

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS TÉCNICO

2.1 Procesos de conversión de la biomasa

La utilización con fines energéticos de la biomasa requiere de su adecuación para utilizarla en los sistemas convencionales (Guillén, 2004). Los posibles caminos para la conversión de la biomasa en energía se presentan en la Figura 2.1. Los procesos de conversión pueden ser: Biológicos o termoquímicos, con un tratamiento físico previo, como serían los procesos que actúan físicamente sobre la biomasa y están asociados a las fases primarias de transformación. Dentro de lo que puede denominarse fase de acondicionamiento se incluye: Triturado, astillado, compactado e incluso secado.

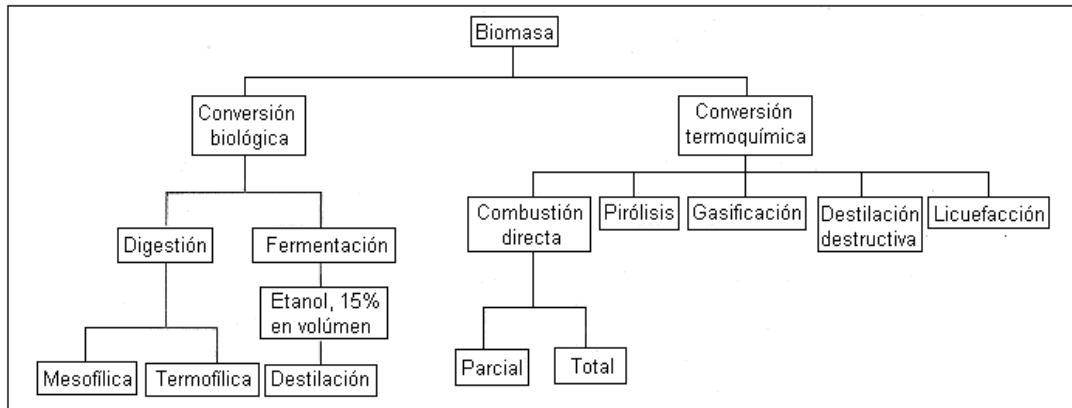


Figura 2.1 Posibles caminos para la conversión de biomasa en energía (Concheiro y Viqueira, 1985)

2.1.1 Procesos termoquímicos

Están basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a altas temperaturas (300 °C – 1500 °C). En la Figura 2.2 se encuentran dos de los procesos de conversión de la biomasa y los productos obtenidos de ella.

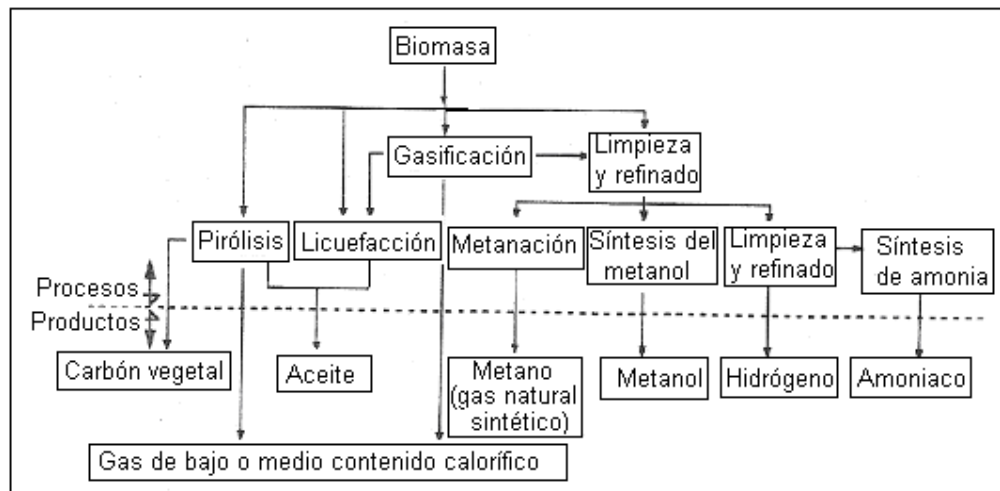


Figura 2.2 Procesos de conversión de la biomasa y productos obtenidos (Concheiro y Viqueira, 1985)

Cuando se calienta la biomasa se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de descomposición de sus moléculas y de reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí, junto con los componentes de la atmósfera en la que tenga lugar la reacción, de esta forma se consiguen los productos finales. Según el control de las condiciones del proceso se consiguen productos finales diferentes, lo que da lugar a los tres procesos principales de la conversión termoquímica de la biomasa.

2.1.1.1 Combustión

El proceso de convertir la biomasa en un producto útil tal como electricidad y calor, puede involucrar tecnologías de conversión, tanto primarias como secundarias, o ambas. En la tecnología primaria, la biomasa sin tratamiento, es convertida directamente en calor, en un combustible más conveniente, o en un transportador de energía en forma de gases (tales como el CH_4 , H_2) combustibles líquidos (tales como el CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) o ceniza (C).

Las tecnologías secundarias convierten estos transportadores en el producto final de energía deseado, tal como el transporte de los productos, mercancías y personas o iluminación eléctrica (Sims, 2002). Las tecnologías primarias y secundarias pueden ser inseparables en ciertas aplicaciones específicas. Tanto la combustión, la gasificación y pirólisis son tecnologías de conversión primarias. La Figura 2.3 muestra el esquema de una planta de combustión.

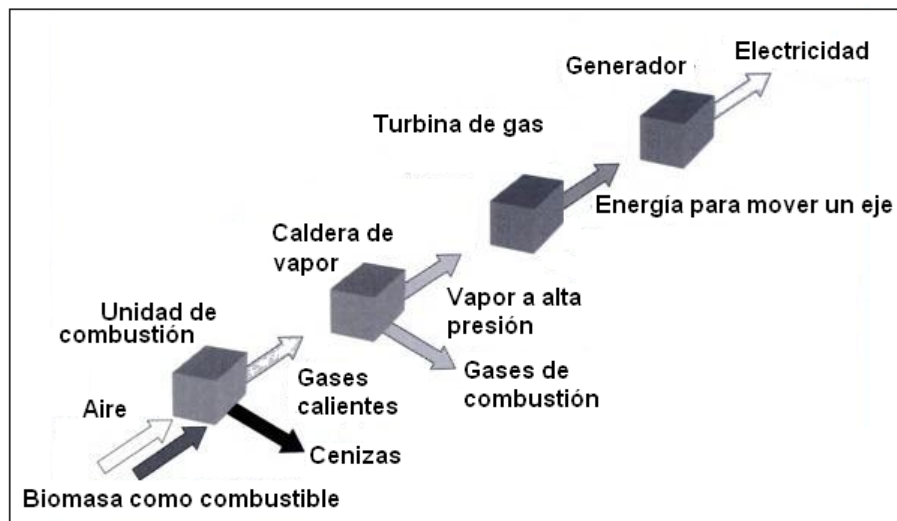


Figura 2.3 Esquema de una planta de combustión (Sims, 2002)

La tecnología de conversión primaria incluye la combustión, gasificación y pirólisis e hidrólisis. Las tecnologías secundarias incluyen:

- Calderas: Utilizan el calor de la combustión y lo usan para elevar la temperatura del agua o convertirla en vapor. Dicho vapor o agua caliente puede usarse para abastecer las necesidades térmicas de una fábrica o para alimentar una turbina de vapor para generar la electricidad.
- Turbinas de gas/motor de gas: El proceso de gasificación primaria produce gas productivo (CO , H_2 y probablemente CH_4) con poder calorífico medio o bajo. Puede someterse a combustión directamente en una turbina de gas o motor de combustión interna, acoplándose directamente a un generador para la producción de electricidad o a una caja

de cambios para conducción mecánica. En años recientes, se ha hecho énfasis en el mejoramiento de la eficiencia de la generación termoeléctrica, lo cual ha conducido al desarrollo de las plantas de ciclo combinado, que recuperan el calor liberado de las turbinas de gas, para producir vapor para utilizarlo en la generación de energía eléctrica extra por medio de una turbina de vapor.

- Motor de combustión interna: Usado para propósitos de transporte que puede ser alimentado por biocombustibles como el biodiésel, gas productivo o aceite pirolítico.

El proceso de combustión

Se quema el combustible en una atmósfera oxidante, de aire u oxígeno, obteniendo cuando es completa, dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas), obteniendo calor en forma de gases calientes. La combustión es un proceso de oxidación exotérmica que ocurre a una temperatura relativamente alta. El proceso incluye la volatilización de los vapores del combustible propios de la biomasa, el cual arde en llamas, mientras que el material residual en forma de cenizas de carbón es quemado, cuando se adiciona más aire. Cuando la biomasa seca es sometida a combustión las fases que ocurren son:

- Calor y secado: Cuando la biomasa es calentada, cantidades excedentes de humedad en la biomasa se evaporan de las células. Esta cantidad de humedad, varía entre 10% y 50% del total de peso (base húmeda), el cual es mucho mayor que la del carbón (normalmente entre 3% y 10% cuando es extraído de la mina). Ésto reduce la efectividad o el calor útil disponible de la energía contenida en el combustible proveniente de la biomasa. Esto también afecta el gradiente de temperatura, lo cual puede ocurrir dentro de la pieza o partícula de madera y como resultado alentar el proceso de calentado y secado.
- Destilación de las partículas volátiles: Después de que la evaporación de las moléculas de agua se completó, más calor es absorbido y los gases volátiles son liberados, cuando las temperaturas están entre los 180°C y los 530°C, y la destilación ocurre (similar a la destilación de los productos de aceite crudo en una óleo refinera). Estos gases incluyen componentes orgánicos complejos saturados e insaturados, incluyendo las parafinas, fenoles, ésteres y ácidos grasos, los cuales tienen una temperatura de destilación por separado, y por tanto podrían teóricamente ser procesados en una biorefinería para producir diversos químicos.
- Combustión de los gases volátiles: La ignición toma lugar entre los 630°C y 730°C, los gases producidos de la biomasa se combinan exotérmicamente con el oxígeno para producir calor, y principalmente CO₂ y vapor de agua. La temperatura de flama que alcanza en el horno durante esta fase gaseosa dependerá del nivel de aire excesivo presente, de la cantidad de humedad en la madera o biomasa inicial, ya que habrá sido evaporada en esta zona, donde la fase de reacción gaseosa ocurre.
- Combustión del carbono: Una vez que la humedad y los volátiles se han apartado, el carbono del combustible queda en forma de ceniza, el cual comienza a quemarse cuando hay mayor disponibilidad de oxígeno. En un lecho común de combustión el oxígeno reacciona con el carbono para formar principalmente CO. Este gas es quemado para formar CO₂, pero es reducido por más carbono, regresando a la forma de CO. Estos tres procesos coinciden a un mismo tiempo, debido a esto, el producto gaseoso principal que abandona el lecho de combustión en esta etapa es el CO. Cuando este alcanza el aire secundario, éste se quema y forma CO₂, el cual es liberado a la atmósfera.

Para llevar a cabo un buen proceso de combustión se requieren 3 grandes factores: El tiempo, la temperatura y la turbulencia (Basu, 2006). Estos tres factores son encontrados en un combustor de lecho fluidizado, en el cual la buena recirculación, tanto interna como externa de los sólidos calientes

a temperatura de combustión, proporciona a las partículas combustibles un tiempo prolongado y temperatura adecuada. Las altas temperaturas de la mezcla gas-sólido en los hornos de lechos fluidizados también proporcionan la turbulencia necesaria para un buen proceso de combustión.

Otra característica de la biomasa es su contenido relativamente volátil (60-80%). La combustión con procesos de reducción de NO_x evita la extracción de calor por ductos inmersos en el lecho, lo cual es mejor desde el punto de vista de disponibilidad de las calderas, debido a que la corrosión en las tuberías es el mayor problema de las calderas de lecho burbujeante. Una humedad relativamente alta contenida (10-65 %), incrementa el flujo volumétrico de gas por unidad de calor liberado. Ésto demanda grandes separadores ciclónicos y salidas muy amplias en las calderas de lecho fluidizado. En la Tabla 2.1 se observa que el contenido de oxígeno usando biomasa puede ser muy alto: Entre 30 y 40 %. Así la demanda de aire en la combustión para la biomasa es relativamente baja, lo que significa que podría haber menos nitrógeno en el gas, lo cual ayudaría a reducir las pérdidas del secado del gas.

Tabla 2.1 Composición de algunas fuentes combustibles de la biomasa (Basu, 2006)

Combustible	Unidad	Cáscara de arroz	Desechos de madera	Aserrín
Poder calorífico máximo	MJ/Kg	16.2	20.14	20
Humedad	Peso %	9.7	14.2	53.9
Compuestos volátiles	-	66	79.1	39.19
C	Peso %	40.2	49	50.6
H	-	5	5.9	6
O	-	36.3	40.7	42.78
N	-	0.3	2.5	0.2
S	-	0.05	0.05	0.01
Cl	-	0.1	0.03	0.01
Cenizas	-	18.2	1.9	0.41
Composición de las cenizas	-	-	-	-
SiO₂	% de ceniza	89	32	4.9
Al₂O₃	-	0.41	6.2	0.93
TiO₂	-		14	0.2
Fe₂O₃	-	0.25	2.8	1.3
CaO	-	0.75	17	32
MgO	-	0.43	2.7	4.8
Na₂O	-	0.06	2.8	2.4
K₂O	-	2.2	4.7	8.7
P₂O₅	-	-	6.3	-
SO₃	-	0.49	-	19

La biomasa es generalmente más reactiva que los combustibles fósiles como el lignito y la antracita. El producto es la escoria, material pegajoso proveniente de los componentes de las cenizas que se deposita en las calderas y la corrosión (Basu, 2006), debido al alto contenido de álcali en la biomasa, mientras que la corrosión es debida al contenido de cloro.

Actualmente, la combustión directa de la biomasa es empleada por la gran mayoría de la población rural en el mundo para el calentamiento y la cocción de alimentos y en algunas instalaciones industriales para generar calor y vapor. Los sistemas de combustión directa cuyos principios de operación son bien conocidos incluyen fogatas abiertas, cocinas simples, hornos holandeses, calderas y unidades de lecho fluidizado. En las unidades de combustión directa de óptimo diseño es posible lograr una eficiencia de hasta un 60-80 %, mientras que en la combustión a cielo abierto se reduce al 5 ó 10 % (Concheiro y Viqueira, 1985). La mayor parte de los sistemas industriales de combustión directa de biomasa emplean cortezas celulósicas. Aunque pueden emplearse materiales

con hasta un 65 % de humedad, pero cuanto menor sea la humedad, mayor será la eficiencia de los sistemas.

