

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS

2.1 Biomasa

En su más amplia aceptación se entiende por biomasa toda aquella materia viva presente en el planeta. Ésto es, todo el conjunto de materia orgánica energética, ya sea de origen vegetal, animal o procedente de su transformación natural o artificial.

Cualquier tipo de biomasa tiene en común el hecho de provenir, en última instancia, de la fotosíntesis vegetal. La fotosíntesis es un proceso por el cual unas partículas (cloroplastos) presentes en las células vegetales son capaces de formar sustancias orgánicas a partir de CO_2 existente en el aire, siendo la energía solar el catalizador y promotor de esta reacción. En una concepción simplista también se podría definir como una reacción inversa a la combustión.

En la Figura 2.1 se puede observar el conjunto de materiales que actualmente cuentan con posibilidades de ser utilizados en el campo energético. La variedad de los mismos supone que tanto los sistemas de transformación como los fines a los que puede ser destinada la energía obtenida son diversos (Castells, 2005).

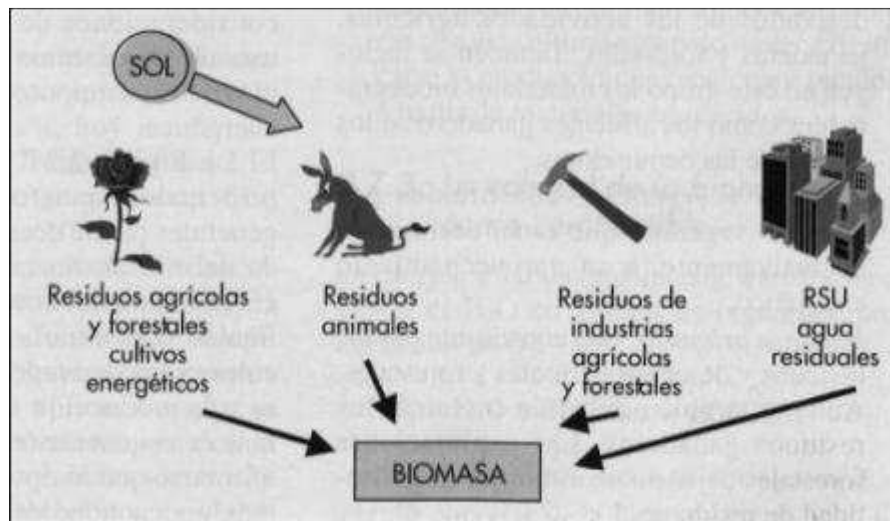


Figura 2.1 Esquema sintético del origen de la biomasa (Castells, 2005)

2.1.1 Aplicaciones generales de la biomasa

La biomasa posee una serie de aplicaciones desde el punto de vista energético y de su utilización como insumos del sector industrial, especialmente en las industrias químicas, en términos generales se puede observar en la Figura 2.2.

La biomasa producida posee en general, a excepción de los cultivos energéticos, un uso primario asociado a los consumidores finales, ya sea como alimento o bien materias primas para producir papel o productos químicos (Castells, 2009).

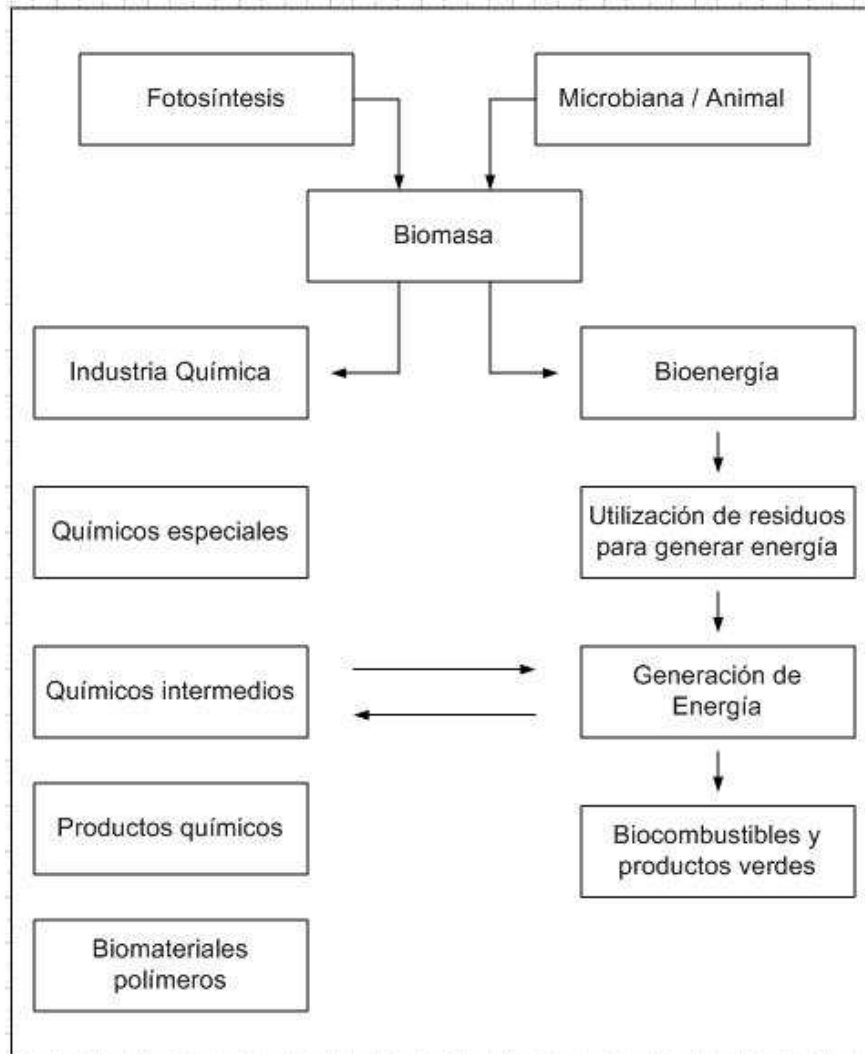


Figura 2.2 Aplicaciones generales de la biomasa (Castells, 2009)

2.1.2 Clasificación de la biomasa

Los principales grupos en que se puede clasificar la biomasa pueden ser:

- **Biomasa natural:** La producida en los ecosistemas naturales, como los bosques.
- **Biomasa residual:** Los subproductos derivados de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales. También se incluyen en este grupo los materiales biodegradables como los afluentes ganaderos o los fangos de las depuradoras.
- **Cultivos energéticos:** Constituidos por aquellos vegetales que están destinados, exclusivamente, a su aprovechamiento energético.

- **Biomasa primaria:** Constituida por los residuos y desechos agrícolas y forestales. Aunque también deberían incluirse los residuos ganaderos. Las explotaciones forestales dejan sobre el bosque gran cantidad de residuos.
- **Biomasa secundaria:** Corresponde a la biomasa residual procedente de las industrias agroalimentarias y forestales una vez se han elaborado los productos o materiales principales. La posibilidad de los distintos aprovechamientos de la biomasa está asociada a los tratamientos a que se puede someter la misma, que puede ser utilizada en forma sólida, líquida o gaseosa. Al margen de las consideraciones de carácter ambiental, el uso de un sistema u otro obedece a un mayor rendimiento de la transformación energética

Se puede observar en la Figura 2.3 la producción y cifra los recursos potenciales junto a los recursos utilizables, mucho más reducidos y los recursos que realmente se utilizan, que escasamente llegan al 10% de los recursos potenciales.

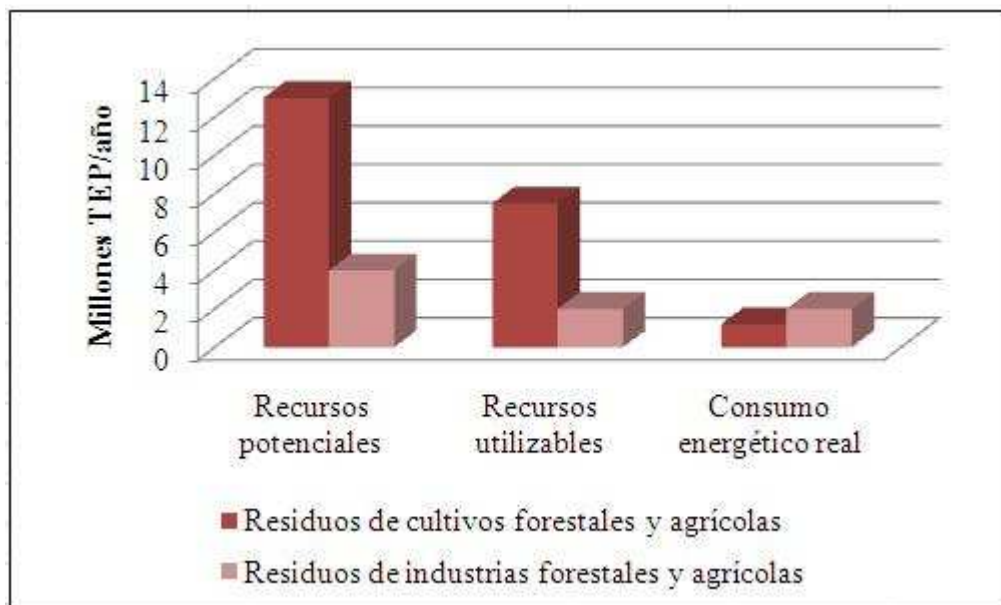


Figura 2.3 Recursos de biomasa potenciales y reales (a partir de Castells, 2009)

Se puede observar en la Figura 2.4 algunas de las principales transformaciones. En líneas generales puede decirse que la biomasa sólida debería destinarse a aplicaciones térmicas más o menos convencionales. La biomasa líquida se destinaría a su utilización en vehículos, y los derivados gaseosos de la biomasa a la producción de electricidad en sistemas de cogeneración. Generalizando, puede afirmarse que lo óptimo sería disponer de la máxima cantidad de gases en destrucción de sólidos o bien productos transformados líquidos al cien por cien (Castells, 2005).

