas se recoge en la parte superior, se comprime y se descarga a través de los tubos confinados. El sistema elevador del gas se compone de líneas de gas colocadas en un tubo de inyección. El gas comprimido se envía a estas líneas y las burbujas de gas se levantan, creando un efecto de puente aéreo. El sistema pistón de gas lanza las burbujas de gas en forma intermitente en la parte inferior del pistón, creando por este medio la acción de bombeo de las burbujas y de empuje del lodo a la superficie. Estos sistemas confinados tienen generalmente un requerimiento de energía baja y un flujo de gas de 0.005 a 0.007 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>minuto (Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006). En la Tabla 3.6 se pueden observar algunos parámetros de diseño típicos para sistemas de mezcla en digestores.

#### **3.4.10 Control de temperatura**

Es crucial para una operación estable y eficiente mantener una temperatura constante en el proceso de la digestión. El calor es necesario para: (i) Aumentar el lodo del influente a la temperatura del digestor y (ii) Compensar la pérdida de calor a través de las paredes, la parte inferior y superior del digestor (Metcalf y Eddy, 2003).

Tabla 3.6 Parámetros de diseño típicos para sistemas de mezclado en digestores (Metcalf y Eddy, 2003)

Parámetros	Sistema de mezclado	Valores típicos	Unidades
Potencia	Sistemas mecánicos	0.005-0.008	Kw/m <sup>3</sup> de volumen del digestor
Flujo de gas	Mezcla de gas No confinado Confinado	0.0045-0.005 0.005-0.007	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> min m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> min
Gradiente de velocidad G	Todo	50-80	s <sup>-1</sup>
Tiempo de transferencia del contenido en el digestor	Mezcla de gas confinado y sistemas mecánicos	20-30	min

### 3.4.11 Requisitos de calentamiento

La cantidad necesaria para calentar el lodo a la temperatura del digestor es dada por la ecuación siguiente:

$$Q_1 = W_f C_p (T_2 - T_1) \quad (3-2)$$

donde

- Q<sub>1</sub> es el calor requerido (J/d),
- W<sub>f</sub> es el flujo del lodo de la alimentación (kg/d),
- C<sub>p</sub> es el calor específico del lodo (4,200 J/kg°C),
- T<sub>2</sub> es la temperatura de funcionamiento del digestor (°C) y
- T<sub>1</sub> es la temperatura de la alimentación del lodo (°C)

La cantidad de calor requerida para compensar pérdidas de calor es dado por:

$$Q_2 = UA(T_2 - T_a) \quad (3-3)$$

donde

- Q<sub>2</sub> es la pérdida de calor (J/s),
- U es el coeficiente de traspaso térmico (W/m<sup>2</sup> °C),
- A es el área de la superficie del digestor en la cual ocurren las pérdidas de calor (m<sup>2</sup>),
- T<sub>2</sub> es la temperatura del lodo en el digestor (°C) y
- T<sub>a</sub> es la temperatura ambiente (afuera del digestor) (°C)

### 3.4.12 Equipo de calefacción

El método más común para la calefacción del lodo es el intercambiador de calor externo, aunque la inyección de vapor también puede ser aplicada (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Turovskiy y Mathai, 2006). El calentamiento por inyección de vapor no requiere de ningún intercambiador de calor, pero la presencia de una caldera de vapor no es común para instalaciones de PTAR. Los intercambiadores de calor externos tienen la ventaja de

permitir la recirculación de la mezcla de lodo en el digestor con lodo crudo antes de calentar, y en la inoculación de los microorganismos anaerobios. Los tipos de intercambiadores de calor externos que hay son: Intercambiadores tubulares y de espiral, ambos intercambiadores, tubulares y espirales, son favorables por su diseño de flujo a contracorriente y sus coeficientes de transferencia de calor en el rango de 850 a 1000 W/m<sup>2</sup>K. El agua caliente que se usa en los intercambiadores de calor se produce comúnmente en una caldera que utiliza el gas del digestor. En la etapa de arranque y/o bajo condiciones de producción escasa de biogás, es conveniente, utilizar una fuente de combustible alternativo tal como gas natural para el sistema de calefacción (Qasim, 1999).