2.1.1.2 Gasificación

Es un proceso de oxidación parcial o reacción parcial a una temperatura entre 600 °C y 1,500 °C en una atmósfera pobre en oxígeno. Es un proceso en el cual se produce gas de síntesis comprimido, principalmente hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO). No es una oxidación completa o proceso de combustión, el cual produce básicamente energía térmica en forma de calor y gases como el NO_x, SO₂ y CO₂. La gasificación convierte los hidrocarburos tales como el carbón, el coque de carbón y la biomasa, en un gas de síntesis, o simplemente en una mezcla gaseosa de alto valor económico, que puede ser procesado para producir químicos, fertilizantes, combustibles líquidos, hidrógeno y electricidad (Figura 2.4).

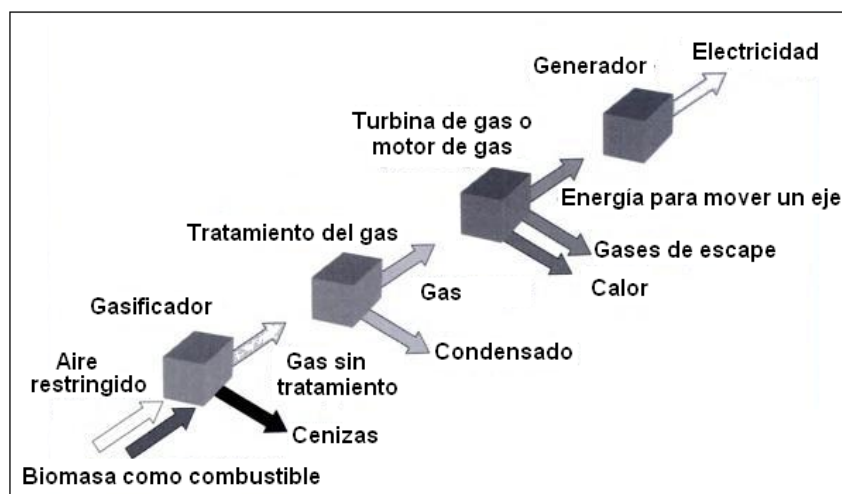


Figura 2.4 Esquema de una planta de gasificación (Sims, 2002)

El proceso funciona de la siguiente manera: Se parte de una biomasa o de un hidrocarburo en las condiciones en las que se encuentre. La biomasa se acondiciona mediante la limpieza, secado y homogeneizado. El reactor presurizado a altas temperaturas es alimentado por la biomasa, el aire atmosférico y vapor, hasta que las estructuras químicas de la biomasa o hidrocarburos son rotas. Los productos resultantes de la reacción es el gas de síntesis y los residuos (cenizas) que alcanzan valores entre el 4 % y el 12 % según la biomasa inyectada. El gas de síntesis se limpia removiendo las impurezas tales como, el sulfuro, mercurio, partículas y otros que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición típica del gas de síntesis (Heaven, 2001)

Componente	Alimentado por aceite (%molar)	Alimentado por coque (%molar)
CO	45.6	47.7
H ₂	43.3	30.3
CO ₂	8.2	17.9
H ₂ O	0.3	0.1
CH ₄	0.4	0.01
Ar	1.0	0.8
N ₂	0.5	1.3
H ₂ S	0.7	1.8
COS	0.0	0.02

El dióxido de carbono, puede ser removido en este punto. El gas de síntesis es entonces utilizado para hacer un producto sencillo tal como un fertilizante o múltiples productos tales como el hidrógeno o vapor para generar electricidad. Actualmente existen las plantas que combinan los sistemas de gasificación con un moderno y altamente eficiente sistema de energía eléctrica de ciclo combinado, que consiste en una o varias turbinas de gas, integradas con turbinas de vapor y se les denomina plantas de energía integradas de gasificación y ciclo combinadas (GICC).

La gasificación ayuda también a la producción de aceite de los bastos depósitos de chapopote en Canadá y a sustituir el gas natural proveniente del carbón en América. Los tres principales sistemas de gasificadores empleados actualmente son: Flujo ascendente, flujo descendente y lecho fluidizado.

2.1.1.2.1 Gasificador de flujo ascendente

La toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba como lo muestra la Figura 2.5. Cerca de la parrilla, en el fondo, tienen lugar las reacciones de combustión, que van seguidas de reacciones de reducción algo más arriba, en el gasificador. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirólisis de la carga, como resultado de la transferencia de calor, por convección forzada y radiación, de las zonas inferiores. Los alquitranes y productos volátiles producidos durante este proceso son transportados por la corriente de gas. Las cenizas se remueven del fondo del gasificador.

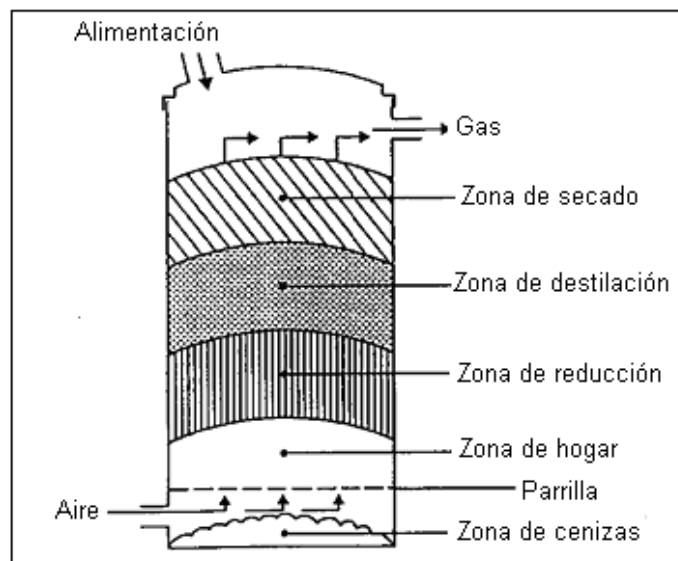


Figura 2.5 Esquema del gasificador de flujo ascendente (FAO, 1993)

Las principales ventajas de este tipo de gasificador consisten en su simplicidad, alta proporción de carbón vegetal quemado e intercambio interno de calor que genera que baje la temperatura de salida del gas y se incremente la eficiencia del equipo y también la posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga (aserrín, cáscaras de cereales, etc.).

Los principales inconvenientes provienen de la posibilidad de que se produzcan chimeneas en el equipo, lo que puede motivar la salida de oxígeno y situaciones explosivas peligrosas y la necesidad de instalar parrillas de movimiento automático y también problemas relacionados con la eliminación de líquidos condensados que contienen alquitranes, resultantes de las operaciones de depuración del gas. Esto último tiene poca importancia si el gas se emplea para aplicaciones directas del calor, en cuyo caso, los alquitranes se queman.

2.1.1.2.2 Gasificadores de flujo descendente

Se ha encontrado una solución al problema del arrastre de alquitrán con la corriente de gas, diseñando gasificadores de tiro invertido o corriente descendente, en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de ésta. El gas pobre sale por el fondo del aparato, de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.6. En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman por ello en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano.

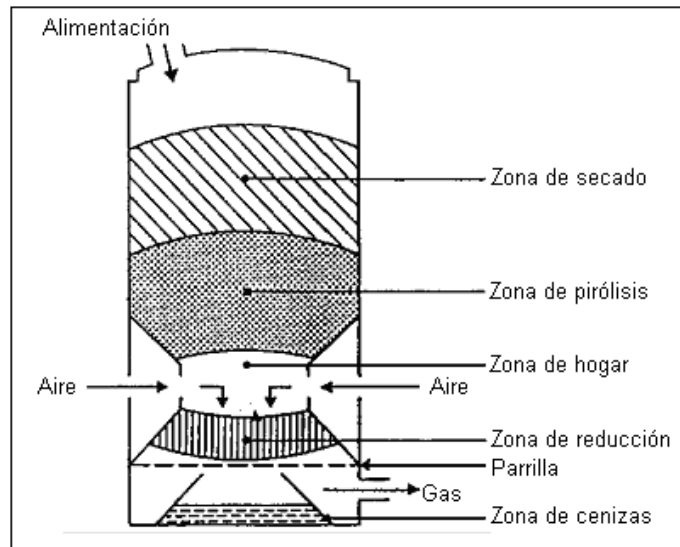


Figura 2.6 Gasificador de corriente descendente o de tiro invertido (FAO, 1993)

Dependiendo de la temperatura de la zona incandescente y del tiempo de paso de los vapores con alquitrán, se logra una descomposición más o menos completa de los alquitranes. La principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores. Sin embargo, en la práctica es muy raro lograr un gas libre de alquitranes, en todo el funcionamiento del equipo.

Debido al menor contenido de componentes orgánicos en el líquido condensado, los gasificadores de tiro invertido sufren menos objeciones ambientales que los gasificadores de tiro directo. Un inconveniente importante de los equipos de tiro invertido es que no funcionan con algunos tipos de biomasa. En particular, los materiales blandos y de baja densidad ocasionan problemas de circulación y una caída excesiva de presión y, el combustible sólido hay que convertirlo en gránulos o briquetas antes de utilizarlo.

Los gasificadores de tiro invertido sufren también los problemas relacionados con los combustibles de alto contenido de cenizas (formación de escoria), en mayor proporción que los gasificadores de tiro directo. Un pequeño inconveniente del sistema de tiro invertido en comparación con el de tiro directo es su baja eficiencia, debida a la falta de intercambio interno de calor y al bajo poder calorífico del gas. Además de esto, la necesidad de mantener unas temperaturas altas uniformes en una sección transversal determinada, hace imposible el uso de los gasificadores de tiro invertido en una serie de potencias arriba de los 350 KW (potencia en el eje).

2.1.1.2.3 Gasificados de flujo transversal

Los gasificadores de tiro transversal, son una adaptación para el empleo de carbón vegetal. La gasificación del carbón vegetal produce temperaturas muy elevadas (1 500°C y más) en la zona de oxidación que pueden producir problemas en los materiales. En los gasificadores de tiro transversal, el propio combustible (carbón vegetal) sirve de aislamiento contra estas altas temperaturas. Las ventajas del sistema, es que pueden funcionar en muy pequeña escala, pudiendo resultar económicamente viables y en ciertas condiciones puede haber instalaciones inferiores a 10 KW (potencia en el eje). La razón está en la gran sencillez del conjunto de depuración del gas (sólo un quemador de ciclón y un filtro caliente) que se puede emplear cuando se utiliza este tipo de gasificador junto con motores pequeños. Un inconveniente de los gasificadores de tiro transversal es su capacidad mínima de transformación del alquitrán y la necesidad de emplear carbón vegetal de alta calidad (bajo contenido de productos volátiles).

2.1.1.2.4 Gasificador de lecho fluidizado

El funcionamiento de los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido se ve afectado por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible. Los problemas que se encuentran corrientemente son: La falta de tiro en el depósito, la formación de escoria y la excesiva caída de presión en el gasificador. En este gasificador se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Se comienza por calentar externamente el lecho y el material de alimentación se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho.

Como resultado de este tratamiento, el combustible se piroliza muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes, con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos. En la fase de gas, se produce una nueva gasificación y reacciones de transformación de los alquitranes. La mayoría de los sistemas van equipados con un ciclón interno, a fin de reducir al mínimo el escape de alquitrán por soplado. En la Figura 2.7 se ilustra un gasificador de lecho fluidizado.

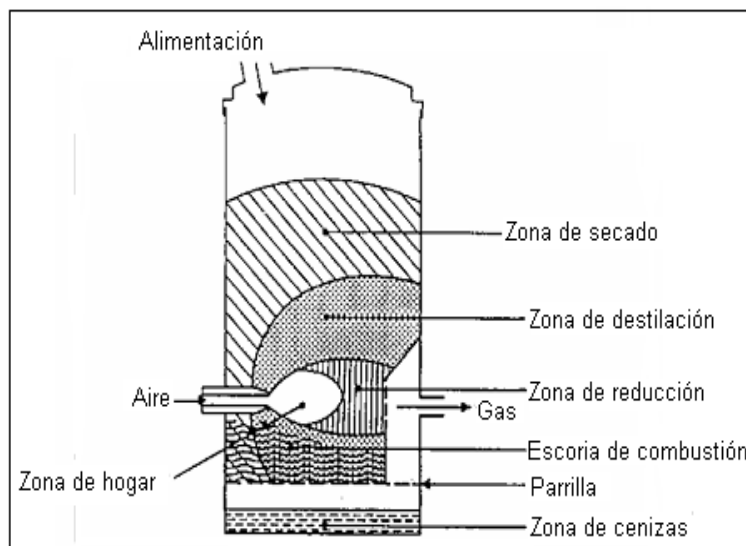


Figura 2.7 Esquema del gasificador de lecho fluidizado (FAO, 1993)

Las partículas de ceniza se transportan también por la parte superior del reactor, debiendo extraerse de la corriente de gas si éste se emplea en aplicaciones para motores. Un sistema de diseño que

pretende eliminar tales dificultades es el gasificador de lecho fluidizado. La selección del tipo de gasificador que se va a emplear depende de la potencia que se desee.

Los gasificadores de lecho fluidizado se utilizan para instalaciones de gran escala, mientras que para pequeñas potencias se prefieren los de flujo descendente. Otros tipos de reactores son los de lecho fluidizado burbujeante, los de lecho fluidizado circulante, y los de lecho fluidizado presurizados. Otros tipos de reactores son los ciclónicos y los rotatorios, además de diferentes tipos de reactores de cama móvil.

Hasta potencias de 1 MW se recomienda casi exclusivamente la utilización de gasificadores de flujo ascendente. Este tipo de gasificador es, además, el más sencillo de todos; y para potencias mayores de 10 y hasta alrededor de 50 MW compiten los reactores de tipo flujo descendente y los de lecho fluidizado burbujeante. Para potencias mayores de 100 MW se usan exclusivamente los de lecho fluidizado presurizados. La Tabla 2.3 indica el tipo de gasificador y la capacidad de salida.