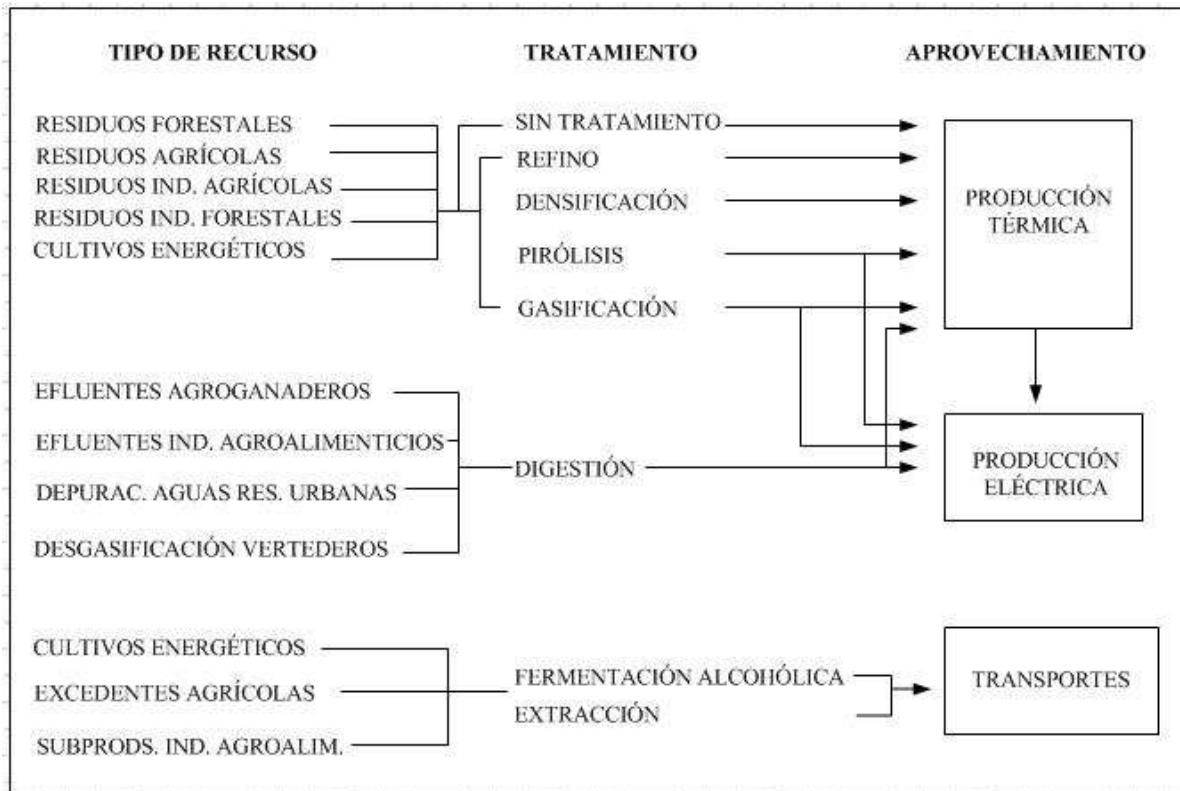


Figura 2.4 Transformaciones energéticas de la biomasa (a partir de Castells, 2005)

2.1.3 Transformaciones energéticas de la biomasa

Las diversas transformaciones de la biomasa pueden englobarse en los siguientes grupos de transformaciones (Castells, 2005):

- **Combustión directa:** Corresponde al sistema tradicional de la combustión de la biomasa en hogares u, hoy en día, en modernos hornos de lecho fluidizado. El producto resultante es un gas inerte (CO_2 y H_2O).
- **Vías termoquímicas:** En determinadas condiciones de temperatura y presión, la biomasa sólida se transforma en otros subproductos sólidos, líquidos y gaseosos más adecuados a la aplicación que se desee. Estas transformaciones, gracias al alto nivel tecnológico alcanzado, están substituyendo a las anteriores. Los productos resultantes son, en su mayoría, gases y, en algunas transformaciones, también aparecen sólidos.
- **Vías bioquímicas:** Como gran elemento diferenciador de las anteriores hay que destacar el hecho de que se producen a temperatura ambiente o cercana a ella. Están integradas por las transformaciones anaerobias y las fermentaciones alcohólicas. En este último apartado merece destacar la producción de bioalcohol (etanol) a partir de materiales azucarados.

2.1.4 Biomasa como fuente de energía

La biomasa es un gran depósito de energía. Fue el primer combustible usado intensamente hasta el inicio de la revolución industrial y continua siendo además el principal recurso energético para millones de personas en el mundo. Surge así el concepto de biocombustibles, que se refiere a la fracción de biomasa susceptible de ser utilizada energéticamente, que puede provenir tanto de residuos de procesos industriales, de la recolección selectiva de residuos municipales, de restos de actividades agrícolas, forestales o ganaderas como también de cultivos especialmente pensando con fines energéticos (Castells, 2009).

Esquemáticamente las fuentes de biomasa y los procesos generales que la generan, enfocados a un aprovechamiento como fuente de energía, se puede observar en la Figura 2.5.

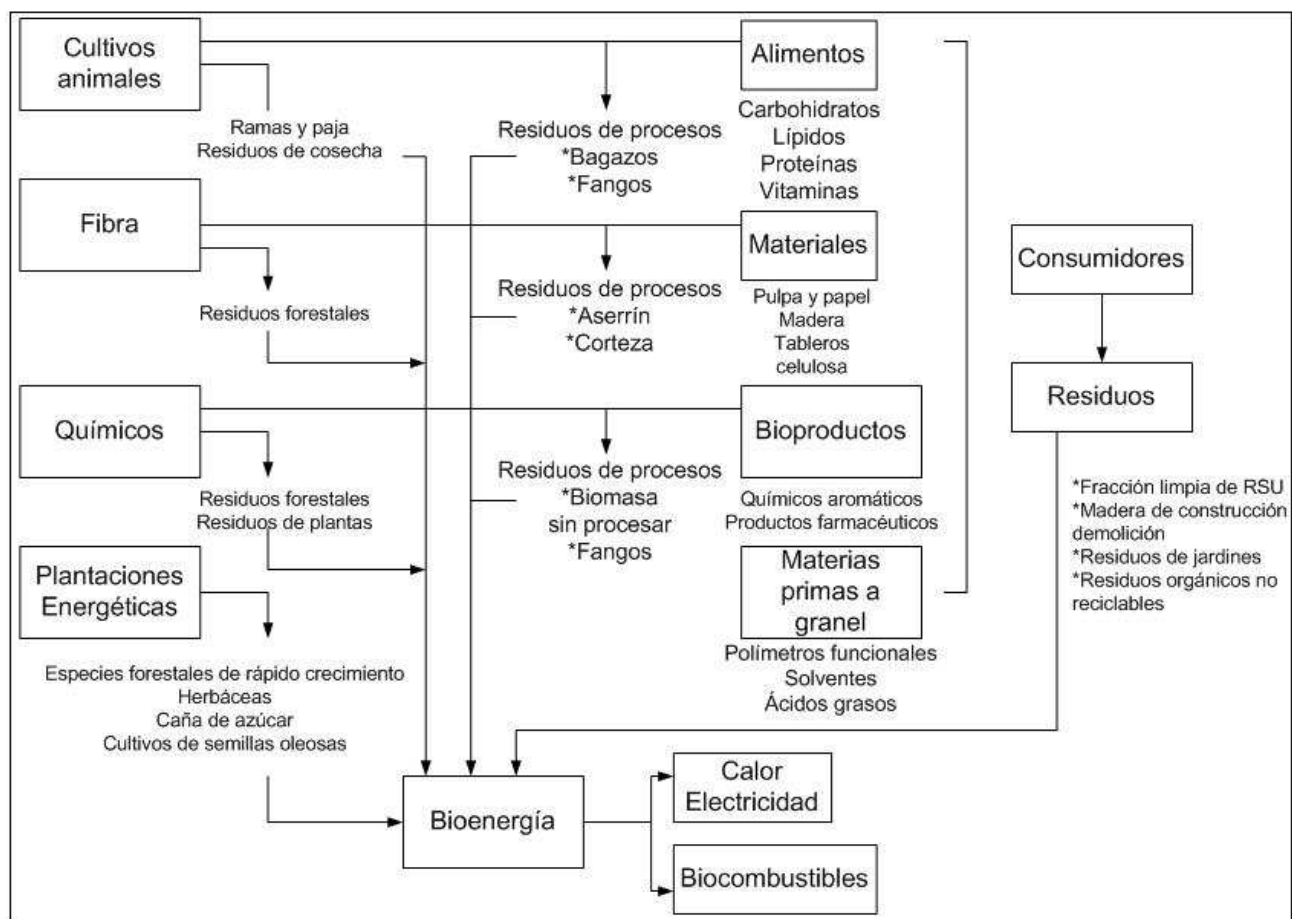


Figura 2.5 Procesos generales de generación y aprovechamiento de la biomasa (a partir de Castells, 2009)

2.1.4.1 Residuos de madera

Las actividades industriales relacionadas con la madera generan residuos susceptibles de ser utilizados como combustible. Un factor determinante para el destino último de los residuos de madera es la cantidad generada por cada establecimiento industrial, así como la distribución geográfica y los accesos a las fábricas.

Si la producción de residuos se concentra en un área determinada, éstos son recogidos y aprovechados como materia prima en otras industrias madereras. En caso contrario se suelen emplear como combustibles en el ámbito doméstico o industrial de las zonas adyacentes.

2.1.4.2 Residuos de la industria agrícola y ganadera

Si bien estos residuos, desde un punto de vista energético, no revisten una especial significación debido a que, por lo general su contenido en humedad es muy elevado la cantidad que se genera es muy importante y es por ello que deben considerarse. Una gran parte de los residuos que se generan en la industria de transformados de fruta y vegetales está constituida por la fracción orgánica sólida derivada del tratamiento previo de las materias primas. Los destinos finales de estas fracciones son diversos:

- Alimentación animal
- Metanización
- Sistema de compost
- Vertedero controlado

Las técnicas de conservación utilizadas por las industrias que procesan materia prima vegetal son: Esterilización por calor, congelación, desecación, etc. Entre el sector de fabricación destacan las siguientes actividades: Conservas, congelados, zumos y concentrados. Las características de la industria de transformados alimenticios son las siguientes:

- Están localizadas cerca de las aéreas productoras
- La actividad no es continua, sino que se trabaja por campañas
- Se procesan una gran variedad de materias primas que requieren diferentes procesos de fabricación

2.1.4.3 Residuos ganaderos

Por lo general, se entiende por residuos ganaderos los procedentes de las explotaciones industriales de la cría de los animales.