### 3.4.13 Cubiertas del digestor

Los digestores se cubren para mantener la temperatura de funcionamiento y las condiciones anaerobias y por supuesto para recolectar el biogás del digestor. La cubierta puede ser fija o flotante. Cuando se retira el lodo, no se debe permitir la entrada de aire al tanque de digestión para evitar el peligro de una explosión con la mezcla del biogás del digestor y el oxígeno. Las cubiertas fijas son en forma de cúpula o planas y se hacen de concreto reforzado, acero o poliéster de fibra de vidrio reforzado. Las cubiertas flotantes se utilizan normalmente para digestores de una sola etapa y para digestores de dos etapas. Una variación de la cubierta flotante es el sostenedor de gas flotante, consistiendo en una cubierta flotante con una falda extendida, para poder almacenar el gas durante los períodos en que el suministro del gas del digestor excede la demanda. Un reciente desarrollo en cubiertas para el gas calentado son las cubiertas de membrana. Consiste de soportes, membranas flexibles de gas y de aire. Cuando el volumen del almacenamiento de gas disminuye o aumenta en el espacio entre la superficie líquida y las membranas, el espacio entre las membranas es presurizado o despresurizado usando un sistema de válvula de alivio (Turovskiy y Mathai, 2006). Las cubiertas flotantes flotan directamente en el líquido y tienen generalmente un espacio vertical máximo de 2 a 3 m (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003). La presión del gas debajo de la cubierta del digestor está típicamente en el rango de 0 a 3.7 kN/m<sup>2</sup> (Qasim, 1999). En digestores de forma de huevo, el almacenamiento disponible para el gas es limitado y la disposición de almacenamiento de gas externo es necesario (Turovskiy y Mathai, 2006).

### 3.5 Predicción de la producción de biogás

El gas del digestor contiene cerca de 65 a 70 % de metano, 30 a 35 % de dióxido de carbono y cantidades pequeñas de nitrógeno, de hidrógeno, de sulfuro de hidrógeno y de vapor de agua. Tiene una densidad relativa de alrededor de 0.86. Con una concentración promedio de metano de 65 %, el valor calorífico es aproximadamente 21 a 25 MJ/m<sup>3</sup>, cerca del 30 a 40 % más bajo que el valor calorífico de 37.3 MJ/m<sup>3</sup> para el gas natural.

La tasa de generación de metano se puede estimar de las ecuaciones cinéticas desarrolladas para los sistemas anaerobios (Qasim, 1999). A continuación se presenta una ecuación para la predicción de la producción del biogás.

$$P_x = YES_0 / 1 + K_d \theta_c \quad (3-4)$$

$$V = 0.35m^3 / kg \{ ES_0 - 1.42(P_x) \} \quad (3-5)$$

donde

$P_x$  es la masa neta de la célula producida (kg/d),

$Y$  es el coeficiente de producción (g/g). Para el lodo municipal: 0.04 a 0.1 mgSSV/mgDBO utilizado,

$E$  es la eficiencia de la utilización de los residuos (0.6 a 0.9),

$S_o$  es la  $DBO_L$  del influente (kg/d),

$k_d$  es el coeficiente endógeno ( $d^{-1}$ ). Para el lodo municipal: 0.02 a 0.04  $d^{-1}$ ,

$\theta_c$  es el tiempo promedio de residencia de las células (días), igual al TRS,

$V$  es el volumen de metano producido ( $m^3/d$ ),

0.35 es el factor de conversión teórico para la cantidad de metano producido de la conversión de 1 kg DBO y 1.42 el factor de conversión para el material celular en DBO.

La producción específica de biogás (Qasim, 1999; Metcalf y Eddy, 2003) se sitúa en el rango de 0.75 a 1.12  $m^3/kgSV$  destruidos, ó 0.5 a 0.75  $m^3/kgSV$  de carga, ó 0.03 a 0.04  $m^3/día$  persona.