Tabla 2.3 Capacidad de salida típica para diversos diseños de gasificadores (Sims, 2002)

Tipo de gasificador	Rango en watts
Flujo ascendente	20KW-1MW
Flujo descendente	1MW-15 MW
Lecho fluidizado burbujeante	2MW-50MW
Lecho fluidizado circulante	10MW-120MW
Lecho fluidizado presurizado	80MW-500MW

La gasificación permite la utilización del carbón doméstico, el coque de petróleo y la biomasa para producir electricidad con reducidos impactos ambientales significativos, comparados con la tecnología de combustión tradicional. Por que el gas de síntesis natural es limpiado antes de la combustión, las plantas de gasificación producen significativamente menos cantidades de contaminantes al aire, tales como el nitrógeno, y el dióxido de sulfuro. La Tabla 2.4 nos permite ver una comparación de la gasificación y la combustión.

Tabla 2.4 Gasificación comparada con la combustión del carbón (GTC, 2009)

Componentes del carbón	Gasificación	Combustión
Carbono	CO	CO ₂
Hidrógeno	H ₂	H ₂ O
Nitrógeno	N ₂	NO ₂
Sulfuro	H ₂ S	SO ₂
Oxígeno	-	O ₂

La gasificación permite la recuperación de la energía disponible proveniente de materiales de bajo costo, tales como el coque de petróleo, y desperdicios sólidos de basura municipales, reduciendo en ambos problemas el impacto ambiental y los costos de manejo del desecho. El dióxido de carbono puede ser capturado por las plantas de gasificación usando las tecnologías que ya existen antes de la combustión del gas de síntesis en las turbinas de gas.

La gasificación ha sido utilizada comercialmente alrededor del mundo por más de 50 años por las industrias químicas, refinerías y fertilizantes y por más de 35 años por la industria eléctrica. Existen más de 420 gasificadores actualmente, en más de 130 plantas operando en el mundo. La Figura 2.8 muestra en porcentaje el desarrollo de la tecnología en el año 2004 al 2009, en los 3 continentes con mayor participación, también se muestra que en Asia se tiene el mayor crecimiento con un aporte del 81%. La capacidad de las plantas gasificadoras está proyectada para tener un crecimiento del 70 % para el año 2015 (Figura 2.9).

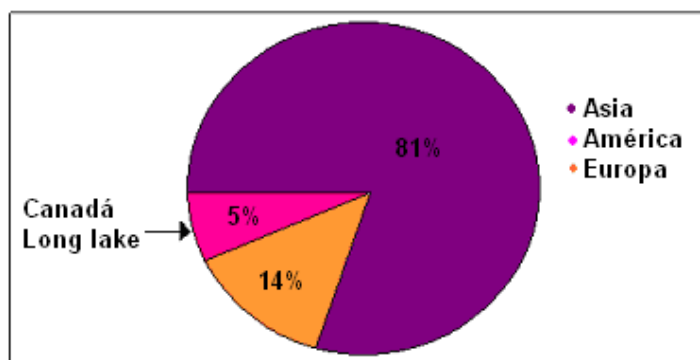


Figura 2.8 Capacidad mundial de generación eléctrica por gasificación en plantas tipo GICC (GTC, 2009)

Las principales industrias interesadas en dicho crecimiento son las químicas y las de fertilizantes y las de carbón-líquidos en China y la poligeneración en E.E. U.U, así como refinerías en Europa. China tiene una expectativa de crecimiento muy alto, desde el año 2004 ha tenido licencias y ha construido 29 nuevas plantas de gasificación.

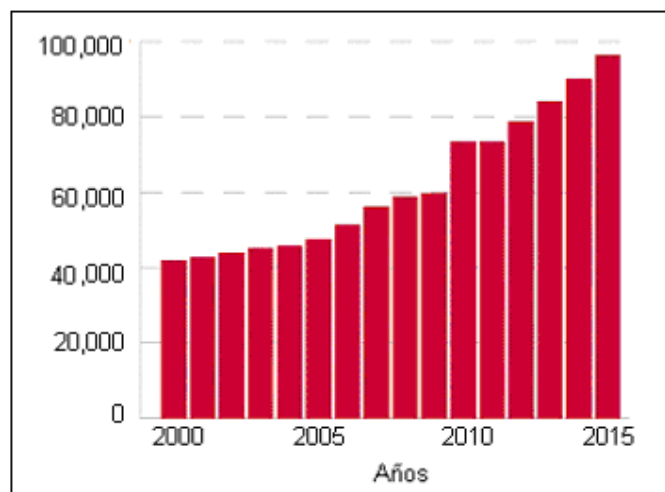


Figura 2.9 Proyección hacia el 2015 en gasificación (GTC, 2009)

2.1.1.3 Pirólisis

La pirólisis que también es conocida como carbonización, destilación destructiva, destilación seca, es una descomposición térmica de biomasa en ausencia de aire (aunque algunas tecnologías emplean aire en alguna parte del reactor), que puede llevarse a cabo en lotes o en procesos continuos. En la práctica no es posible conseguir una atmósfera libre de oxígeno; los sistemas pirolíticos son operados con menos que las cantidades estequiométricas necesarias de oxígeno.

Hay dos grandes diferencias entre los procesos de combustión y pirólisis. El primero, los procesos de combustión son exotérmicos, mientras que la pirólisis es un proceso endotérmico, la pirólisis requiere la adición de calor, y segundo los productos del proceso de combustión son CO₂, agua, y ceniza, mientras que los productos de la pirólisis son, aceite, gas combustible, aceite y residuos de carbón. Éstos productos pueden ser usados como combustible para un proceso de combustión o como productos intermedarios para síntesis y producción de químicos (Figura 2.10).

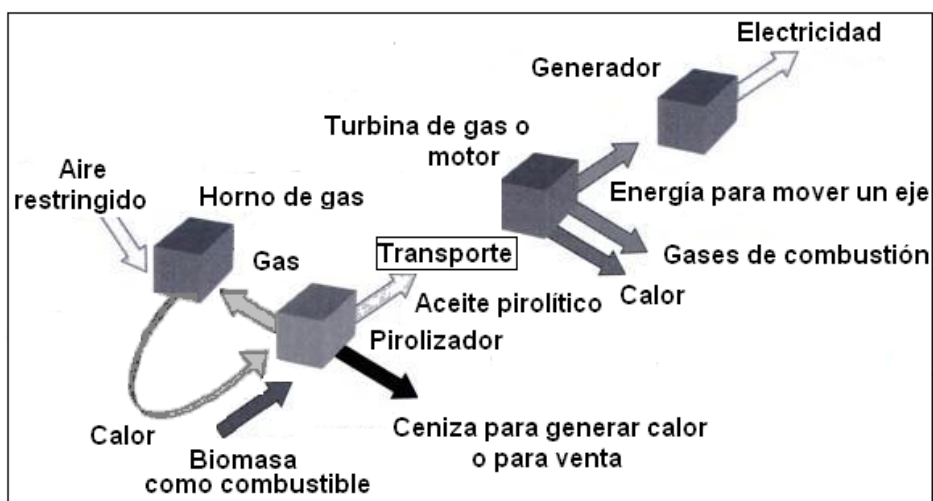


Figura 2.10 Esquema de una planta de pirólisis (Sims, 2002)

Los reactores pirolíticos operan a presiones cercanas a la atmosférica y a temperaturas adecuadas para volatizar la biomasa en líquidos y gases quedando como residuo carbón vegetal. Cuando las temperaturas se controlan alrededor de los 205°C se obtienen principalmente líquidos, mientras que con temperaturas cercanas a 650°C se obtienen gases como producto principal. En la Tabla 2.5 se muestran la mezcla de productos formados por las diferentes modalidades de pirólisis para maximizar la obtención del aceite pirolítico, el residuo sólido o el gas.

En general los gases obtenidos de la pirólisis son de bajo poder calorífico (16 a 18 MJ/m³) y casi siempre una parte importante de ellos se quema para proporcionar el calor requerido por el proceso. Mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800°C a 1200°C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspectos aceitosos y de bajo pH, denominados aceites de pirólisis. Pudiéndose obtener combustibles sólidos (leña, astillas, carbón vegetal), líquidos (biocarburos, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos) y gaseosos (biogás, hidrógeno).

Tabla 2.5 Productos obtenidos en las diferentes modalidades de pirólisis (Sims, 2002)

Modalidad	Temperatura	Tiempo	Líquido (%)	Residuos sólidos (%)	Gas (%)
Pirólisis rápida	Moderada	Corto	75	12	13
Carbonización	Baja	Muy largo	30	35	35
Gasificación	Alta	Medio	5	10	85

Existen distintos procesos de conversión pirolítica, que emplean diferentes materias primas, tipos de reactor, condiciones de operación y que obtienen productos diferentes. Los sistemas basados en retortas verticales son los de uso más común en procesos de alimentación continua (Concheiro y Viqueira, 1985). Las mayores diferencias entre los sistemas pirolíticos se presentan en la manera como se proporciona el calor auxiliar requerido en el proceso. La destilación destructiva de madera y otros productos agrícolas para producción de metanol, carbón vegetal y gas de bajo poder calorífico es el proceso de pirólisis. Los aceites obtenidos de la pirólisis tienen un bajo contenido de azufre, cenizas y nitrógeno, y al quemarse, crean pocos problemas de contaminación ambiental. Por otra parte, son ácidos y sensibles al calor por lo que requieren de ciertas precauciones al ser manejados y almacenados. En la tabla 2.6 se muestran los poderes caloríficos de los diversos productos obtenidos del proceso de la pirólisis.

Entre los sistemas comercialmente disponibles o en estado de desarrollo avanzado pueden distinguirse:

- El de “Tech air”, desarrollado en el Instituto de Tecnología de Georgia
- El de Garret Energy Research, para estiércol
- El de la Autoridad del valle de Tenesse (TVA), en una unidad transportable, para desechos de madera
- El sistema francés Nilmelior.
- Los hornos alemanes DRP
- EL flash de pirólisis de origen occidental, desarrollado para desechos urbanos con alto contenido de celulosa
- El horno de Nichols-Herreschoff, usado ampliamente como base para la producción de carbón vegetal “rostizado”

Tabla 2.6 Poderes caloríficos de los diversos productos resultantes en el proceso de pirólisis (Williams, 2005)

Productos obtenidos	Poderes caloríficos
Residuos sólidos	(MJ/Kg)
Desechos sólidos urbanos	19
Llantas	29
Madera	33
Carbón bituminoso	30
Aceites	(MJ/Kg)
Desechos sólidos urbanos	25
Llantas	42
Biomasa	25
Diésel	46
Gases	(MJ/m³)
Desechos sólidos urbanos	18
Llantas	40
Madera	16
Gas natural	37

2.2.2 Proceso bioquímico

La conversión biológica de la biomasa en combustibles puede lograrse mediante la digestión (biometanación) o la fermentación (producción de etanol a partir de cultivos ricos en azúcares o almidones o, después de la polimerización química o enzimática, de lignocelulosa en azúcares simples y lignina). Los dos procesos son anaerobios e involucran un proceso de fermentación. La diferencia entre ellos reside en el tipo de microorganismos, sus actividades de digestión y los productos obtenidos. En ambos casos el primer paso en la conversión es un proceso de hidrólisis, en que la materia orgánica compleja se rompe en azúcares solubles al reaccionar la biomasa con agua en presencia de ácido o enzimas

2.2.2.1 Digestión

En el proceso de biometanación, desperdicios orgánicos o biomasa con alto contenido de humedad se alimentan a un recipiente llamado digestor biológico. Por la acción de microorganismos adecuados la materia orgánica se transforma en biogás, (una mezcla de bióxido de carbono y metano esencialmente), que puede aprovecharse como combustible, produciéndose además lodos residuales empleados como mejoradores de suelos o fertilizantes. El tratamiento de la materia orgánica mediante la digestión cumple así con tres funciones:

- a) Producir gas combustible.
- b) Producir mejoradores de suelos, fertilizantes o complementos de alimentos forrajeros.
- c) Reducir la contaminación ambiental producida por la disposición de desechos no tratados.

Los procesos de descomposición de materia orgánica pueden llevarse a cabo en presencia de oxígeno (aerobios) o en ausencia del mismo (anaerobios), dependiendo del tipo de microorganismos que producen la hidrólisis enzimática de la materia orgánica. Para la producción del biogás se emplean los procesos anaerobios. La digestión se realiza en tres procesos degenerativos como lo muestra la Figura 2.11; a) Hidrólisis enzimática, en que los sólidos fermentables son convertidos en compuestos solubles; b) Acidogénesis que los compuestos solubles (azúcares), se convierten en ácidos orgánicos volátiles, como el acético, el bórico y el piónico, y c) Metanogénesis en que los ácidos orgánicos volátiles se convierten en biogás mediante la acción de una familia de bacterias.

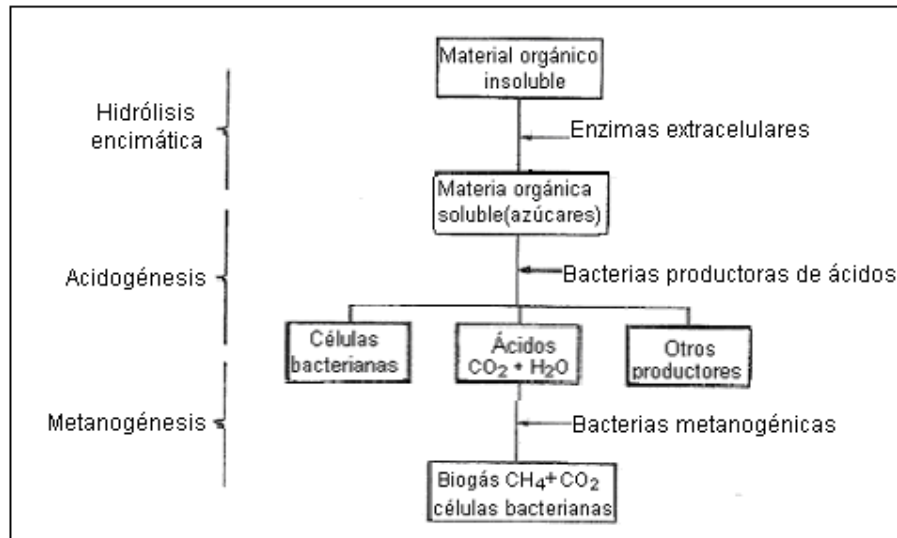


Figura 2.11 Etapas del proceso de digestión (Concheiro y Viqueira, 1985)

Las bacterias productoras de gas metano, llamadas por ello metanogénicas, se encuentran entre los organismos más estrictamente anaerobios que se conocen, e incluyen los géneros: *Metanococcus*, *Metanobacterium*, *Metanosarcina*, *Metanospirillum* y *Metanobacillus*. Usualmente no son móviles, crecen con lentitud (3 días aproximadamente) y se encuentran en forma natural en estiércol, pantanos y aguas negras. Muchas de las bacterias metanogénicas pueden vivir en medios que son básicamente fuentes simples de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre. Sin embargo, la presencia adicional de moléculas orgánicas complejas estimula su crecimiento, y algunas cepas pueden depender de éstas como fuentes orgánicas para crecer. La relación carbono/nitrógeno en el hábitat de las bacterias (mezcla estiércol/agua) es muy importante; generalmente se procura que esta relación sea de 20:1 a 30:1.