Dentro de sus características tenemos:

- Poseen una elevada cantidad de agua, lo que dificulta la valorización energética.
- Se trata de un material fermentable que desprende vapores, gases y compuestos volátiles.
- La cantidad de material sólido es variable. No solo por su propia naturaleza sino por el sistema de gestión. Por ejemplo, en el caso de los purines de cerdo, cuando la limpieza se hace con mangueras de agua a presión, la cantidad de agua puede sobrepasar el 97%, lo cual invalida toda una serie de posibilidades de cara a la valorización energética.
- Se generan aguas con elevados DBO imposibles de verter sin tratamiento previo
- Elevados contenidos en N y P, lo que da lugar a problemas secundarios como la eutrofización de las aguas subterráneas.
- Probable presencia de metales pesados Cu y Zn.

Se ha intentado la co-digestión (Figura 2.6), de estiércol con residuos cítricos, lo que ha resultado satisfactorio.

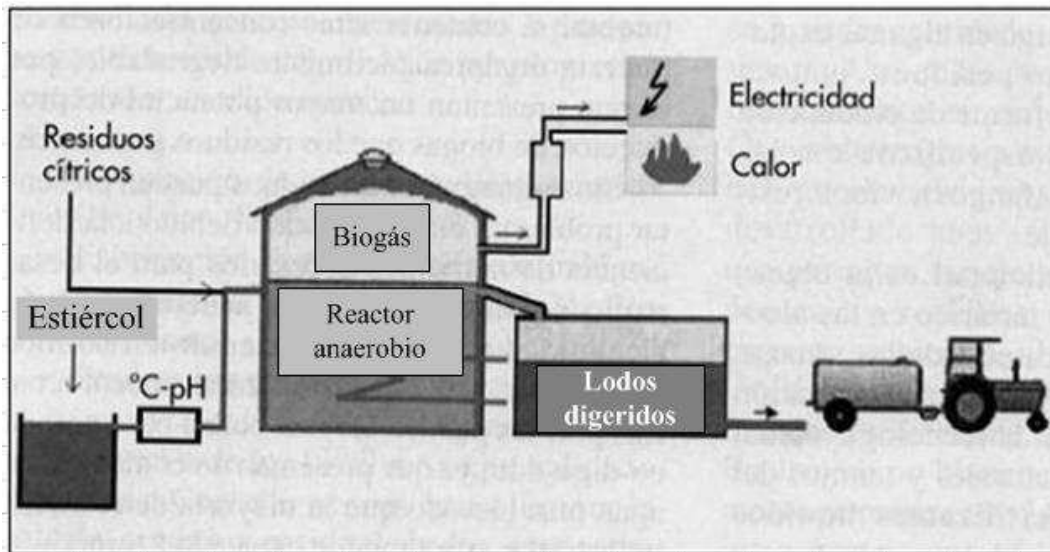
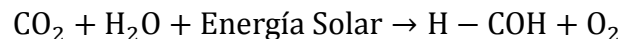


Figura 2.6 Esquema de principio de la co-digestión (Castells, 2005)

2.1.5 La calidad de la biomasa como combustible

La energía solar, la fotosíntesis, transforma el CO_2 y el H_2O en sustancias orgánicas, con liberación de O_2 .



Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa tiene poco carbono, mucho oxígeno y compuestos volátiles (que aportan más del 60% del poder calorífico inferior. El Poder Calorífico Inferior (PCI) es del orden de 4,000 Kcal/kg y está casi exenta de azufre, lo que ambientalmente es muy favorable (Castells, 2005).

2.1.6 Consumo de la biomasa

Para Castells (2005) los recursos potenciales de biomasa corresponden principalmente a:

- Biomosas de ámbitos agrícolas y forestales
- Biomosas generadas en establecimientos de industrias forestales o agrícolas
- Residuos biodegradables (agroganaderos y fangos de aguas residuales urbanas)
- Los cultivos energéticos (cardos, cereales, girasol, chopos, etc.)

El sector doméstico: Se caracteriza por tener un consumo destinado en su mayor parte a la calefacción de viviendas, principalmente en el entorno rural, y a partir de combustibles obtenidos por el propio usuario.

El sector industrial: El consumo corresponde principalmente a los sectores productivos entre los que destacan, por su importancia cuantitativa, las industrias de la pasta de papel, las maderas y las agroalimentarias.

Otras aplicaciones: Tienen una incidencia mucho menor que los dos sectores mencionados y está formado fundamentalmente, por granjas avícolas y restaurantes.

El comportamiento de estos 3 sectores se pueden observar en la Figura 2.7.

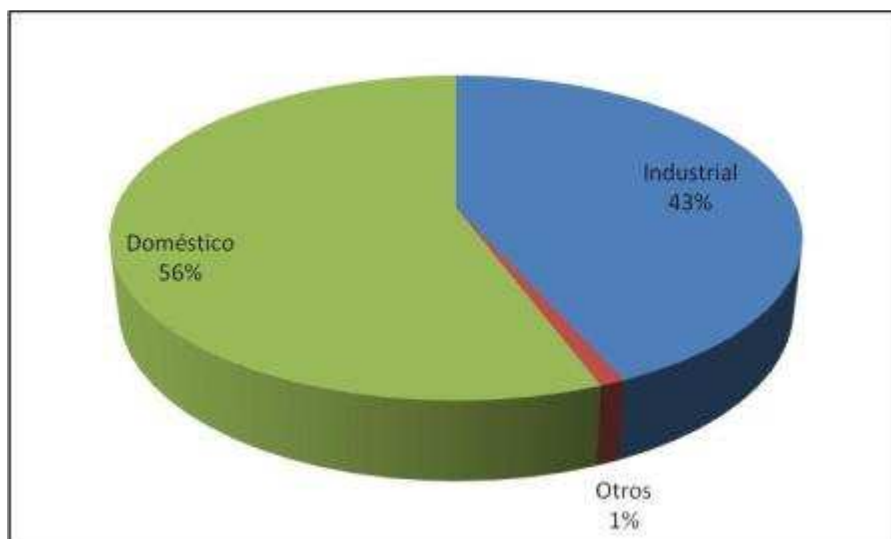


Figura 2.7 Consumo de biomasa por sectores en España en el año 1994 (a partir de Castells, 2005)

Se obtuvo en la Tabla 2.1 los ámbitos de utilización de la biomasa, por sectores en España, durante el año 1994.

Tabla 2.1 Consumo de biomasa por sectores de actividad en España en el año 1994 (Castells, 2005)

Sector	Consumo toneladas equivalentes de petróleo (TEP)	%
Doméstico	1,991,306	55.64
Industrial	1,550,022	44.35
Otros	34,476	0.96
Total	3,575,804	100.00

El consumo de la biomasa depende del ámbito de utilización (doméstico o industrial) y de las posibilidades de acceso al combustible o su disponibilidad a bajo precio. Además, está fuertemente influenciado por la distribución de la población en el entorno rural, por las actividades relacionadas con la industria oleícola, por las condicionantes climáticas, por la existencia de explotaciones madereras, por la demanda del sector servicios y sobre todo por las industrias productoras de papel pasta.

2.1.7 Aspectos ambientales del consumo de biomasa

La gran ventaja de la biomasa es su carácter de energía renovable lo que, al contrario de las energías convencionales, le confiere una singularidad de fuente de energía inagotable a escala humana.

Otro aspecto común a todas las biomásas es que presentan un balance de CO₂ neutro, lo que significa que el uso de biomasa como recurso energético no contribuye a aumentar la proporción de CO₂ en la atmósfera. Incluso para algunos casos, como puede ser el de los cultivos energéticos, el balance suele ser negativo (cantidad de CO₂ separado temporalmente del ciclo atmosférico) debido a que parte del CO₂ producido queda en hojas y raíces que no puede aprovecharse energéticamente.

También debe valorarse el hecho de que su uso no provoca ningún tipo de impacto por su actividad extractiva. Tampoco su transporte y manipulación son especialmente conflictivos. Se puede observar en la Figura 2.8 la comparación de impacto que supone el funcionamiento de una central termoeléctrica de 10 mW según se alimente de carbón o de biomasa (Castells, 2005).

2.1.7.1 Materiales leñosos

Es aquella biomasa que incluye materiales lignocelulósicos, esto es, que en su composición los principales constituyentes son la celulosa y la lignina. Tanto en el caso de los residuos agrícolas como industriales, el retiro y gestión de los residuos será una tarea prioritaria para proseguir el trabajo. En el caso de las actividades silvícolas, además de evitar quema *in situ* la limpieza favorece la regeneración natural de la masa principal boscosa y previene la propagación de los incendios. En contrapartida debe señalarse que una sobreexplotación del monte puede alterar la compactación del terreno y aumentar la escorrentía. Empobrecer el suelo, desplazar especies e incluso provocar el inicio de la desertización.

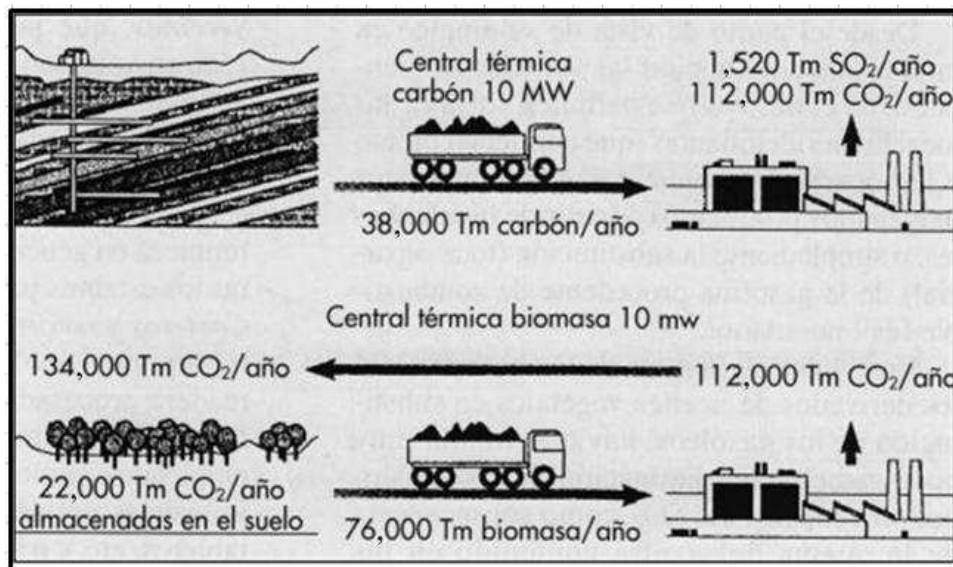


Figura 2.8 Impacto ambiental comparado (Castells, 2005)

2.1.7.2 Residuos biodegradables

En el caso de las aguas residuales urbanas y los residuos con elevada carga orgánica, la digestión anaerobia deviene como una buena alternativa. La depuración de esta agua es una necesidad a la conservación del medio ambiente acuático. Además, este proceso ayuda a transformar microorganismos patógenos, como es el caso de la *salmonella*, en otros compuestos inocuos para el medio. El biogás generado se puede usar como combustible. El único impacto posible es la incidencia del olor y las posibles emisiones contaminantes ligadas a la naturaleza del biogás.