Según las temperaturas a las que ocurren, los procesos de digestión pueden clasificarse en:

- a) Sicrofílicos, que ocurren entre 10 y 25 °C
- b) Mesofílicos, que ocurren entre 35 y 42 °C
- c) termofílicos, que ocurren entre 50 y 55 °C y entre 55 y 60 °C

Los procesos en el rango sicrofílico tienen poca importancia por la pequeña tasa de actividad que presentan las bacterias metanogénicas que se desarrollan a esas temperaturas. Los procesos de digestión operan a presión atmosférica, con un nivel de pH en la mezcla de entre 6 y 8 y requieren control de la temperatura. La concentración de sólidos totales en la mezcla es generalmente entre 5% y 15 %. Los principales factores que fijan el costo de un digestor son la tasa de producción de gas metano y lodos (y la calidad de éstos), y el tiempo de retención de la mezcla en el interior del digestor. Según la forma de alimentación pueden distinguirse dos tipos diferentes de digestores: Intermitentes y continuos (Figura 2.12). Cuando la alimentación es intermitente, el digestor se llena y

se cierra. La producción de biogás se manifiesta algún tiempo después, alcanza un máximo y vuelve a declinar.

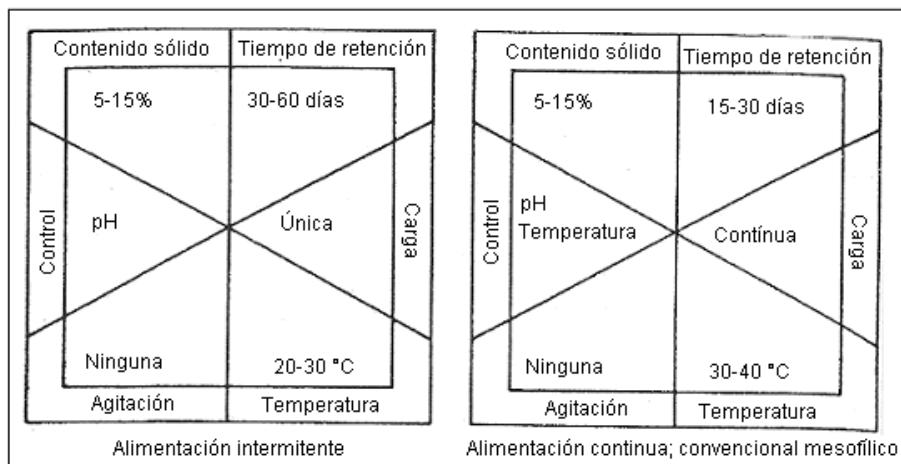


Figura 2.12 Diseños de control en digestores de tipo intermitente y continuo (Concheiro y Viqueira, 1985)

Al llegar a una producción muy pequeña de biogás, el digestor se destapa, se limpia y se cierra. Ésto ocurre típicamente cada 3 ó 6 meses. En la Figura 2.13 se muestra el diseño de flujo tapón y del filtro anaeróbico, las características de éstos y otros sistemas digestores se presentan en la Tabla 2.7. En los digestores de alimentación continua, una vez establecidas las condiciones normales de operación, la materia orgánica se alimenta diariamente (una o dos veces por día) de acuerdo al volumen del digestor y al tiempo de retención hidráulica de diseño.

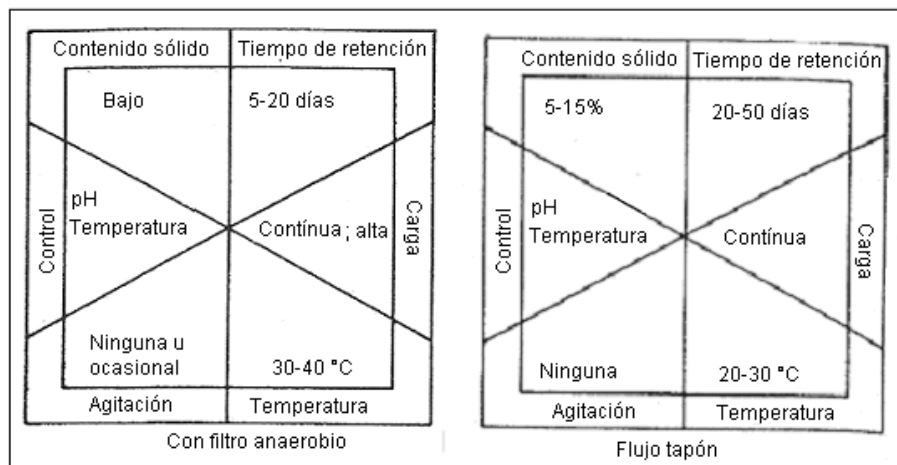


Figura 2.13 Diseños de control en digestores tipo flujo tapón y de filtro anaerobio (Concheiro y Viqueira, 1985)

Tabla 2.7 Diversos sistemas de digestores (Concheiro y Viqueira, 1985)

Sistema digestor	Tipo	Características
	Lagos de estabilización	Rellenos sanitarios y fosas sépticas
	Digestor convencional	Tanques para desechos donde tiene lugar la estabilización biológica y la separación sólido-líquido

Una etapa	Digestor tipo bolsa	Contruido con materiales plásticos, son compactos y ligeros con geometrías cilíndricas e instalados con el eje horizontal
	Digestor de alto rendimiento	Incluye un mecanismo para la agitación de la mezcla y medio de calentamiento para asegurar la temperatura óptima
Dos etapas	Digestor de dos pasos	Combinación de un digestor de alto rendimiento y uno convencional, que se emplea para concentrar y separar los sólidos
	Digestor de dos etapas	Dos digestores de alto rendimiento conectados en serie, uno para la producción de ácido y el otro para la del metano
De contacto anaerobio	Recirculación de sólidos	Una fracción de los sólidos que llegan al segundo tanque del digestor de dos etapas se recircula hacia el primero, reduciendo el volumen requerido en el segundo
	Biomix	Consiste en unabomba tipo termosifón para mezclar el digestor y controlar la formación de la nata, y un cambiador de calor para elevar la temperatura a 35°C, cuenta con enfriador -separador por gravedad que separa los sólidos por choque térmico
De filtro anaerobio	Una capa de piedras o arena a la que se adhieren los microorganismos, aumentándolo con ello la zona de actividad biológica, los tiempos de retención son pequeños y la eliminación de sólidos suspendidos es alta	
De flujo tapón	Un tanque estrecho, largo, alimentado por un extremo, los desechos avanzan hacia el otro extremo por gravedad, generalmente se aplican para desechos con alto contenido sólido	

En la Tabla 2.8 se presentan algunas características de los diferentes tipos de estiércol y las cantidades de biogás que pueden esperarse de su digestión. La alimentación máxima del digestor depende de la naturaleza del desecho y se determina experimentalmente.

Tabla 2.8 Características de varios tipos de estiércol y eficiencia en la degradación anaerobia a gas metano (Concheiro y Viqueira, 1985)

	Peso vivo	Humedad	Estiércol húmedo	Sólidos totales	Sólidos volátiles	Producción de biogás
	Kg	%	Kg/día	Kg/día	Kg/día	m ³ /KgSV
Vaca lechera	727	80	60	7.5	6.27	-
Vaca	-	-	-	-	-	0.09-0.3
Vaca	500	500	41.7	-	3.89	-
Caballo	454	75	20.4	4.3	3.41	-
Caballo	500	-	28	-	4	-
Cerdo	227	-	11.4	1	0.73	-
Cerdo	91	82	5.9	0.5	0.44	-
Cerdo	225	-	11.5	1.65	1.35	0.19
Carnero	45	68	1.8	0.4	0.39	-
Borrego	50	-	2	-	0.43	-
Pollo	-	-	-	-	-	0.3
Pollo	5	-	0.31	-	0.053	-
Aves de corral	4.5	-	0.27	0.079	0.058	0.0049
Humano	-	-	-	0.135	0.113	-

Los más investigados han sido de ganado vacuno o porcino, siguiéndoles los de aves de corral (gallinas principalmente), caballo y carneros. El estiércol de ganado vacuno es el más favorable ya que una vaca excreta aproximadamente el 8% de su peso vivo al día entre estiércol y orina. El estiércol de ganado porcino posee una notable tendencia a bajar su nivel de pH durante el proceso de digestión, quizá por formarse grandes cantidades de ácidos grasos volátiles. Todos los estiércoles son aprovechables en digestores.

2.2 Manejo, tratamiento y disposición de residuos sólidos municipales

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), un residuo es todo material o producto que se desecha, que puede encontrarse en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso, estar contenido en recipientes o depósitos, y ser susceptible de valoración o sujetarse a tratamiento o disposición final (SEMARNAT, 2006b). Hay dos grandes tipos de residuos: Los orgánicos o materiales biodegradables (sobras de comida, hojarasca, papel, cartón, madera), y residuos inorgánicos o no biodegradables, como vidrio, plástico, metales y otros materiales inertes. La Figura 2.14 muestra la composición de los residuos sólidos generados en México actualmente.

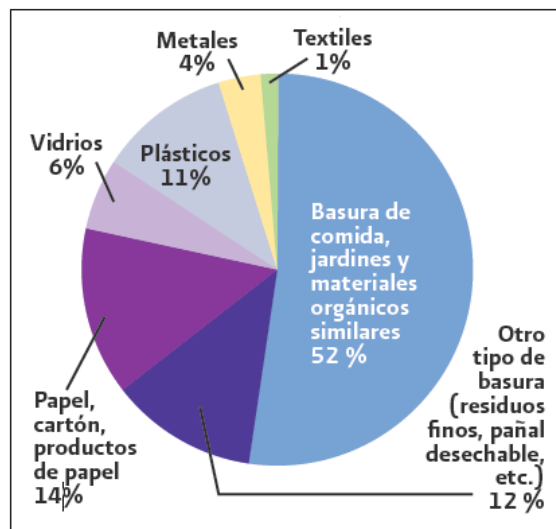


Figura 2.14 Composición de los residuos sólidos (SEMARNAT, 2009b)

La basura acumulada en las calles altera la imagen y la infraestructura urbanas (SEMARNAT, 2006b). La descomposición de la basura produce malos olores y origina plagas y fauna nociva, lo que a su vez genera enfermedades entre la población. Esta situación se agrava cuando se depositan los residuos en tiraderos clandestinos, carreteras, barrancas, situación que empeora al mezclarse residuos de los hogares, restos de madera, cajas de cartón plásticos, escombro, metales, estopas, botes de aceite, focos, entre muchos otros.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son los generados principalmente en los hogares. El volumen estimado de generación nacional de RSU creció, entre 1997 y 2008, alrededor de 28%, pasando de 29.3 a 37.6 millones de toneladas. La generación per cápita diaria creció en el mismo periodo de 840 a 970 gramos (Figura 2.15.) En 2008, las entidades que generaron mayor volumen de RSU fueron México (16.4% del total nacional para ese año), Distrito Federal (12.6%) y Jalisco (7.2%). En contraste, Colima, Baja California Sur, Campeche, Nayarit, Tlaxcala, Zacatecas y Aguascalientes contribuyeron en conjunto con 5.1% a la generación de RSU.

Si se considera la generación por tipo de localidad, las zonas metropolitanas fueron las mayores generadoras, con el 47% de generación, las localidades rurales o semirurales con el 12%, las ciudades pequeñas con el 7% y las ciudades medias con 34%. Paralelamente al crecimiento en la generación, la composición de los residuos también ha cambiado: Mientras que en la década de los años cincuenta el porcentaje de residuos orgánicos oscilaba entre 65 y 70%, para 2008 se había reducido al 52%.

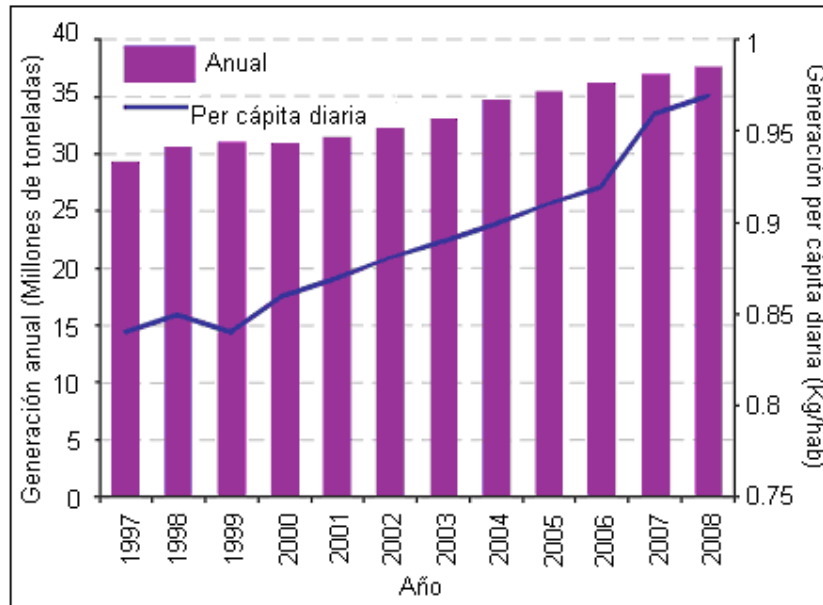


Figura 2.15 Generación de residuos sólidos municipales (SEMARNAT, 2009b)

En 2008 se recolectaba en el país cerca del 90.1% del total de residuos sólidos urbanos (RSU) generados. Las entidades con la mayor recolección fueron Aguascalientes (98% del volumen generado), Distrito Federal y Nuevo León (ambos con 97%) y Baja California Sur (96%), mientras que las que tuvieron la menor recolección fueron Tabasco y Michoacán (ambos con 84%) y Veracruz (83%). En las grandes zonas metropolitanas del país, la cobertura en la recolección de los residuos alcanza 95%, mientras que en las ciudades medias varía entre 75 y 85% y en las pequeñas áreas urbanas entre 60 y 80% como se aprecia en la Figura 2.16.