2.1.7.3 Cultivos energéticos

Los cultivos energéticos requieren unas condiciones de labor menos exigentes que los destinados a usos alimentarios, lo que se traduce en menor gasto de fertilizantes, herbicidas o plaguicidas. Evita la erosión o degradación de los suelos y ayuda a mantener el nivel de la vida rural. Si el cultivo en cuestión se ajusta al microclima local se optimiza el consumo de agua destinada a riego.

2.1.7.4 Biocarburantes

Los biocarburantes proceden de los cultivos energéticos, por ello se benefician de los aspectos antes mencionados. Desde el punto de vista de su empleo en motores de automoción las ventajas ambientales son claras, ya que permiten sustituir las mezclas antidetonantes (que contienen plomo o hidrocarburos aromáticos) por compuestos oxigenados producidos a partir de bioalcoholes, o simplemente la substitución (total o parcial) de la gasolina procedente de combustible fósil por etanol. En el caso de la rama de los biocarburantes derivados de aceites vegetales en substitución de los gasóleos, hay que valorar muy positivamente la eliminación de emisiones procedentes del SO₂, como consecuencia de la quema de azufre contenido en los gasóleos.

A diferencia de los carburantes procedentes del petróleo, los biocarburantes son biodegradables, con lo que se evita la incidencia de impactos importantes en el caso de vertidos accidentales.

2.1.8 Biomasa a nivel mundial

Casi el 6% del consumo total de la energía que se consume en Canadá es producida por fuentes de biomasa. La mayoría de esta producción se deriva de la pulpa y papel en las industrias, las cuales usan sus propios residuos para producir procesos de vapor y electricidad.

La Ontario Power Authority (OPA) estima que la biomasa puede llegar a contribuir aproximadamente con 500 MW al suministro energético mixto en Ontario para el año 2025. La OPA por su parte sigue investigando temas de co-generación para contribuir con el suministro mixto. La biomasa producida por los bosques en Ontario puede suministrar un estimado de 26 billones de kWh de energía eléctrica, suficientes para iluminar 2.2 millones de hogares en Ontario. Se estima que un litro de etanol puede ser usado para reemplazar un litro de gasolina, lo cual reduciría la acumulación atmosférica de CO₂ en un 70 % (NRC, 2008).

2.1.9 Potencial para 2010 de la Unión Europea

En la Tabla 2.2 se puede observar un comparativo entre la biomasa que se generó en 2007 y el potencial que se generaría en el 2010, tomando en cuenta 27 países de la Unión Europea, la medición esta en millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP). Tenga en cuenta que las importaciones y la parte no orgánica de los residuos sólidos municipales se incluyen en el uso de la biomasa, que conduce a un potencial no utilizado negativos para Dinamarca y los Países Bajos, que son importadores netos de biomasa (AEBIOM, 2009).

La Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) da los siguientes datos y explica que el potencial para 2010 es tomando toda la cantidad de bioenergía que la Unión Europea puede llegar a producir sin dañar el medio ambiente.

Tabla 2.2 Potencial de biomasa en la Unión Europea en el 2010 (AEBIOM, 2009)

	Biomasa usada 2007 (MTEP)	Potencial de biomasa 2010 (MTEP)	Potencial no utilizado (%)
Alemania	22.1	26.2	16%
Austria	4.63	6.9	33%
Bélgica	1.71	2.3	26%
Bulgaria	0.68	-	-
Chipre	0.01	0.3	97%
Dinamarca	2.92	2.8	-4%
Eslovenia	0.45	1.8	75%
España	5.39	16.5	5%
Estonia	0.59	1.5	61%
Finlandia	7.28	9.6	24%
Francia	13.39	31.4	57%
Grecia	1.13	1.6	29%
Holanda	2.7	2.6	-4%
Hungría	1.3	3.6	64%
Irlanda	0.24	1.1	78%
Italia	4.46	16.2	72%
Letonia	1.17	1.3	10%
Lituania	0.77	4.1	81%
Luxemburgo	0.1	-	-
Malta	-	-	-
Polonia	4.74	23.8	80%
Portugal	3.15	3.6	13%
Reino Unido	3.71	13.5	73%
Republica Checa	1.99	3.8	48%
Republica de Eslovaquia	0.6	2.2	73%
Rumania	3.36	-	-
Suecia	9.82	11.7	16%
Unión Europea 27	98.39	187.9	48%

2.1.10 Potencial eléctrico regional de fuentes de biomasa en México

La biomasa como recurso energético está siendo fuertemente promovida en el ámbito mundial, ya que es un recurso renovable que puede ser empleado como combustible para generar electricidad, calor, energía mecánica y biogás, en todos los sectores, incluyendo el del transporte a través de los biocombustibles. Otra razón de igual o mayor peso que ha despertado el gran interés en la biomasa como recurso energético, es la mitigación de los gases de efecto invernadero derivados de la combustión de los hidrocarburos y el carbón mineral.

En nuestro país se ha aprobado la Ley para la Promoción y el Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual ha sido muy controvertida por su preferencia hacia el bioetanol derivado de la caña de azúcar y el maíz, entre otras razones por ser fuentes alimenticias en el país. Por lo cual es posible que esta Ley sea modificada en el futuro.

De la misma manera se ha creado formalmente a inicios del año 2006 la Red Mexicana de Bioenergía A.C., con el objetivo fundamental de promover a la bioenergía derivada de la biomasa en nuestro país, no solo como una fuente renovable de energía y medida de mitigación de los gases de efecto invernadero, sino también como un factor de apoyo al desarrollo del medio rural mexicano. La Gerencia de Energías No Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) está cumpliendo 30 años en la promoción y desarrollo de proyectos, en general de las energías renovables, y en particular de la biomasa ya que está inició sus actividades en la segunda mitad de la década de los setentas con proyectos de digestores para producir biogás a partir de residuos pecuarios.

Este trabajo es resultado del compromiso y esfuerzo permanentes y constantes del IIE en la promoción y desarrollo de la biomasa como recurso de energía, el cual requiere el conocimiento del potencial lo más apegado a la realidad del recurso de la biomasa a lo largo y ancho de nuestro país. Para determinar el potencial de la biomasa en México, primeramente se definió el universo constituido por los recursos de biomasa tales como: Residuos sólidos urbanos (RSU), residuos pecuarios (estiércol de ganado) y residuos forestales. Así como las tecnologías de conversión de producción de biogás en relleno sanitarios e incineración de los RSU, producción de biogás en digestores para los residuos pecuarios y gasificación de los residuos forestales. A su vez los residuos pecuarios se dividieron en residuos de ganado bovino lechero y productor de carne y ganado porcino. En tanto que los residuos forestales se dividieron en los sectores de plantaciones naturales, plantaciones energéticas, extracción de madera, y residuos industriales.

Posteriormente se identificaron las fuentes de información nacionales de los recursos de la biomasa, estas fuentes no pertenecen al sector energía sino a una serie de actividades de efectúan inventarios y registros de la biomasa con otros fines (Arvizu, 2009).

En la Tabla 2.3, se tuvieron valores correspondientes al potencial eléctrico por fuente de biomasa considerada. Los resultados anteriores no consideran al bagazo de caña, el cual se estima con un potencial de 3,000 MW.

Tabla 2.3 Potencial eléctrico por fuente de biomasa (Arvizu, 2009)

Fuente de Biomasa	Tecnología	Capacidad MW
RSU en Relleno Sanitarios	Biogás	165
RSU en Relleno Sanitarios	Incineración	2,415
	Subtotal	2,580
Sector Pecuario	Tecnología	Capacidad MW
Ganado lechero	Biogás	138
Ganado de carne	Biogás	123
Ganado porcino	Biogás	223
	Subtotal	484
Sector Forestal	Tecnología	Capacidad MW
Plantaciones naturales	Gasificación	6,143
Plantaciones energéticas	Gasificación	5,863
Extracción de madera	Gasificación	296
Residuos industriales	Gasificación	226
	Subtotal	12,528
	Total	15,592

Los recursos de biomasa de residuos sólidos urbanos, pecuarios y forestales considerados con potencial de generación de electricidad, representan 25% de la capacidad eléctrica instalada actualmente en el país. Lo que da por resultado que el potencial eléctrico de los residuos forestales sea del 80.4%, de los residuos pecuarios del 3.1% y de los residuos sólidos urbanos o municipales de 16.5% (Figura 2.9).

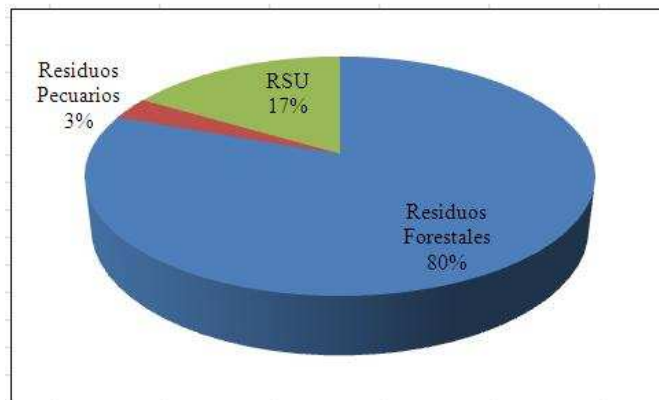


Figura 2.9 Potencial eléctrico de residuos forestales, pecuarios y RSU en México (a partir de Arvizu, 2009)

2.2 Combustibles renovables gaseosos

Naturalmente se trata de combustibles gaseosos renovables o bien generados a partir de residuos. En primer lugar hay que llevar a cabo una gran diferenciación entre los denominados biogases:

- a) Gases procedentes de la fermentación anaerobia de la biomasa. Este biogás contiene por lo general más de un 50% de CH_4 y el resto es CO_2 . En este apartado debe incluirse también el gas de vertedero. Estos gases, obviamente son producidos a baja temperatura (cercana a la temperatura ambiente).
- b) Gas de síntesis. Procedentes de la gasificación o la pirólisis de biomasa. En su composición sobresale la cantidad de CO y H_2 . Corresponden a los denominados procesos o conversiones a alta temperatura (Castells, 2005).