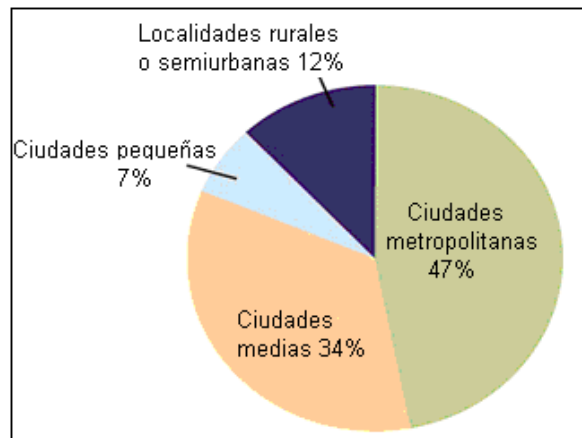


Figura 2.16 Generación de residuos sólidos municipales por tipo de localidad (SEMARNAT, 2009b)

Los habitantes de estados muy urbanizados como el Distrito Federal, Nuevo León, Estado de México y Baja California generaron en el año 2004 más de un kilo de residuos diarios por persona, en contraste con lo que generaron en promedio los habitantes de estados menos urbanizados como Oaxaca, Chiapas, Hidalgo, Zacatecas y Tlaxcala, cuya generación no rebasó los 700 gramos diarios.

El manejo integral y sostenible de los residuos sólidos combina flujos de residuos, métodos de recolección y procesamiento, de lo cual derivan beneficios ambientales, optimización económica y

aceptación social en un sistema de manejo práctico para cualquier región. Ésto se puede lograr combinando opciones de manejo que incluyen esfuerzos de reuso y reciclaje, tratamientos que involucran compostaje, biogasificación, incineración con recuperación de energía, así como la disposición final en rellenos sanitarios.

2.2.1 La jerarquía del manejo de los residuos sólidos municipales

El concepto de manejo integral de los residuos sólidos municipales RSM le da una nueva dimensión al enfoque comúnmente conocido como la *jerarquía del manejo de residuos sólidos* referido en la Figura 2.17. El cual prioriza las opciones de manejo de residuos en un orden de preferencia que parte de la prevención en la generación, del re-uso, reciclaje o compostaje, de la incineración con recuperación de energía, de la incineración sin recuperación de energía, y del confinamiento en rellenos sanitarios como última opción. Este enfoque ha influido significativamente en las decisiones y estrategias de manejo de residuos a nivel local, nacional e internacional durante los últimos años (SEMARNAT, 2001).

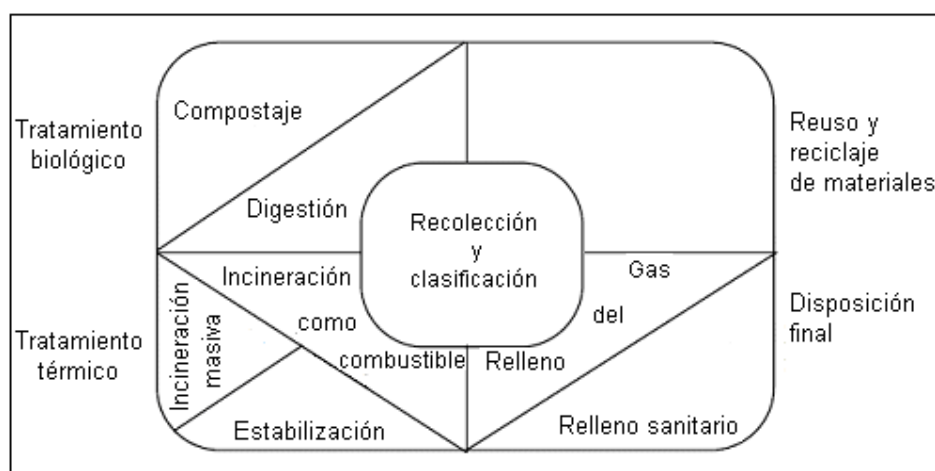


Figura 2.17 Manejo integral y sustentable de los RSM (SEMARNAT, 2001)

2.2.1.1 Reciclaje

Aunque el reciclaje es muy favorecido por la sociedad, en ciertos casos puede llegar a tener algunos aspectos negativos. Como parte de una estrategia de manejo integral de los RSM, el reciclaje de subproductos puede ayudar a conservar recursos, evitar que materiales valorizables contenidos en los residuos vayan a disposición final y hacer participar al público en general en el tema. Sin embargo, en muchos casos se han creado expectativas irreales acerca de la contribución que el reciclaje puede hacer en un sistema de manejo integral de RSM (SEMARNAT, 2001). El reciclaje es un proceso complejo que en sí consume recursos durante el transporte, selección, limpieza y reprocesado de los materiales reciclables. Además, en este proceso también se producen residuos.

Por lo antes expuesto, el reciclaje debe ser considerado como parte de una estrategia integral para manejar los residuos, no como un fin en sí mismo, y promoverse únicamente cuando ofrece beneficios ambientales globales. Un manejo sostenible de residuos que proporcione mejoras ambientales reales de una manera económica y socialmente aceptable, sólo puede ser alcanzado a través de metas que sean parte de objetivos ambientales más amplios, tales como: Reducción de gases de efecto invernadero, disminución de tasas de residuos que llegan a rellenos sanitarios y maximización del aprovechamiento de los recursos.

El beneficio ambiental de reciclar varía de acuerdo con los materiales y también conforme a las tasas de reciclaje, de manera que altas tasas de reciclaje no son necesariamente iguales a mejoras ambientales globales. Por ejemplo, se ha encontrado que bolsas de plástico no reciclables son

mejores que las botellas reciclables en términos de consumo de energía, de agua y de emisiones a la atmósfera y en cuanto a la generación de residuos sólidos, ya que desde un inicio usaron mucho menos material.

El reciclaje de RSU en el país continúa siendo muy bajo con respecto al total generado: en 1998 fue del 2.4% y en 2008 sólo alcanzó 3.6%. La mayor proporción de materiales reciclados en 2008 fue la de papel y cartón (42.1%), seguida por la de vidrio (28.7%) y el metal (27.8%) como se ve en la Figura 2.18.

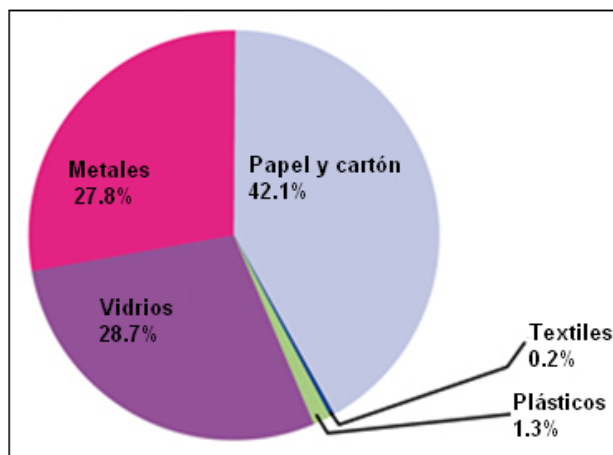


Figura 2.18 Reciclaje de residuos sólidos municipales por composición (SEMARNAT, 2009b)

Los beneficios obtenidos del reciclaje son mayores cuando los residuos se componen de materiales valorizables limpios y disponibles en grandes cantidades, como ocurre en fuentes comerciales e industriales, de manera que el mayor esfuerzo debe de ir dirigido hacia estas fuentes. También, se considera que la selección obligatoria de materiales reciclables a nivel domiciliario e institucional, constituye una acción esencial para el éxito de cualquier programa de reciclaje. Los residuos domiciliarios contienen pequeñas cantidades de muchos materiales mezclados y frecuentemente contaminados, no todos los cuales pueden ser reciclados. La clave es integrar el reciclado de los residuos domiciliarios con los residuos comerciales, como parte de una estrategia de gestión integral

Entre los factores a considerar para un programa de reciclaje, así como para la industrialización y comercialización de los productos reciclables recuperados de los RSM se encuentran los siguientes (SEMARNAT, 2001):

- El material recuperado en un programa de reciclaje es un residuo, hasta que no se le encuentre un mercado para que sea transformado en un producto útil.
- La comercialización de los materiales reciclables es un factor importante en la toma de decisiones para el establecimiento de un programa municipal de separación en la fuente y reciclaje de residuos. La determinación de qué materiales reciclar, cómo separarlos y recolectarlos, cuánta preparación requieren y cómo lograr todo lo anterior, dependerá de las opciones de comercialización disponibles. Frecuentemente, el aspecto más problemático de un programa de reciclaje es encontrar mercados estables para los materiales recuperados.
- La comercialización ineficiente puede traducirse en pérdida de ingresos, problemas administrativos y desinterés del público en participar en las etapas de selección y acopio de materiales reciclables. Por lo anterior, al implantar un programa de reciclaje, es fundamental dar prioridad a la comercialización de los subproductos reciclados.

- La comercialización de los materiales secundarios involucra la necesidad de contactar a una empresa (micro, pequeña o grande) y llegar a un acuerdo de compra-venta con ella, de manera que tome el material "tal cual" o con un mínimo de acondicionamiento para usarlo en la manufactura de un nuevo producto.
- Otra alternativa, consiste en localizar a un comprador que limpie el material o lo procese en forma sencilla, para convertirlo en materia prima aceptable por una tercera empresa industrial.

Composición de la industria del reciclaje

La industria del reciclaje consiste en una gran variedad de negocios que incluyen desde individuos que trabajan por su cuenta, hasta grandes empresas multinacionales, las cuales se agrupan en cinco tipos:

Recolectores: Cuya función primaria es identificar materiales reciclables y transportarlos desde la fuente hasta el local de los compradores. En este caso se encuentran los pepenadores y los ropavejeros, así como los pequeños empresarios que adquieren residuos y recortes industriales.

Acopiadores-acondicionadores: Los cuales compran materiales reciclables, les aplican un proceso simple (como selección, densificación y flejado) y los revenden a una empresa manufacturera. Algunos se especializan en materiales reciclables específicos y llevan a cabo operaciones más amplias tales como lavado, triturado, aplastado o compactación de los mismos, antes de venderlos.

Corredores independientes: Que compran o aceptan materiales reciclables, los venden a más de un usuario final y organizan la transferencia de los materiales, todo ello por una tarifa o un porcentaje de la operación.

Recicladores: Empresas que someten al material recolectado a un proceso de limpieza y acondicionamiento industrial, para poder ser usado nuevamente en un proceso industrial como materia prima.

Usuarios finales: Quienes adquieren y procesan grandes cantidades de subproductos reciclados, para uso en sus operaciones de manufactura.

2.2.1.2 Tratamiento biológico

Dentro de un sistema de manejo integral de residuos sólidos, el tratamiento biológico se enfoca en los residuos orgánicos húmedos, como los alimentos y los residuos de jardín. La fracción orgánica varía significativamente entre lugares y estaciones. En la mayoría de los países industrializados la fracción orgánica representa 20% de los residuos sólidos municipales. En países en vías de desarrollo, la materia orgánica llega a exceder 50% de éstos.

El seleccionar los residuos orgánicos dentro de una estrategia integral tiene varios beneficios: Convertir los residuos orgánicos en un producto útil (compost) ó recuperar energía (SEMARNAT, 2001). El modo más simple para introducir el tratamiento biológico a un sistema de manejo integral de residuos sólidos es promover la elaboración de compost en los domicilios. Esto evita costos de recolección y mantiene el material orgánico completamente separado de los otros residuos, lo que mejora de manera significativa su manejo. En dado caso que el compostaje casero no sea una opción viable, se pueden recolectar los residuos orgánicos por separado para ser llevados y tratados en plantas, ya sea de compostaje o para su digestión. En el Distrito Federal, existen 13 plantas de compost, en las que se procesan residuos orgánicos para su aprovechamiento (SEMARNAT, 2006c). En la Tabla 2.9 se enlistan dichas plantas y sus características principales.

Separar la fracción húmeda de los residuos sólidos incrementa el valor de otros residuos y reduce la cantidad de gas o lixiviado generado en los rellenos sanitarios. Los dos métodos básicos para tratar

los residuos orgánicos son: Aerobio (en presencia de oxígeno) y anaerobio (en ausencia de oxígeno). El compostaje se lleva a cabo en condiciones aerobias, ya sea a nivel hogar o en grandes plantas de compostaje.

Tabla 2.9 Características de las plantas de compost (SEMARNAT, 2006c)

Planta	Capacidad instalada (ton/año)	Capacidad de operación (ton/año)	Tipo de proceso	Tiempo de producción (meses)	Materia prima
Álvaro Obregón	5,280	877	pilas aerobias	4	Troncos, ramas y maleza provenientes de: -Luz y fuerza -Jardines del pedregal
Bordo Poniente	73,000	36,500	pilas aerobias	4	Material de poda, hortalizas, lodos Alimentos caducos de: -Central de abasto -Delegaciones -Particulares en alto volúmen -DGSU
Cuajimalpa de morelos	480	480	pilas aerobias	3	Poda proveniente de: -Parques y jardines
Iztapalapa	131,400	2,256	pilas aerobias	1	Poda de: -Residuos de panteón -Parques y jardines
Milpa Alta (8 plantas)	164	114	pilas aerobias	3	Restos provenientes de: -Centro de acopio del nopal y verdura -Poda de parques y jardines -Residuos orgánicos domiciliarios
Xochimilco	9,125	9,125	pilas aerobias	3	Material de poda y estiércol de: -Parques y jardines -Caballerizas

2.2.1.3 Tratamiento termoquímico

Existen tecnologías sólidas que procesan grandes volúmenes de residuos mezclados a partir de los cuales se puede recuperar energía útil, extendiendo significativamente la vida productiva de los rellenos sanitarios. A pesar de estos beneficios, el tratamiento térmico de los residuos frecuentemente genera resistencia pública. Existe la percepción de que el tratamiento térmico impide que sean reciclados los materiales y que las emisiones son peligrosas para la salud y el ambiente. La conversión térmica puede llevarse a cabo de varias maneras: Incineración (generalmente con recuperación de energía), pirólisis y gasificación (SEMARNAT, 2001), las cuales han sido explicadas en párrafos anteriores.

La energía recuperada de los procesos de tratamiento térmico puede ser convertida en vapor de proceso para la industria o en electricidad. El tratamiento térmico puede reducir el volumen de los residuos hasta 90%, contribuyendo significativamente a disminuir el aporte a otras opciones de manejo dentro de un sistema integral, particularmente al relleno sanitario. En ciertos países de Europa existe legislación que limita el volumen del contenido orgánico de los residuos que van a los rellenos sanitarios. Estos requisitos solo se cumplirán si el tratamiento térmico es parte integral de un manejo de residuos sólidos. Existe mucha ansiedad pública respecto de los potenciales efectos que las emisiones de plantas de tratamiento térmico pueden tener en la salud humana y en el medio ambiente. La emisión de dioxinas y compuestos relacionados es de particular preocupación. Por

esta razón una parte muy significativa del costo de las plantas de tratamiento térmico se invierte en equipos de control de emisiones a la atmósfera (SEMARNAT, 2001).

La remoción de materiales no combustibles para ser reciclados como por ejemplo vidrio y metal, mejora la combustión, incrementando el poder calorífico del residuo a incinerar. Los procesos de tratamiento térmico generan residuos que requieren disposición adecuada. En el caso de la incineración estos residuos incluyen cenizas.

Las cenizas más pesadas que se recolectan en la cámara de combustión pueden disponerse en rellenos sanitarios o pueden ser usadas como agregados en la construcción de carreteras o en la industria de la construcción, dependiendo de su composición y de la normatividad aplicable. Las cenizas ligeras que se recolectan en los equipos de control de emisiones a la atmósfera típicamente contienen altos niveles de metales y sales, por lo que deben ser tratadas antes de ser dispuestas. Las opciones de tratamiento a considerar incluyen la vitrificación, la solidificación, la extracción química o la disposición final en rellenos sanitarios especiales.

2.2.2 Vertedero controlado

Un vertedero se considera controlado cuando se toman las medidas oportunas para evitar todo lo que sea nocivo o molesto (López y col., 1975). El establecimiento de un vertedero controlado implica no solo la utilización de medios mecánicos, también de las siguientes reglas:

- Las basuras se descargan en capas sucesivas de espesores de 1.5 a 2 m.
- Las capas se nivelan y se limitan por taludes, al objeto de que las lluvias no las arrastren. Se operará sobre un frente limitado al objeto de limitar los taludes descubiertos.
- El depósito debe ser debidamente compactado y no debe contener clase alguna de bolsas de aire. Los objetos voluminosos deben ser quebrados o divididos y colocados preferentemente en la base de los taludes.
- Los depósitos deben recubrirse con tierra o con materias apropiadas que constituyen la cobertura.
- Se colocarán telas metálicas móviles en la zona de explotación para evitar que vuelen los papeles en el momento de la descarga. Asimismo se aconseja cercar el vertedero con tela metálica de 1.5 m de altura como mínimo y rodearlo de árboles. El cerramiento impedirá la entrada de: personas extrañas y permitirá un adecuado control por la puerta existente.

Debe prohibirse terminantemente la rebusca. Al colocar la basura de esta forma, la materia orgánica que contiene comienza a fermentar de forma aerobia y anaerobia en las capas superior e inferior, respectivamente.

Existen tres clases de vertederos controlados:

2.2.2.1 Vertedero controlado tradicional

En este procedimiento no se coloca, si ello es posible, una nueva capa hasta que la anterior no baje su temperatura a la natural del suelo. El depósito debe compactarse suficientemente pero sin exceso para evitar las bolsas de aire que favorecen los incendios. La basura debe ser recubierta de tierra antes de las 72 horas, y con una capa de 10 a 50 cm de espesor. En el recubrimiento es especialmente recomendable el empleo de arena y de chatarra, pues asegura la circulación del agua de lluvia y evita la formación de aguas estancadas. En este tipo de vertederos, los malos olores se evitan con la capa de recubrimiento, como también la salida al exterior de larvas y moscas y los roedores no encuentran comida a su alcance. Así mismo, es difícil que se produzcan incendios, dado que el depósito queda suficientemente comprimido y por lo tanto no hay suficiente aire en su interior para la combustión.

2.2.2.2 Vertedero de basura compactada

Se trata de un sistema que se está extendiendo rápidamente y, si se controla debidamente, los resultados son alagüños, sin peligro ni molestia alguna. La compactación se efectúa mediante el rodaje de los vehículos de la recogida sobre el vertedero, o bien con bulldozers especiales que aseguran la nivelación y su desplazamiento hacia el frente de la descarga. Con estos bulldozers especiales se consigue tal compactación que no es precisa la capa de cobertura; sin embargo, sí recomendamos el recubrimiento de los taludes en el caso en que éstos sean también compactados.

Los resultados obtenidos con el vertedero compactado son similares a los que se obtienen con el vertedero controlado tradicional, pero con la ventaja de que en el compactado resulta imposible el incendio del vertedero: por el contrario. La fermentación será totalmente anaerobia y por tanto habrá desprendimiento de metano.

2.2.2.3 Vertedero con basura previamente triturada

Este procedimiento es de utilización relativamente reciente y presenta grandes ventajas basándose en los principios siguientes:

- Los cuidados para evitar las molestias son menores que en los otros sistemas.
- Se puede circular fácilmente sobre el vertedero.
- Triturada la basura, su colocación en capas es más fácil, el producto es más denso y homogéneo, no hay lugar a bolsas de aire y no es preciso un compactado especial. Dado que con el simple paso de los camiones el vertedero queda en condiciones adecuadas facilitando la fermentación tanto aerobia como anaerobia, la basura triturada no atrae moscas, roedores y pájaros.

La basura triturada es aireada uniformemente, por lo que la fermentación aerobia transforma muy rápidamente las materias orgánicas cercanas a la superficie, constatando una nueva reducción de volumen después de la fermentación. Reiterando que no es necesaria la capa de cobertura, extendiéndola únicamente al cerrar el vertedero para cultivar una zona verde, un campo de golf, etc. Las capas de basura deben limitarse estrictamente a 2 m de espesor, y dejar transcurrir un período de dos meses para cubrirla con otra capa igual.

La instalación de molienda de la basura puede estar situada en la estación de transferencia, o bien en el mismo vertedero. Para la instalación de un vertedero controlado por cualquiera de los dos sistemas citados, es interesante elegir una depresión del terreno, pero haciendo un estudio geológico adecuado para evitar filtraciones a agua subterránea o arrastres de corriente de agua superficial.

2.2.3 Relleno sanitario

El relleno sanitario es el método de disposición final de la basura más completo y de menor costo en inversión que existe, siempre que se cuente con un terreno a bajo costo; es también uno de los métodos más antiguos. La Figura 2.19 muestra las modalidades de los diversos rellenos sanitarios. Un buen relleno sanitario se debe apegar a estrictos códigos de operación basados en principios sólidos de ingeniería. Estos principios se definen cada vez mejor conforme avanza el conocimiento sobre el comportamiento de los materiales de desecho en las condiciones del relleno.

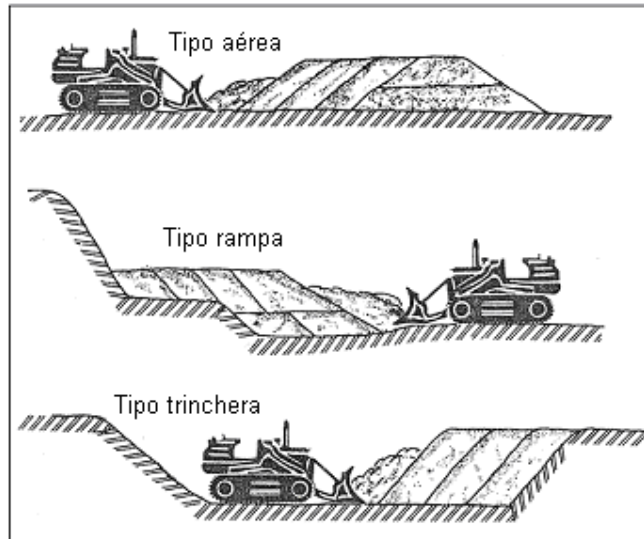


Figura 2.19 Diferentes modalidades de rellenos sanitarios (Trejo, 1999)

Algunas de las principales ventajas de este método son las siguientes:

- Si se consigue un terreno a bajo costo, es el método más económico para la disposición de los desechos sólidos.
- La inversión inicial es baja comparada con otros métodos de disposición.
- Es un método completo de disposición final; es decir, no deja residuo.
- Se puede poner en operación en corto tiempo.
- Recibe todo tipo de desechos sólidos, con esto se elimina la necesidad de colecciones separadas.
- Es flexible ya que puede disponer cantidades mayores o menores de basura con poco personal o equipo adicional.
- Una vez terminado el proceso, el terreno se puede habilitar como campos deportivos, aeropuertos, estacionamientos, etc.

Sin embargo, también pueden existir algunas desventajas, como son:

- En áreas muy pobladas, el terreno apropiado puede no estar dentro de distancias costeables para el transporte.
- La ubicación del relleno en áreas residenciales puede tener fuerte oposición pública.
- Un relleno terminado tendrá asentamientos y requerirá mantenimiento periódico.
- Las construcciones permisibles sobre el relleno son especiales y muy limitadas debido a los gases y asentamientos.

2.2.3.1 Alargamiento de la vida útil del relleno sanitario

Entre las innovaciones recientes para prolongar la vida útil de un relleno sanitario se desarrollaron dos estrategias. La primera de ellas consiste en moler el material antes de colocarlo en el terreno. En la segunda hay que formar pacas de basura, molida o no, y proceder a colocarlas en el relleno. El empleo de tales estrategias provoca modificaciones en el comportamiento de la basura en lo que se refiere a su descomposición y lixiviación. Otra innovación es la recuperación de gas metano proveniente del relleno, controlando la descomposición de las basuras e implantando sistemas de captura y purificación del gas.

2.2.3.2 Pulverización

La modificación que se hace al relleno sanitario al utilizar la pulverización se conoce como relleno sanitario de alta densidad. Su uso se inició en Europa en los años sesenta y consiste en esparcir la basura en capas de unos 20 cm de espesor y después pasar sobre ella un equipo triturador-compactador tal como el Rotoshredder, capaz de pulverizar la basura hasta el grado de dejarla convertida en capas muy delgadas. Este equipo se diseñó en un principio para aplicaciones en el proceso de compostaje.

Una opción es triturar el material en un sitio aparte y transportarlo hasta el sitio de relleno, una vez concluida la fermentación aerobia, para su compactación (Figura 2.20). Algunas ventajas de esta alternativa son las siguientes:

- Se reducen en gran medida las molestias para los vecinos residentes
- La densidad del material cambia muy poco con el tiempo
- Los asentamientos que se producen son mínimos
- El tránsito de vehículos rodantes sobre el material no presenta problemas

El tamaño del material es de una a seis pulgadas aproximadamente. Algunos autores recomiendan que el material pueda pasar por una malla de 5 cm de abertura. Es posible que una trituración muy fina ocasione una mala aireación, mientras que, si el material queda muy grueso quizá impida una fermentación completa.

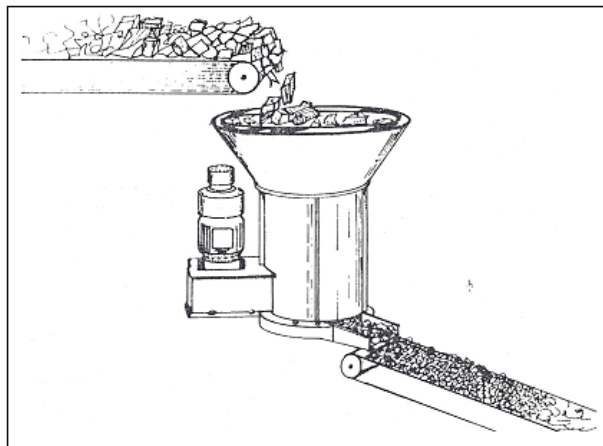


Figura 2.20 Densificador de basura por trituración (Trejo, 1999)

Ahora bien, es diverso el comportamiento de los plásticos con respecto a la molienda de los desechos. Los molinos de martillos rompen, sin problema, piezas de poliestireno y otros plásticos duros; pero los plásticos blandos como el PVC o el polietileno de baja densidad, frecuentemente se enredan en las piezas del molino y lo atascan. No obstante, el tamaño de tales materiales se puede reducir en un equipo llamado raspador que consta de un disco con protuberancias filosas que, al girar, provoca que estos materiales se desgarren.

La fermentación es, casi en su totalidad, aerobia y las propiedades de la basura se modifican de modo que no es necesario cubrirla con tierra sino hasta varios días o semanas después. Ésto permite colocar otra capa de basura sobre la anterior una vez fermentada, y así sucesivamente hasta llegar al nivel final de esa parte del relleno. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, en 1971, estableció que los rellenos de basura triturada se deben cubrir diario, hasta que se compruebe a partir de datos concluyentes, que esta práctica no es necesaria. Con respecto a la capacidad de recepción, los modernos compactadores hacen que la diferencia de densidad sea mínima con o sin trituración previa.

En el relleno de alta densidad, la descomposición de los desechos se efectúa muy rápidamente en condiciones aerobias. Para facilitar dicha fermentación se recomienda poner capas de no más de 25 cm de basura y no cubrir con tierra o con más basura durante por lo menos dos meses. Se puede facilitar la aireación pasando la máquina trituradora-compactadora entre los 15 y 30 días de haber depositado la basura.

Lo anterior implica que se requiere una gran extensión de terreno para los rellenos de alta densidad. La evaporación es grande y si no se infiltra agua se puede eliminar el lixiviado e incluso puede ser necesario humedecer, de vez en cuando, la basura recién llegada para compensar la evaporación y acelerar la fermentación aerobia. La temperatura de la fermentación aerobia es de unos 60°C y se alcanza en los primeros días del tratamiento.

Experimentos en una planta cerca de Frankfurt, Alemania, indican que la temperatura interna, así como el poder absorbente y filtrante de la basura triturada, hacen mucho más difíciles las infiltraciones y protege mejor los mantos freáticos. La producción de gas metano es casi nula en este tipo de rellenos. Sin embargo, si la densidad no es suficientemente alta (arriba de 800 kg/m³) y si se infiltra agua en el relleno en cantidad superior a la evaporada, se producirá lixiviado con potencial contaminante superior al de un relleno convencional.