2.2.1 Biogás

Es un gas combustible que se produce debido a la degradación anaerobia de los residuos orgánicos biodegradables. Está compuesto básicamente de metano y dióxido de carbono.

Las áreas rurales se caracterizan por disponer de grandes cantidades de desechos provenientes de las actividades agrícolas y pecuarias que allí se desarrollan. El estiércol de los animales, la pulpa del café, la paja del arroz, las hojas, los residuos de la cocina y los demás materiales orgánicos similares pueden, teóricamente, ser convertidos en energía y en abono que retorna a la tierra de donde fue tomado por las plantas. Esta transformación de los residuos prácticamente inútiles en nuevos productos, se logra mediante un proceso bioquímico conocido como la digestión de la materia orgánica. La proporción de gas metano presente en el biogás depende de la materia prima empleada. Otro requisito para implementar una instalación de biogás es que, además de la propia producción de metano, el residuo se pueda utilizar como abono (Castells, 2005). Hay dos métodos para producir biogás:

Método húmedo: Cuando el sustrato tiene un máximo de 15% de materia seca. La obtención es fácil.

Método seco: Cuando el sustrato tiene una proporción de materia seca del 25%, de mayor rendimiento en energía pero con mayores problemas de manejo del material.

Composición del biogás

Se da este nombre a la mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. La composición típica del biogás y sus propiedades se indican en la Tabla 2.4 y 2.5 respectivamente. Una alta proporción de la mezcla corresponde al metano CH_4 , un gas combustible que permite la utilización de este producto con fines energéticos.

Tabla 2.4 Composición típica del biogás (IIT, 1975)

Composición Química	%
Metano (CH ₄)	50-70 *
Dióxido de carbono (CO ₂)	30-50
Nitrógeno(N ₂)	0-3
Hidrógeno (H ₂)	0-1
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0-1
Monóxido de carbono (CO)	0-1.5
Agua (H ₂ O)	Trazas

* Normalmente más del 60%

Tabla 2.5 Características del biogás (IIT, 1975)

Características	
Densidad	1.09 kg/m ³
Solubilidad de agua	baja
Presión crítica	673.1 Psia **
Temperatura crítica	82.5 °C **
Poder calorífico	4,500 a 6,500 Kcal/m ³

** Corresponden al metano, su principal componente.

Para comprender el potencial del biogás, se debe realizar una comparación con algunos usos de la energía que resulten más familiares. La Tabla 2.6 ilustra algunos ejemplos del uso de 1m³ de biogás, con concentraciones de 60-70% de metano.

Tabla 2.6 Usos equivalentes del biogás (Barnett y col., 1978)

Uso	Rendimiento
Cocción	Cocción de tres comidas para una familia de 5-6 miembros
Iluminación	Iluminación igual a un foco incandescente de 60-100W
Petróleo	Igual a 0.76kg de petróleo
Combustible para automóvil	Capaz de mover un camión de tres toneladas 2.7km
Potencia de motor	Capacidad de mover un motor de 1HP por 2hrs
Electricidad	Generación de 1.25kW electricidad

El biogás tiene un poder calórico de 6kW/m³, cercano a medio litro de diesel, en la Tabla 2.7 se muestran las correspondencias de 1m³ con algunos de los combustibles más comunes. El valor calorífico neto es dependiente de la eficiencia de los quemadores.

Tabla 2.7 Correspondencia de 1m³ de biogás con otros combustibles (ICAR, 2008)

Combustible	Poder calorífico aprox. kWh/kg	Correspondencia de 1m³ biogás kg
Diesel	12.0	0.5
Keroseno	12.0	0.5
Madera	4.5	1.3
Estiércol de vaca	5.0	1.2
Residuos de plantas	4.5	1.3
Carbón mineral	8.5	0.7
Gas de la ciudad (gas de hulla)	5.3	1.1
Propano	25.0	0.2

2.3 La digestión

La descomposición anaerobia (en ausencia total de oxígeno o nitratos) de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta proporción en metano (CH₄ en concentración superior al 60 % en el gas), con un potencial calorífico inferior del orden de 5,500 Kcal/m³, y se designa usualmente como biogás. Todo proceso de digestión lleva parejo una eliminación/depuración de la carga orgánica y la producción de este gas.

Las instalaciones especialmente diseñadas para optimizar este proceso se designan como “digestores de metano”, “plantas de biogás” o simplemente “reactores anaerobios”

Este tipo de fermentación, anaerobia con producción de metano, no es más que un tipo de fermentación catalizada por bacterias específicas y de la cual se tienen primeras noticias a través del científico italiano Volta (1776), quien descubrió la formación de un gas combustible sobre pantanos, lagos y aguas estancadas, y que se relacionó con la cantidad de materia orgánica depositada en su fondo. No fue hasta 1868 en que se definió las reacciones como constituyentes de un proceso microbiológico. En 1890, Donald Cameron diseñó una gran fosa séptica para la ciudad de Exeter, en Gran Bretaña, y con el gas obtenido alimentó la red de alumbrado público. Durante la segunda guerra mundial, muchos granjeros de Inglaterra, Francia, e incluso Alemania, construyeron digestores para producir gas combustible y con el alimentar tractores y producir electricidad. Estas instalaciones cayeron en desuso a finales de los años 1950.

La primera instalación de la que se tienen noticias se construyó en Bombay, en 1859 y desde entonces en la India se ha promovido pequeñas plantas, a escala familiar o local, tratando estiércol del ganado vacuno con el objetivo de producir gas para cocinar y obtener, a su vez, un producto fertilizante.

A este nivel se encuentran multitud de pequeñas instalaciones, también, en Taiwán, Corea, Tailandia, Kenya, Sudáfrica y China, donde se han contabilizado miles de digestores en comunas y fábricas. Estas instalaciones son sencillas, sin tratamiento del gas producido (Castells, 2005).

Mediante el proceso de digestión puede tratarse un gran número de residuos:

- Residuos agrícolas y ganaderos
- Lodos de depuradoras biológicas
- Residuos industriales orgánicos
- Aguas residuales municipales e industriales
- Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos

En la naturaleza existen microorganismos que se alimentan de residuos como los mencionados anteriormente. Si estos microorganismos se desarrollan en ausencia del aire (condición anaerobia), al alimentarse con materia orgánica la transforman en gas y en un lodo rico en nutrientes que puede ser utilizado como abono, e incluso como alimento para animales (IIT, 1975).

La transformación es ciertamente un proceso complicado, pues las bacterias requieren de un ambiente propicio muy especial, primero para sobrevivir y luego para multiplicarse hasta alcanzar una población suficiente para que su acción sea apreciable. Estas condiciones son:

- La ausencia de aire, para cumplir con el requisito de condición anaeróbica que permite la supervivencia de los microorganismos.
- Las características del medio (llamado también sustrato) donde crecen y se multiplican las bacterias. Aquí es importante destacar los siguientes puntos:
 - La temperatura que experimentalmente se ha determinado, debe ser mayor a los 20°C para lograr una buena producción.
 - El tipo de material que se está procesando, pues está demostrado que no todos los residuos orgánicos dan el mismo rendimiento.
 - El grado de acidez (conocido como pH). Si el ambiente es muy ácido, o lo contrario, puede causar la muerte de los microorganismos.

Más adelante se analizarán con más detalle estos puntos.

2.3.1 Beneficios de la digestión

Los beneficios de la digestión deben mirarse desde un triple punto de vista; el gas, que puede utilizarse para producir energía; el fertilizante, que por sus características constituye un abono orgánico de calidad y el control de la contaminación que se origina por la descomposición espontánea e incontrolada de la materia orgánica.

2.3.2 Fases de la fermentación

La digestión está caracterizada por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo diversas poblaciones de bacterias, estas etapas se pueden observar en la Figura 2.10.

a) Hidrólisis:

Etapa inicial en la que los compuestos son solubilizados debido a las secreciones enzimáticas de las bacterias, a fin de transformar los polímeros celulares en monómeros de fácil aprovechamiento.

b) Ácidogénesis:

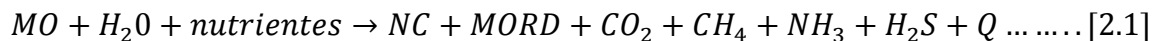
En esta etapa los monómeros resultado de la hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles (AGV) tales como los ácidos acéticos (representando cerca del 70% de los AGV), propiónico y butírico. En esta etapa se forma hidrógeno molecular (H₂) y dióxido de carbono (CO₂).

c) Metanogénesis:

Considerada la etapa metabólica final, en ella la mayoría de las bacterias metanogénicas forman metano a partir del ácido acético, algunas especies son incluso capaces de hacerlo a partir de mezclas de dióxido de carbono y agua, o ácido fórmico y metanol.

Las reacciones bioquímicas básicas dentro de un reactor anaerobio son de oxidación-reducción, donde algunos compuestos son oxidados por la remoción de hidrógeno. El hidrógeno producido es empleado para la producción de ácidos orgánicos y alcoholes con ayuda de la reducción de dióxido de carbono.

Una generalización de la transformación anaerobia de la parte orgánica de los RSU puede ser descrita por medio de la ecuación 2.1 (Tchobangolous y col., 1994).



Donde:

MO: Materia orgánica, NC: Nuevas células, MORD: Materia orgánica resistente a la degradación y Q: Calor.

El proceso anaerobio es considerado como una de las fuentes de energía mas económicas y de fácil adquisición para pequeña generación. El metano al ser un gas inflamable puede se empleado como una fuente de energía térmica en calefactores o cocinas, o como un producto intermedio en la generación de energía eléctrica. Igualmente el biogás con concentraciones por encima del 50% de CH₄ puede ser empleado como combustible para vehículos de combustión interna (Vessilind y col.,2002).