Ésto se debe prever en la selección del sitio y el diseño de la instalación. No obstante, después de esta temprana descarga, el lixiviado reducirá paulatinamente su flujo y potencial contaminante, al contrario de lo que ocurre en los rellenos convencionales. La información publicada sobre pulverización de basura aún es escasa, en 1978, sólo se pulverizó el 3% de los desechos municipales del Reino Unido. En Francia había, en 1979, plantas de pequeña escala.

Otras plantas además de la de Madison (1972) son las de Poole (Marsden, Gran Bretaña, 1973), Cringle Dock (Londres, Gran Bretaña, 1973), Millhouse (Sheffield, Gran Bretaña, 1977) y se sabe que en 1979 existían siete plantas de pulverización en Estados Unidos y una en Canadá. Un estudio realizado en Sydney, Australia sobre la conveniencia de la pulverización indicó que el costo de pulverizar contra el espacio ahorrado en sus rellenos no representó mucha ventaja él principios de los años ochenta. Resultó más prometedor el diseño de estaciones de transferencia.

Aún no se sabe lo suficiente sobre el relleno de alta densidad; sin embargo, se puede estimar que el triturado de la basura reduce su volumen en un 50%, aproximadamente, y el asentado por la fermentación reduce otro 50%, de modo que se puede alcanzar un 75% de reducción. Otro prototipo europeo que se asocia con el relleno de basura molida es el camión-molino, que se usa para recolectar la basura. De éste se desarrollaron dos tipos: el Kuka-Shark con tambor rotatorio y el Norba con tambor central del tipo molino de carne. Aunque están a nivel de prototipo parece que no tuvieron mucha aceptación.

Algunas desventajas comunes de la molienda de basura son el rápido desgaste de los molinos, su costoso mantenimiento y operación. También, se puede mencionar el peligro por explosiones, ruido, fuego, proyectiles, etc., que representa la molienda de ciertos materiales. Sin embargo, la molienda es una operación siempre recomendable y a veces necesaria para la mayoría de los procesos de reutilización tales como el compostaje y la incineración entre otros.

2.2.3.3 Empaque

Desde hace mucho tiempo, el empaqueo es la forma más simple y barata de manejo y transporte de sólidos en agricultura. Ahora bien, el empaqueo se utiliza con bastante frecuencia para materiales homogéneos, de los que se conoce su compresibilidad potencial; sin embargo, la basura es heterogénea y varía de acuerdo al tiempo y al lugar. En los casos en que el relleno se encuentra muy alejado de la ciudad resulta conveniente combinar técnicas de empaque de basura con implantación de estaciones de transferencia.

De hecho, la idea del empaclado de basura se desarrolló en función del transporte ferroviario de desechos. El empaclado reduce en forma importante los problemas de insectos, roedores, fuego y olores. Los primeros rellenos sanitarios que experimentaron con pacas se iniciaron en los sesenta, cuando se descubrió que la operación se simplifica mucho, ya que sólo se necesita estibar las pacas acoplándolas de modo que no haya fisuras. La Figura 2.21 ilustra un formador de pacas. En este caso se requiere de mucho menos material de cubierta y equipo pesado que para un relleno sanitario tradicional.

Otra característica de esta innovación es la posibilidad de colocar, con facilidad y en poco tiempo, grandes cantidades de basura en un espacio físico menor. La densidad típica de un relleno sanitario en pacas es de 949 Kg/m^3 , aproximadamente, frente a los $475\text{-}593 \text{ Kg/m}^3$ de un relleno sanitario tradicional. Normalmente se estiban tres pacas de $0.9 \times 0.9 \times 1.3 \text{ m}$, una sobre otra y se les pone material de cubierta. El tiempo para prensar cada paca fluctúa entre 90 y 120 segundos. Se usan empacadoras similares que se utilizan para prensar chatarra, con 20.6 MPa de presión de trabajo.

En diversos tipos de basura se estudió el efecto de la humedad; el tamaño de los materiales; el contenido de materiales difíciles de comprimir; la presión aplicada; el tiempo dentro de la prensa; etc. En cuanto a las propiedades de las pacas se estudió la densidad obtenida, la descompresión sufrida con el tiempo: estabilidad y la fragilidad.

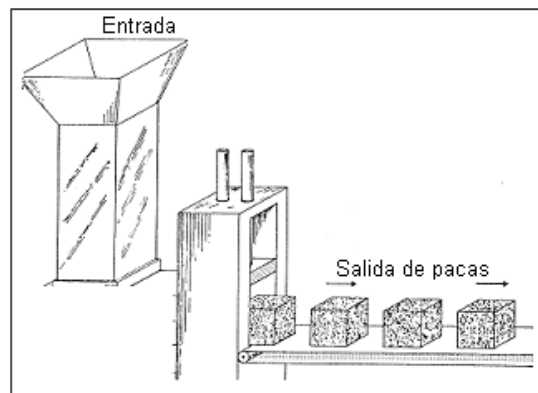


Figura 2.21 Esquema de una formadora de pacas (Trejo, 1999)

Los resultados, que todavía no se deben generalizar, indican que la densidad lograda es independiente de la densidad de la basura a la entrada. La fragilidad aumenta con la presión en la prensa hasta 13.7 MPa , aunque por encima de este valor las mejoras no son significativas. La estabilidad está relacionada con la presión aplicada y el tiempo de aplicación de ésta. Así, la estabilidad obtenida con 6.8 MPa durante cinco minutos es aproximadamente igual a la que se logra con 11.7 MPa aplicada durante un momento, y la estabilidad obtenida con 10.3 MPa durante cinco minutos es aproximadamente igual a la de 13.7 MPa aplicada durante un momento.

La humedad también es un factor importante en la estabilidad de las pacas. Se observó que con un alto índice de humedad, la estabilidad siempre fue pobre independientemente de la presión y el tiempo de prensado. La concentración de plásticos y su distribución en la paca también es importante porque éstos no se adhieren entre sí. En estos casos, resulta útil aplicar rocíos adhesivos. Si la basura se muele y después se empacla, se logra un aumento en la densidad de las pacas del 5 al 10%. Pero si el contenido de agua es alto, la descompresión después del prensado será mayor.

Con basura molida se pueden lograr pacas estables con caras planas al usar de 12.7 a 23.4 MPa , aunque esto eleva mucho los costos. Al igual que en el relleno de alta densidad, se puede mencionar que los compactadores modernos obtienen densidades cercanas a las de las pacas. Existe un proceso de empaclado, patentado desde 1968, conocido como proceso Tezuka. Aún no se

conoce lo suficiente sobre el proceso de degradación de las pacas. Se sabe que la descomposición es muy lenta, por esto, hay riesgos de contaminación por lixiviados o explosión por gases. Al compactar la basura se elimina parte de su humedad y de elementos solubles que con el tiempo formarían lixiviados. En un estudio de la Universidad de Norwestern, Estados Unidos, se observó que la permeabilidad de un relleno de pacas a alta presión es aproximadamente 1/20 de la permeabilidad de un relleno convencional con buena compactación, lo que hace suponer que tendrá un mínimo de lixiviado.

Para estudiar la posibilidad de producir gases, se sumergieron las pacas en agua a diferentes temperaturas y se fijaron diversos valores de pH favorables a la fermentación alcalina para estimular la producción de gas. En ningún caso se obtuvo gas después de tres días. Las autoridades de Estados Unidos llegaron a la conclusión de que no requieren medidas de control ambiental los lixiviados y los gases que son diferentes de los que se usan en los rellenos sanitarios convencionales. De hecho, se sugiere que el potencial de problemas ambientales en rellenos sanitarios de pacas es mucho menor que en rellenos sanitarios convencionales.

Los rellenos de pacas o basura molida tienen la ventaja, poco reconocida, de hacer más agradable un sitio de disposición de basura para los residentes locales. Se desconoce el comportamiento de asentamiento a largo plazo, pero se cree que los cambios son mínimos, incluso se aduce que la recuperación del terreno es inmediata, aunque no ha transcurrido suficiente tiempo para probados. Por otro lado, al reducir la velocidad de descomposición se extiende el periodo en que el relleno puede generar gases o lixiviados.

Hay rellenos experimentales en San Pablo, Minnesota, Estados Unidos, con un alto nivel freático donde se reciben de 500 a 600 ton/día desde 1971. El contenido de humedad usado en las pacas es del 15 al 25%. Esto les dio una óptima consistencia. Las pacas son de 0.9x0.9x1.3 metros y su tiempo de formación es de 90 a 120 segundos en una prensa de 20.6 MPa. El uso de pacas en relleno requiere que se responda a diversas preguntas sobre la descomposición. Una de ellas es si ésta se retarda o se inhibe.

Posteriormente se deberá responder a otro conjunto de preguntas sobre la filosofía de la disposición de basura en la tierra. Las estimaciones norteamericanas, a principios de la década de los ochenta, señalan que, por economía de escala, se puede decir que a partir de 300 ton/día, el empaquetado es 30% más barato que la molienda, aunque el costo del relleno con compactación resulta más barato que ambos.

2.2.4 Descomposición de la basura

Se sabe que la basura sufre un proceso de descomposición y fermentación después de depositada en un relleno sanitario. Sin embargo, es muy difícil predecir tal descomposición debido a la heterogeneidad del material y al poco conocimiento que existe sobre 105 mecanismos de descomposición que operan en la basura. Algunos de los cambios físicos, químicos y biológicos más importantes que sufre la basura durante su descomposición son los siguientes:

- Decaimiento biológico de compuestos orgánicos con generación de gases y líquidos
- Oxidación química de materiales
- Escape y difusión de gases a través del relleno
- Disolución (lixiviado) de materiales orgánicos e inorgánicos por el agua y por el propio lixiviado
- Movimiento de líquidos durante y después del relleno
- Asentamientos causados por consolidación del material en los huecos creados por la descomposición, lixiviado y paso del gas

Actualmente se distinguen cuatro etapas en la descomposición de la basura: Aerobia, anaerobia no metanogénica, anaerobia metanogénica inestable y anaerobia metanogénica estable. Los residuos

en el relleno sanitario tradicional se descomponen de forma anaerobia, y existe fermentación aerobia sólo en la capa superior. Como se sabe, la descomposición aerobia es más rápida, pero se requiere una proporción adecuada de aire y agua dentro de la basura.

Para favorecer esta descomposición, conviene que el espesor de la capa superior no sea mayor de 2 m, que la basura no esté demasiado compactada, que la capa de material de cubierta sea porosa, y que los taludes no sean excesivos. En aquellos rellenos que se manejan manualmente o con máquinas pequeñas, la descomposición aerobia ocasiona que las temperaturas a 70 cm de profundidad asciendan de 40 a 60° (entre los tres y 14 días y disminuye unos 15 °C después de 15 semanas).

Ahora bien, en los rellenos que se colocan con maquinaria pesada, las temperaturas máximas son más bajas por procesos anaerobios. Este comportamiento es prácticamente independiente del clima, ya que la elevación de temperatura está en función de la actividad microbiana aerobia. Se ha observado que las infiltraciones abundantes de agua, por ejemplo una lluvia fuerte, ocasionan una disminución momentánea en la temperatura, seguida de una rápida elevación de la misma.

Algunos estudios sobre degradación aerobia indican que al moler la basura y facilitar su oxidación con sopladores de aire a baja presión en un lapso de seis a 12 meses se logró duplicar la compactabilidad de la basura. Se cree que las condiciones anaerobias en un relleno se producen aproximadamente un mes después de que se colocó el material. La descomposición anaerobia produce gran cantidad de gases, lo que crea mayor presión en el relleno y mayor velocidad de difusión de los gases.

Un relleno es una masa en movimiento constante con importantes cantidades de material biológico. Si los lixiviados se colectan en una laguna anaerobia se puede regular la proporción de líquido en el relleno y estimular el crecimiento de microorganismos en el líquido. Ésto constituye un inóculo muy efectivo para el proceso de digestión. Diversos estudios sobre descomposición concuerdan en que los principales gases presentes en un relleno son el hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). También se detectaron trazas de ácido sulfhídrico (H_2S) y, en los casos en que el pH es altamente alcalino, se descubrió la presencia de amoníaco (NH_3).

Los primeros gases que se producen en la descomposición son CO_2 y H_2 que aparecen a los pocos días de haber depositado y cubierto los residuos. Después de dos semanas, aproximadamente, la concentración de CO_2 es superior al 80%, nivel que tiende a bajar más o menos a la mitad una vez transcurridos dos meses y después se estabiliza. El rápido aumento de CO_2 , se acompaña de una veloz descomposición de O_2 . El hidrógeno alcanza su máxima concentración, que es aproximadamente del 20%, entre la primera y la segunda semanas y luego disminuye constantemente, de modo que después de un año su concentración es alrededor de 1%.

El hidrógeno molecular presente es indicativo de que existen condiciones en la fermentación que propician la reducción de hidrógeno. En la etapa anaerobia no metanogénica, la materia orgánica se descompone en ácidos orgánicos mediante organismos facultativos y anaerobios. En la etapa metanogénica inestable el gas metano, presente en trazas desde la segunda semana, alcanza valores significativos, rebasa el 5%, y se mantiene con tendencia a aumentar durante la etapa, hasta llegar, finalmente, a concentraciones de 40 a 50% si son óptimas las condiciones de fermentación anaerobia. Los gases que se encuentran en el relleno se estratifican y en la parte más baja quedan el CO_2 , CH_4 y H_2 .

En la parte superior se localiza N_2 y O_2 . En esta etapa el nitrógeno orgánico ya se convirtió en nitratos y el hidrógeno, el fósforo y el azufre orgánico formaron agua, fosfatos y sulfatos. Al mismo tiempo, se liberaron trazas de minerales disueltos o arrastrados en el lixiviado. La compactación es un parámetro importante en la cantidad y composición de gases producidos; a mayor compactación se obtiene más gas por unidad de volumen de sólidos. Los cambios más notables en los materiales

orgánicos ocurren en los primeros 60 días, aún después de dos años los rellenos están lejos de estabilizarse.

En la etapa metanogénica estable se producen metano y dióxido de carbono a partir de los ácidos orgánicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica. Esta etapa dura mientras existe materia orgánica susceptible de descomponerse. Los gases producidos son, casi en su totalidad CO_2 y CH_4 , y se cree que se producen equimolarmente. El tiempo transcurrido para lograr la fase metanogénica estable varía, ya que depende de la humedad y composición de la basura. Llegar a esta fase requiere, en Estados Unidos, de 24 meses, en Italia toma 12 y en Chile 4, aproximadamente. La importancia de conocer este tiempo estriba en que para entonces se debe haber implantado un sistema de canalización y venteo de los gases.

En sitios donde se alcanza rápidamente la fase metanogénica estable implantar este sistema resulta problemático, porque aún no se alcanza la altura final del relleno. Durante el periodo inicial de gran producción de CO_2 , la velocidad de difusión de éste es de 0.2 a 0.3 metros/día. Al disminuir el gradiente de concentración de CO_2 , disminuye también su velocidad de difusión. Algunos estudios estiman que la cantidad de CO_2 que sale a la atmósfera es 18 veces mayor que la cantidad que pasa al suelo desde el relleno.

El tiempo de actividad del relleno, es decir, el tiempo en que se producen gases todavía no se mide experimentalmente. Sin embargo, se han hecho estimaciones teóricas al turnar como base la cantidad total de carbono, presente al principio, y su velocidad de desaparición observada experimentalmente. Se espera que exista una concentración importante de CO_2 , durante muchos años, en las capas inferiores del suelo, en donde se difundirá. De esta manera, el CO_2 puede llegar a contaminar el agua subterránea, aunque éste depende de la profundidad a que se encuentre ésta y de la dilución posible.

Para estimar la cantidad de agua que un relleno sanitario puede admitir sin producir lixiviado, algunos estudios consideran que una libra de carbono convertida en CO_2 aerobiamente, producirá en la oxidación calor suficiente para calentar 5.42 kilogramos de agua de 0 a 100 °C y evaporarla. Con este dato, por ejemplo, para el caso de una basura típica de 200 Kg/m^3 de densidad, con un espesor de 1.5 metros de profundidad, si el 35% de su peso seco es carbón y asumiendo que la mitad de éste se transforma en CO_2 en 140 días. El calor de la oxidación originará una evaporación de agua de 0.09 a 1.1 Kg de agua/metro al día; es decir, el equivalente a una precipitación anual de 162 centímetros.

En la consideración anterior se asume que se cede todo el calor a humedad. Sin embargo, una parte se usa para calentar la basura y la otra se pierde en el aire. Diversos autores proponen el modelo ya estudiado de la descomposición de la celulosa para la modelación de la descomposición de la basura. Según este modelo, en una primera fase aerobia se producen las siguientes dos reacciones catalizadas por microorganismos aerobios:

Celulosa ----->Glucosa

Glucosa + Oxígeno -----> CO_2 + Agua + Energía (2.1)

Si se suman las reacciones teóricas anteriores, se puede ver que la celulosa se oxida completamente y produce CO_2 y agua, en condiciones aerobias. En este caso, la liberación de energía es de 688,000 cal/mol de glucosa. Para condiciones anaerobias el 50% del carbón en la celulosa se oxida en CO_2 y el otro 50% se reduce en CH_4 Libera sólo 57,000 cal/mol de glucosa, cuando todas las reacciones bioquímicas son completas. En algunos estudios se propone una ecuación sobre una base molar empírica para la oxidación aerobia de la materia orgánica. Esta se desarrolla sólo que el nitrógeno se oxide y produzca nitrato.

Ahora bien, aunque se sabe que en sistemas de agua natural la nitrificación proviene de la oxidación de amoníaco en nitritos, por intermediación de las bacterias *Nitrosomonas*, y la subsecuente oxidación de los nitritos en nitratos, por las bacterias *Nitrobacter*, tal fenómeno no se ha medido en el ambiente del relleno sanitario. La mayoría de los microorganismos aerobios son capaces de oxidar completamente la glucosa, mientras que en condiciones anaerobias la descomposición de celulosa en CO_2 y CH_4 , se realiza por grupos de bacterias capaces de utilizar sólo sustratos específicos.

En el proceso anaerobio, la conversión de etanol en ácido acético y CO_2 y la conversión de ácido acético en CO_2 y metano se realiza principalmente por *Methanobacterium onielianskii* y bacterias de metano. Estas son originarias de la flora natural del suelo, del agua o de los propios residuos sólidos. En primera instancia estas bacterias solubilizan 105 residuos insolubles mediante enzimas hidrolíticas extracelulares, para luego digerirlos dentro de las células gracias a la acción de endoenzimas.

Parte del residuo metabolizado se transforma en nuevo material celular y parte en metano, CO_2 y otros. A esto se debe que la descomposición de la celulosa sea relativamente lenta en condiciones anaerobias. Prueba de ello es que trozos de periódico, de estratos anaerobios, aún son legibles después de 40 años. Mediante técnicas de radioisótopos y agua pesada se ha logrado demostrar que del total de metano generado en proceso de digestión de celulosa, dos tercios provienen del ácido acético y un tercio de la reducción de CO_2 .

En general, se conocen poco las bacterias actuantes en las diferentes etapas de la degradación anaerobia. Por que no se pueden cultivar en laboratorio. La mayoría son anaerobias estrictas, aunque también hay facultativas. Las más conocidas son las generadoras de metano sobre las que hay bastante información, dado el interés en la producción de energéticos. De acuerdo con las cuatro etapas consideradas en la descomposición de basura, se sabe que en la primera etapa (hidrólisis fermentativa), se encuentran altas concentraciones de bacterias proteolíticas de (1 a 100 millones/g), la mayoría son anaerobias facultativas, entre ellas predomina la *Clostridium* (65%) va acompañada de *Bacteroides*, *Bifidobacterias* y *Veillonella*, que producen exoenzimas proteolíticas que solubilizan y degradan proteínas, proteosomas y polipéptidos.

También, hay abundantes bacterias celulolíticas (del orden de 100 millones/g), anaerobias estrictas, que solubilizan a las celulosas, hemicelulosas, pectinas, etc., y las transforman en almidón, glucosa y otros azúcares simples. Además aparecen bacterias lipolíticas, anaerobias estrictas, que mediante la acción de lipasas degradan materias grasas. En general se desconoce la taxonomía y concentración de estas bacterias. En la segunda etapa (formación de ácidos orgánicos e hidrógeno), hay unas 100 veces más bacterias anaerobias que facultativas (de 1,000 a 10,000 millones/ml), su taxonomía se conoce poco, y se ha visto que existen principalmente bacilos gram negativos no esporulados.

Los productos de su metabolismo son diversos: CO_2 , ácidos orgánicos, amoníaco, alcoholes, hidrógeno y cetonas. Sin embargo, la mayoría de estos productos desaparece rápidamente del medio y no se acumula (los alcoholes y las cetonas se transforman en ácidos orgánicos, mientras que el hidrógeno reduce al CO_2 para generar metano). También se encuentran bacterias sulfatorreductoras (*Desulfovibrio*) en concentraciones de 10,000/ml, que compiten con las bacterias metanogénicas por el hidrógeno y forman ácido sulfhídrico que insolubiliza metales tóxicos para las bacterias metanogénicas.

En la tercera etapa (formación de metano inestable) participan bacterias muy especiales, para su metabolismo y estructura, que se clasifican dentro de los protistas más primitivos de la tierra. Las *Archaeobacterias* son anaerobias estrictas que inhiben su desarrollo aun con poco oxígeno. Es muy difícil aislar, purificar, cultivar y enumerar este tipo de bacterias en el laboratorio. En los ambientes donde se genera metano existen en cantidades de unos 100 millones/ml. Los sustratos son

específicos y producen metano sólo cuando están presentes compuestos como el CO₂, hidrógeno, acetato, formato, y otros orgánicos de bajo peso molecular.

Se les clasifica por su capacidad para generar metano y se conocen 22 especies, de las cuales se reconocen 40 cepas. Su pH óptimo de desarrollo es entre 6.9 y 7.2 y su rango aceptable de 6.5 a 8; fuera de este rango se inhiben desde el punto de vista de la temperatura, los hay mesófilos (de 20 a 25 °C) y termófilos (de 45 a 55°C). Su relación carbono-nitrógeno (C-N) óptimo es igual o un poco inferior a 20 y usan como fuente de nitrógeno sales amoniacales. Para que el nitrógeno sea aprovechado. Su concentración debe ser de 50 a 500 mg/l.

Otro factor importante en su desarrollo es la concentración de ácidos volátiles presentes en el medio, éstos expresados como ácido acético deben ser de 500 mg/l. La digestión mesófila es más lenta que la termófila. Si el pH baja del rango aceptable, las *Metanobacterias* se inhiben y se produce acumulación de ácidos orgánicos que, a su vez, hacen descender más el pH, con el consiguiente desequilibrio del sistema y la posibilidad de que se detenga la producción de gas. Si por el contrario, las bacterias productoras de ácidos están activas y las del metano en periodo de adaptación, pueden descender los ácidos volátiles de tal forma que ocasionen la acumulación de amoníaco, provocando una elevación del pH. Cuando el sistema está en equilibrio, se mantiene la neutralidad del medio por la capacidad reguladora del sistema CO₂-bicarbonato. Estos compuestos interaccionan con los ácidos volátiles y el amoníaco formado en el proceso. Así se compensan las variaciones de acidez o alcalinidad del medio y se mantiene la estabilidad del pH.

Para que el medio esté libre de grandes fluctuaciones de pH, se requiere una alcalinidad de 1,500 a 3,000 mg/l, expresada como carbonato de calcio. Una buena concentración de ácidos volátiles es de menos de 1,000 mg/l en ácido acético, pero además se debe conocer la concentración de ácido propiónico en el total de ácidos volátiles ya que éste es difícil de degradar y su acumulación limita la producción de metano. Para que el ácido propiónico se convierta en metano, primero se debe oxidar en acetato, esto requiere mucha energía. Esta conversión requiere que no se acumule el hidrógeno en el medio, de esto se encargan las bacterias del metano. En un proceso anaerobio la relación C:N:P:S debe ser 100:10:1:1, ya que ésta es la proporción en que se encuentran los nutrientes dentro del material celular.

En la fase de crecimiento, de la masa bacteriana, la relación C-N debe ser cercana a 20; la concentración de nitrógeno amoniacal presente en los residuos debe ser alrededor de 50 mg/l. Si estas concentraciones son excesivamente altas (1,500- 3,000 mg/l), ocasionan un incremento en el pH que afecta el proceso, y valores aún más altos detienen el proceso. Con respecto al azufre, todos los sulfuros inorgánicos en concentraciones de nueve millones/l inhiben la metanogénesis. Sin embargo, en el proceso siempre se produce ácido sulfhídrico por acción de las bacterias sulfatorreductoras, éstas casi siempre se combinan con metales presentes en el medio y forman sales insolubles.

Con respecto a metales pesados se puede decir que aunque todos los cationes son capaces de producir efectos tóxicos en los microorganismos a altas concentraciones, la toxicidad es variable y aumenta por lo general con el peso molecular. A ello se debe que 105 llamados metales pesados, inhiban o dañen a las bacterias del metano, que son bastante más sensibles a ellos que otros microorganismos. Por esta razón es importante que en los rellenos sanitarios dedicados a la recuperación del metano, se evite depositar productos químicos o materiales que contengan elementos químicos tóxicos o inhibitorios de microorganismos mencionados. El tiempo de generación de las bacterias del metano es de cinco horas.

2.3 CONCLUSIONES

La biomasa es toda materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. La biomasa natural es la que se produce en la naturaleza, sin la intervención humana. La biomasa residual es la que genera cualquier actividad

humana; en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como, basuras y aguas residuales. Los procesos termoquímicos que se utilizan para el aprovechamiento de la biomasa y de los residuos sólidos, con fines de generación eléctrica, son: La combustión, la gasificación y la pirólisis, mientras que el único proceso bioquímico con fines de generación eléctrica es la digestión. La utilización, con fines energéticos, de la biomasa al igual que los residuos sólidos, por lo general requieren un tratamiento físico previo como lo es: el triturado, astillado, compactado, pulverizado y secado, para utilizarlos en los sistemas convencionales..

El proceso puede involucrar tecnologías de conversión, tanto primarias como secundarias o ambas. En la tecnología primaria, la biomasa y también los residuos sólidos urbanos, sin tratamiento, son convertidos directamente en calor, en un combustible más conveniente, o en un transportador de energía en forma de gases, tales como el CH₄, H₂ y combustibles líquidos. Las tecnologías secundarias convierten estos transportadores en el producto final de energía deseado, tal como el transporte de los productos o mercancías y personas o iluminación eléctrica. Generalmente las tecnologías termoquímicas convierten la biomasa a electricidad mediante turbinas ensambladas a generadores eléctricos, mientras que la digestión, genera gases como el metano, que es aprovechado generalmente por motogeneradores ó turbinas de gas acopladas a un generador para la producción eléctrica.

La eficiencia que presenta cada tecnología es muy variada, dependiendo del tipo de energía que se quiera obtener, en el caso de la energía eléctrica, la combustión tiene una eficiencia del 30%, si el combustible es derivado de la basura, la eficiencia cae en un rango del 12-24%. La gasificación tiene una eficiencia del 35-45%, la pirólisis del 15%. La digestión tiene una eficiencia energética del 40%, es decir, del total del potencial energético, solo el 40% es convertido en metano, la eficiencia de las turbinas de gas utilizada para aprovechar el metano es del 20-40%, para capacidades de 250 KW a 250 MW, respectivamente. Mientras que la tecnología de Calor y Energía combinados, utilizado en las plantas de combustión tiene una eficiencia mayor al 70%, en tanto que la eficiencia de las calderas se encuentra en un rango del 75-85%. El poder calorífico de cada producto obtenido de las diversas tecnologías varía en un rango de los 4-6 MJ/m³ del gas obtenido en la gasificación donde la atmósfera de oxidación es aire, de 10-15 MJ/m³ donde la atmósfera de gasificación es con oxígeno. El poder calorífico del aceite obtenido de la pirólisis de los residuos sólidos urbanos es de 24.4 MJ/Kg, de 42 MJ/Kg si el aceite proviene de las llantas. Mientras que el poder calorífico del gas obtenido de la pirólisis de los residuos sólidos urbanos es de 18 MJ/m³ y el gas de la pirólisis de las llantas de 40 MJ/Kg. Por otro lado el metano contenido en el gas de los digestores puede variar entre el 50% y 75%, lo cual afecta directamente el poder calorífico desde los 20 -26 MJ/m³.