Tenemos que las fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas:

- 1) Bacterias hidrolíticas - acidogénicas
- 2) Bacterias acetogénicas
- 3) Bacterias homoacetogénicas
- 4) Bacterias hidrogenófilas
- 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas

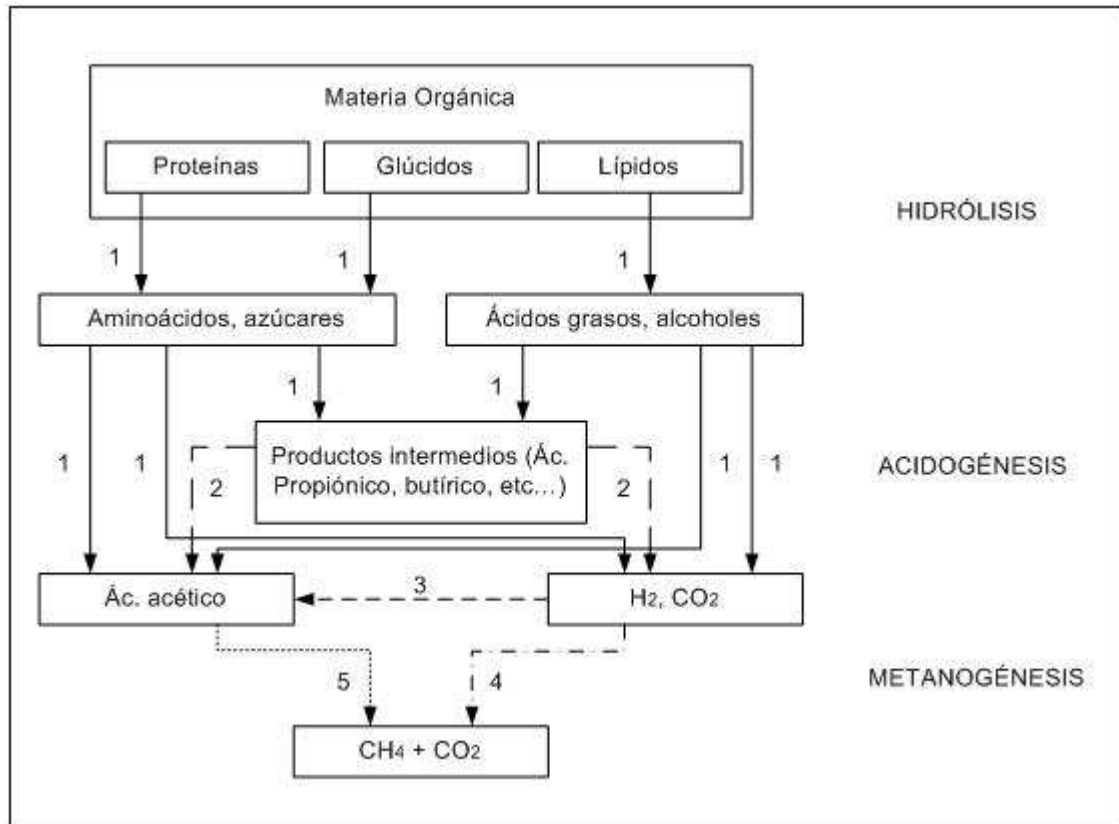


Figura 2.10 Fases de la fermentación anaeróbica (a partir de Guardado, 2007)

La naturaleza y la composición química del sustrato condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana de cada etapa, de manera que se establece un equilibrio fácilmente alterable cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones.

2.3.2.1 Factores biológicos y biodegradabilidad

Pese a que todo residuo orgánico presenta una parte biodegradable constante, la biodegradabilidad práctica es bastante variable. Siendo afectada por factores tales como, el tamaño de las partículas, el clima y el tiempo. Lo anterior es el causante de que la biodegradabilidad estimada suela ser mayor a la práctica. Siendo que la biodegradabilidad del sustrato empleado en un reactor anaerobio con fines de producción energética es de vital importancia, se debe profundizar más en el tema y establecer algunos conceptos.

Todo sustrato orgánico consiste de dos partes: Los sólidos volátiles (SV), definidos como la pérdida de masa en la combustión y las cenizas (C). Unidas forman lo que conocemos como sólidos totales (ST). A su vez los sólidos volátiles pueden subdividirse en sólidos volátiles biodegradables (SVB) y los sólidos volátiles obstinados (SVO), los cuales en la mayoría de los casos suelen ser lignina. La lignina es un constituyente intercelular incrustante o cementante de las células vegetales, la lignina es altamente resistente ante el ataque de microorganismos y algunas sustancias químicas (Nour-Eddine, 2007) lo que ocasiona que el proceso de degradación biológica requiere largos

periodos de tiempo. La Figura 2.11 Tiene como objetivo facilitar la apreciación de los componentes antes mencionados.

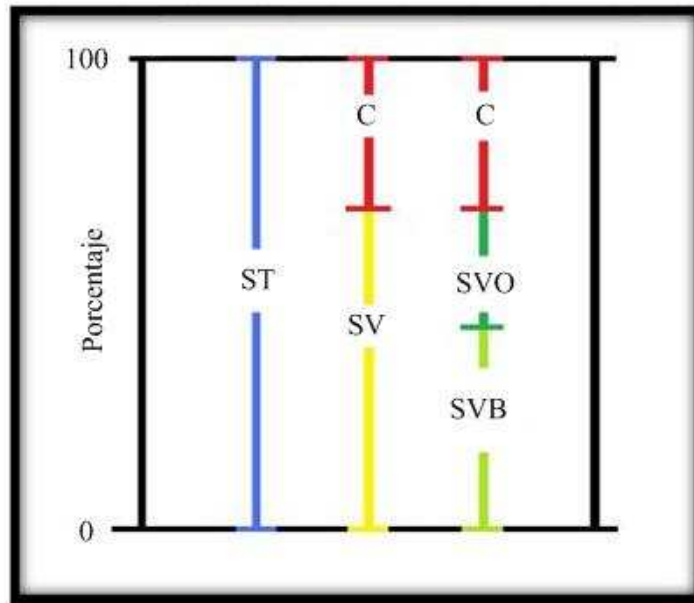


Figura 2.11 Características típicas de un sustrato orgánico (Goswani y Kreith, 2008)

2.3.2.2 Métodos de estimación de biodegradabilidad

Conocer la fracción de SVB que componen los SV de las fracciones individuales permite conocer la biodegradabilidad de la mezcla de RSU. Son tres los métodos más empleados para estimar el contenido de SVB de una sustancia.

a) Reactores de una carga a largo plazo

El estudio en reactores de una carga a largo plazo consiste en un análisis gráfico de la continua pérdida de peso del sustrato en degradación. Este método usa como base la regresión lineal a fin de conocer la pérdida de peso cuando el tiempo de residencia tiende a infinito. Una alternativa a lo anterior, es la comparación entre la masa inicial y la masa final en seco.

Despreciando la cantidad de materia que fue convertida en microorganismos, realizando el proceso con dos reactores de iguales dimensiones variando la cantidad de inóculo agregado, puede considerarse que la masa perdida del sustrato inicial fue convertida en biogás.

En la Tabla 2.8 se muestra los estimados del porcentaje de SVB contenidos en la fracción de SV para diversos componentes de los RSU.

Tabla 2.8 Estimación de SVB contenidos en varios sustratos con base a reactores de una carga en larga duración (Goswami y Kreith, 2008)

Substrato orgánico	% SVB de la fracción de SV
Papel periódico	23.7
Papel de oficina	82.7
Desperdicios de comida	82.8
Desechos de jardín	71.8
Mezcla	69.8

b) Medición del contenido de lignina

Otro de los métodos analíticos disponibles para la determinación de la fracción de SVB de un sustrato es la medición del contenido de lignina (CL) del mismo. Correlacionaron la biodegradabilidad de varios sustratos con su contenido de lignina encontrado mediante el análisis secuencial de fibras de (Soest y Robertson, 1980). La correlación empírica encontrada entre el contenido de lignina y la biodegradabilidad de un sustrato se muestra en la ecuación 2.2. La Tabla 2.9 muestra el contenido de lignina de algunos sustratos.

$$SVB = 0.83 - (0.028)(CL) \dots \dots \dots [2.2]$$

Donde:

Fracción biodegradable (SVB) esta expresada en un porcentaje de los SV y el contenido de lignina (CL) esta expresado en porcentaje del material orgánico.

Tabla 2.9 Contenido de lignina de algunos sustratos orgánicos (Chandler y col., 1980)

Substrato orgánico	Contenido de lignina	% Promedio de SVB
Papel periódico	20-23	22
Papel de oficina	0.2-1	82
Desechos de jardín	4-10	72
Desperdicios de comida	0.1-0.7	82
Mezcla	4-7	67.6

c) Estudios de quimiostato:

El último estudio a tratar está basado en la técnica de “La materia orgánica verdaderamente digerible”, desarrollada por médicos veterinarios para cuantificar la digestibilidad de los alimentos de animales (Soest y Robertson, 1980). La prueba consiste en una degradación in vitro en los fluidos del rumen durante 48h. Una variación de la técnica del quimiostato es el ensayo denominado potencial bioquímico de metano (PBM), el cual determina la biodegradabilidad de cierto sustrato monitoreando la producción acumulativa de metano producida por una muestra del mismo que es incubada anaerobiamente (típicamente 30 días a 35°C) en un medio químico definido.

2.3.3 Producción de biogás

Existen diversos factores capaces de alterar el comportamiento microbiano dentro de un reactor y por ende ocasionar variaciones en la eficiencia del mismo. Los factores antes mencionados incluyen: La temperatura, el grado de acidez del sustrato también llamado potencial de hidrógeno (pH), la composición del sustrato orgánico, el mezclado y la presencia de sulfatos. El efecto de los factores se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12 Síntesis del efecto de los parámetros físico químicos sobre la producción de biogás (Maya y Pérez, 2010)

2.3.4 Parámetros ambientales y operacionales del proceso

2.3.5 Potencial de hidrógeno

El pH es el grado de acidez de una sustancia, es decir la concentración de iones de H^+ en una solución acuosa, el pH también se expresa a menudo en términos de concentración de iones hidronio. El agua y todas las soluciones acuosas contienen concentraciones de iones H^+ así como de iones de OH. En el agua pura se cumple que la concentración de iones H^+ es igual a la concentración de iones OH, por eso se dice que el agua es neutra.

Como las concentraciones de iones H^+ de y OH son muy pequeñas, en 1909, el químico danés Sorensen definió el potencial de hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones de hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log[H^+] \dots \dots \dots [2.3]$$

Desde entonces, el término pH ha sido universalmente utilizado por la facilidad de su uso, evitando así el manejo de cifras largas y complejas. Por ejemplo, una concentración de $[H^+] = 1 \times 10^{-8}$ (0.00000001) es simplemente un pH de 8 ya que: $pH = \log [1 \times 10^8] = 8$

Diversos estudios de laboratorio han demostrado que los valores de pH por debajo del neutral (7), son indicadores de fallo en un reactor. Igualmente se cita al valor 6.2 como punto de cese total de producción de gas metano (Vesselind y col., 2002). Las bacterias productoras de metano suelen vivir mejor en ambientes de pH neutro o ligeramente alcalino. Una vez que el proceso anaerobio se estabiliza el pH del reactor suele variar entre 7 y 8.5 debido al efecto amortiguador de dióxido de carbono y el amoniaco/amonio ($\text{NH}_3\text{-NH}_4$) el nivel de pH es raramente considerado como medida potencial de producción de biogás. Un reactor con altas concentraciones de ácidos volátiles requiere un pH más elevado de lo normal (ISAT, 2009).

2.3.5.1 Potencial redox

El potencial redox debe ser suficientemente bajo para asegurar el desarrollo de poblaciones metanogénicas estrictas. Las bacterias metanogénicas requieren potenciales inferiores de oxidación-reducción inferiores a -300 mV.

2.3.5.2 Nutrientes

Todos los compuestos orgánicos contienen nitrógeno. Para los altos valores de pH, incluso una baja concentración de nitrógeno es capaz de inhibir el proceso de fermentación. Una visible inhibición ocurre a las concentraciones amoniaco-nitrógeno de 1700mg por litro de sustrato. Los microorganismos necesitan tanto carbono como nitrógeno para la construcción de estructuras celulares. Varios experimentos muestran actividades metabólicas óptimas por parte de las bacterias metanógenas a relaciones C/N de 8-20, variando según la naturaleza del sustrato (ISAT, 2009). La Tabla ... muestra las relaciones C/N para diversos materiales.

2.3.5.3 Temperatura

El proceso de la digestión puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura (Figura 2.13):

- Psicrófilo: Por debajo de 20°C.
- Mesófilo: Entre 30°C y 40°C.
- Termófilo: Entre 50°C y 70°C.

Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento de las bacterias y con ello la velocidad en la producción de biogás. También disminuye la viscosidad, lo que puede permitir un menor consumo energético para bombeo y agitación. Trabajando en el rango termofílico se asegura, además, la destrucción de patógenos, la eliminación de malas hierbas y de huevos y de larvas de insectos, por lo cual presenta interés para el tratamiento de residuos que han de ser aplicados a suelos y cultivos, que requieran un cierto grado de higienización. A pesar de las grandes ventajas de los sistemas termofílicos, éstos requieren mayor control y seguimiento, debido a que a altas temperaturas, el nitrógeno amoniacal se comporta como inhibidor. Ésto puede soslayarse mediante mezclas de residuos de diferente origen para disminuir la concentración de nitrógeno. En la Tabla 2.10 puede observarse una comparación entre los reactores termófilos y mesófilos.

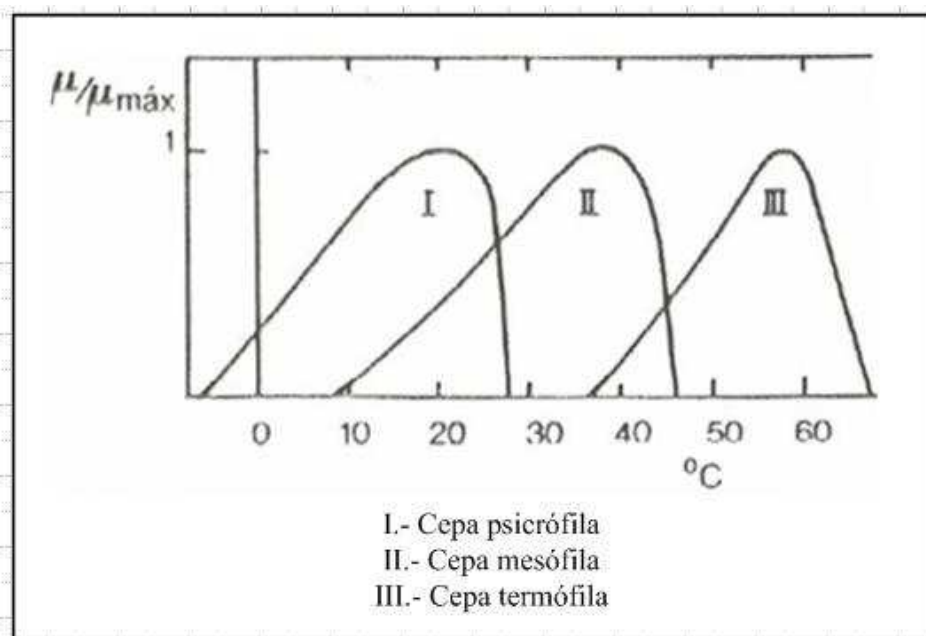


Figura 2.13 Etapas de crecimiento bacterias, (Guardado, 2007)

Tabla 2.10 Ventajas y desventajas de reactores termofílicos y mesofílicos (Castro, 2008)

Reactor termófilo	Reactor mesófilo
Menor % de dióxido de carbono	Menor formación de lodos digeridos
Menor humedad en el biogás	Mayor actividad microbiana
Mayor diversidad metanogéna	Equilibrio microbiano frágil
Balance energético más favorable	Destrucción de organismos patógenos
Mayor tiempo de residencia hidráulica	Menor tiempo de residencia hidráulica
Menor costo de implementación	Mayor complejidad tecnológica

2.3.5.4 Toxicidad e inhibición

Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoníaco libre o el ácido sulfhídrico son inhibidores de importancia de las bacterias metanogénicas. Estos compuestos presentan una inhibición de tipo reversible. Los metales pesados también son inhibidores, o tóxicos a altas concentraciones.

La aclimatación de las poblaciones bacterianas juegan un papel importante en el momento de definir concentraciones críticas, así como el efecto sinérgico o antagónico que la presencia de una sustancia puede tener sobre la actividad tóxica de otra. Las concentraciones a partir de las cuales el amoníaco libre es un inhibidor no están definidas nítidamente. Así, mientras unos autores proponen el valor de

200 mgN/L, otros proponen el de 700 mgN/L. Las diferencias que se encuentran sobre este valor en la bibliografía son debidas a aclimatación de las bacterias y al hecho que la concentración de amoníaco libre depende del pH y la temperatura.

2.3.5.5 Agitación ó mezclado

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

- Mezclado y homogeneizado del substrato de alimentación con el substrato en digestión.
- Distribución uniforme de calor para mantener una isoterma suficientemente correcta.
- Evitar la formación de espumas o la sedimentación.
- Favorecer la transferencia de gases, que puedan ser atrapados en forma de burbujas en el substrato.

La potencia necesaria para cubrir la demanda energética de la agitación varía en función del volumen y la forma del digestor, y de las características del residuo. Se encuentran valores comprendidos entre 10 y 100 Wh/m³día. Usualmente se recomiendan valores superiores a 30 Wh/m³día. La agitación puede ser mecánica o neumática (burbujeo de gas recirculado a la presión adecuada). En todo caso nunca ha de ser violenta, ya que podría destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener el proceso estable (Pedraza y col., 1999).

2.3.5.6 Otros parámetros

Otros parámetros, tales como tiempo de retención o velocidad de carga orgánica, dependen del tipo de reactor adoptado, de las características del substrato y de aspectos cinéticos.

2.3.6 Producción de abono orgánico

Además del biogás, el proceso de digestión deja como residuo un lodo compuesto por el material no atacado por las bacterias y por el material digerido por éstas. Este lodo, conocido también como el efluente, constituye un fertilizante orgánico de muy buena calidad. La aplicación del efluente al suelo le trae beneficios similares a los que se alcanzan en cualquier materia orgánica. Es decir, que actúa como mejorador de las características físicas, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad, la capacidad de infiltración de agua y la capacidad de intercambio catiónico.

Además, actúa como fuente de energía y nutrientes para el desarrollo de los núcleos microbianos que mejoran la solubilidad de los compuestos minerales del suelo. En este sentido, presenta ventajas sobre el uso directo de la materia orgánica, como lo demuestran las experiencias adelantadas por varios investigadores.

Se ha encontrado, por ejemplo, que la aplicación del efluente de reactores anaerobios que operan con estiércol de res, en ensayos comparativos con uso directo del estiércol, ha mejorado los rendimientos agrícolas del maíz, en un 2.8%, del arroz en 10-14%, del algodón en 24.7% y del trigo en 12.5-16%. Ello se debe en parte a la mayor facilidad de absorción de los nutrientes, y a la mayor riqueza del efluente: Contiene 1.5% de nitrógeno contra 0.75% del estiércol, y 0.7% de K₂O contra

0.4% de la materia prima. Esta situación hace que el efluente sea más efectivo que muchos de los abonos orgánicos químicos utilizados normalmente (Castells, 2005).

2.3.7 La digestión y el control de la contaminación

La materia orgánica es contaminante debido a que las bacterias que la destruyen para alimentarse, absorben el oxígeno del agua en la cual se descarga. En estas condiciones, las bacterias pueden llegar a remover tanto oxígeno que la vida aeróbica desaparece y las aguas mueren.

Por esta razón no es conveniente desechar los residuos directamente en ríos, quebradas o depósitos de agua. Tampoco se deben esparcir por el suelo para que se descompongan libre y espontáneamente en contacto con el aire, pues el proceso da lugar a la aparición de microorganismos de alto riesgo para la salud, como los virus de polio, las salmonellas que causan enfermedades estomacales y otros.

2.3.8 Producción de biogás en la Unión Europea

La producción de biogás en la Unión Europea en el año 2006 y 2007, proveniente del gas de vertedero, el gas de aguas residuales y otras fuentes, se puede observar en cifras dadas en miles de toneladas equivalentes de petróleo (KTEP) en la Tabla 2.11.

Sobre la base de diferentes estudios y la experiencia de los países miembros acerca del potencial real para el biogás hasta el año 2020 se puede calcular para los 27 estados miembros de la Unión Europea como sigue:

Sin perjudicar la producción de alimentos y el medio ambiente nacional estas hectáreas serán necesarias para producir materia prima para los combustibles de primera generación, para el calor, electricidad y carburantes de segunda generación y para los cultivos de biogás (AEBIOM, 2008). Los escenarios más favorables para el biogás son:

- 15 millones de hectáreas de tierra se utiliza para los biocarburantes de primera generación (trigo, la remolacha azucarera, etc.)
- 5 millones de hectáreas de bosques de cultivo corto, *Miscanthus* y la producción de la biomasa sólida y otros
- 5 millones de hectáreas para los cultivos de biogás.

Estos datos se pueden observar en la Tabla 2.12

Tabla 2.11 Producción primaria de biogás en la Unión Europea 27 en 2006 y 2007 (KTEP), (AEBIOM, 2008)

Países	2006				2007			
	Gas de vertedero	Gas aguas residuales	Otras fuentes biogás	Total	Gas de vertedero	Gas de aguas residuales	Otras fuentes de biogás	Total
Alemania	383.2	270.2	1,011.7	1,665.1	416.4	270.2	1,696.5	2,383.0
Austria	11.2	3.5	103.4	118.1	10.7	2.0	126.4	139.1
Bélgica	51.0	17.6	9.1	77.7	48.1	18.0	12.5	78.6
Chipre	-	-	0.0	0.0	-	-	0.2	0.2
Dinamarca	14.3	21.0	57.6	92.9	14.3	21.0	62.6	97.9
Eslovaquia	0.4	6.9	0.4	7.7	0.5	7.6	0.5	8.6
Eslovenia	6.9	1.1	0.4	8.4	7.6	0.6	3.8	12.0
España	251.3	48.6	19.8	319.7	259.6	49.1	21.3	330.0
Estonia	3.1	1.1	-	4.2	3.1	1.1	-	4.2
Finlandia	26.1	10.4	-	36.5	26.4	10.3	-	36.7
Francia	150.5	144.0	3.6	298.1	161.3	144.2	3.7	309.2
Grecia	21.2	8.6	-	29.8	38.0	9.8	-	47.8
Holanda	46.0	48.0	47.1	141.1	43.2	48.0	82.8	174.0
Hungría	1.1	8.0	3.1	12.2	2.1	12.4	5.7	20.2
Irlanda	25.4	5.1	1.8	32.3	23.9	7.9	1.7	33.5
Italia	337.4	1.0	44.8	383.2	357.7	1.0	47.5	406.2
Lituania	-	1.5	0.5	2.0	1.6	0.8	-	2.4
Luxemburgo	-	-	9.2	9.2	-	-	10.0	10.0
Polonia	18.9	43.1	0.5	62.5	19.1	43.0	0.5	62.6
Portugal	-	-	9.2	9.2	-	-	15.4	15.4
Reino Unido	1,318.5	180.0	-	1,498.5	1,433.1	191.1	-	1,624.0
Republica Checa	24.5	31.1	7.8	63.4	29.4	32.1	17.0	78.5
Suecia	9.2	17.1	0.8	27.1	9.2	17.1	0.8	27.1
Unión Europea 25	2,007.3	867.8	1,330.8	4,898.9	2,905.2	887.2	2,108.0	5,901.0

Tabla 2.12 Potencial de biogás en el año 2020 en la Unión Europea (AEBIOM, 2008)

Origen (de acuerdo a la plantilla Planes de Acción para la Energía Renovable Nacional)	Potencial billones m ³ Biometano	2020		
		% Asumido de uso durante 2020	Energía primaria billones m ³ Biometano	Energía primaria MTEP
Agricultura	58.9	62.0	36.4	31.3
Cultivos agrícolas provenientes directamente de la generación de energía	27.2	100.0	27.2	23.4
Productos agrícolas y residuos procesados	31.7	28.0	9.2	7.9
Paja	10.0	5.0	0.5	0.4
Estiércol	20.5	35.0	7.2	6.0
Resto (administración del vertedero)	1.2	40.0	0.5	0.4
Residuos	19.0	50.0	9.5	8.2
Fracción biodegradable de los residuos sólidos municipales, incluye residuos orgánicos	10.0	40.0	4.0	3.4
Fracción biodegradable de residuos industriales (papel, cartón, etc.)	3.0	50.0	1.5	1.3
Aguas residuales, lodo	6.0	66.0	4.0	3.4
Total	77.9	59.0	45.9	39.5

En la Figura 2.14 se puede observar el potencial de metano entre el año 2007 y 2020, aquí se toma en cuenta el estiércol animal, cultivos de energía y residuos.

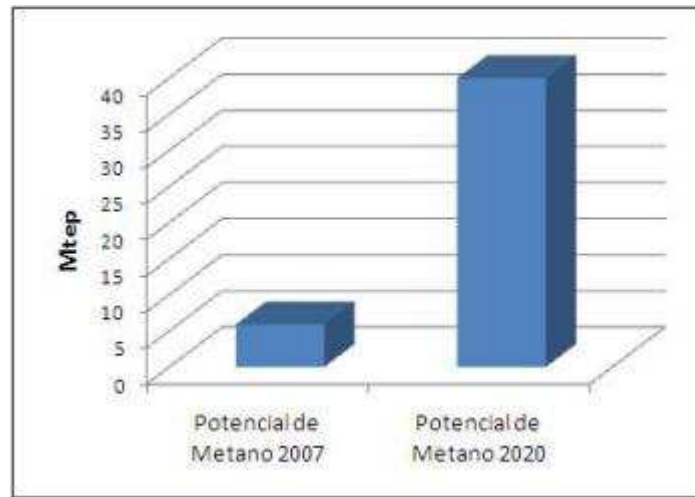


Figura 2.14 Potencial de metano entre el año 2007 y 2020 en la Unión Europea (a partir de AEBIOM, 2008)

2.4 Criterios para considerar en el diseño de un reactor anaerobio

Los siguientes son los aspectos a tener en cuenta en el diseño, planificación y construcción de un reactor anaerobio (FHC, 2005).

Los factores humanos son los siguientes:

- Necesidad, la cual puede ser: Sanitaria, energía y de fertilizantes.
- Recursos disponibles de tipo económicos, materiales de construcción, mano de obra, utilización del producto, área disponible.
- Disponibilidad de materia prima, si se cuentan con desechos agrícolas, desechos pecuarios, desechos domésticos, desechos urbanos, desechos industriales.

Los factores biológicos son:

- Enfermedades y plagas tanto humanas como pecuarias y agrícolas

Los factores físicos son:

- Localización, la ubicación si es en zona urbana, rural o semi-urbana y la geografía aspectos como la latitud, longitud y altitud.
- Climáticos dentro de estos aspectos están las temperaturas máximas y mínimas, la precipitación pluvial, la humedad ambiental, la intensidad solar, los vientos su intensidad y dirección.
- Vías de acceso.
- Topografía, teniendo en cuenta el declive del suelo: si es plano, ondulado, o quebrado.

- Suelos con sus características como la textura, estructura, nivel freático y capacidad agrológica.

Los factores de construcción son:

- Técnicas de construcción si es de tierra compactada, cal y canto o ladrillo.
- Depósitos de plástico prefabricados.

Los factores utilitarios son:

- Función principal, si se construye de manera experimental, demostrativa o productiva.
- Usos, si el uso es de tipo sanitario, energético, fertilizante, integral.
- Organizativo si el reactor anaerobio se va a construir a escala domestica, para grupo familiar, comunitario o empresas.
- Capacidad, si es pequeño de 3 a 12 m³ / digestor; si es mediano de 12 a 45 m³ digestor y si es grande de 45 a 100 m³ / digestor.

Operación de la instalación contemplando aspectos como el funcionamiento del pre tratamiento, la mezcla, la carga, y controles de pH, obstrucciones de líquidos, sólidos y gases: las descargas de efluentes tanto líquidas como gaseosas y de lodos; el almacenamiento de los líquidos, sólidos y gases; la aplicación de líquidos por bombeo, por tanques regadores o arrastre por riego; los sólidos que están disueltos en el agua y los sólidos en masa y por último los gases utilizados para la cocción, iluminación e indirectamente en los motores.

Con el objetivo de disminuir el tamaño de los digestores se han utilizado los productos orgánicos que brindan mayor cantidad de biogás por unidad de volumen; algunos de ellos son: La excreta animal, la cachaza de la caña de azúcar, los residuales de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como la materia seca vegetal (Martínez, 2008).

2.5 Tipos de reactores anaerobios

Hay muchos tipos de plantas del biogás pero los más comunes son el domo flotante (indio) y el domo fijo (chino). La aceptabilidad pobre de muchos de estos reactores ha sido principalmente debida a los costos altos, la dificultad de instalación y problemas en la consecución de las partes y repuestos (FHC, 2005).

2.5.1 Fosas sépticas

Es el más antiguo y sencillo reactor anaerobio que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de allí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaerobia, para el uso doméstico. En la Figura 2.15 se puede observar el tren de tratamiento de una fosa séptica.

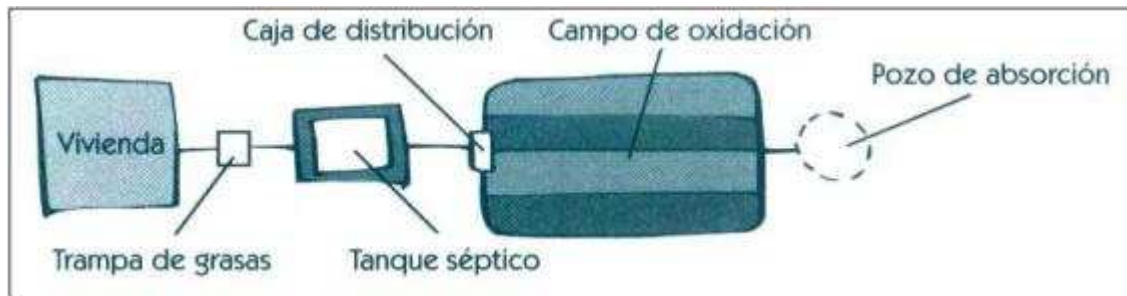


Figura 2.15 Ubicación de la fosa séptica en la instalación, (OPS, 2005)

Para la correcta operación de estas fosas es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en ella, de las que contienen jabón o detergentes. El efecto de los jabones y en especial los detergentes, inhibe la acción metabólica de las bacterias, razón por la que los pozos se colmatan con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para recomenzar la operación.

Cuando no es posible separar las aguas negras de las jabonosas, como en el alcantarillado urbano, es necesario hacer un tratamiento químico con polímeros a esta agua a fin de solucionar el problema antes de iniciar la fermentación anaeróbica. Se puede observar la Figura 2.16 aparece una trampa de grasas y en la Figura 2.17 la fosa séptica.

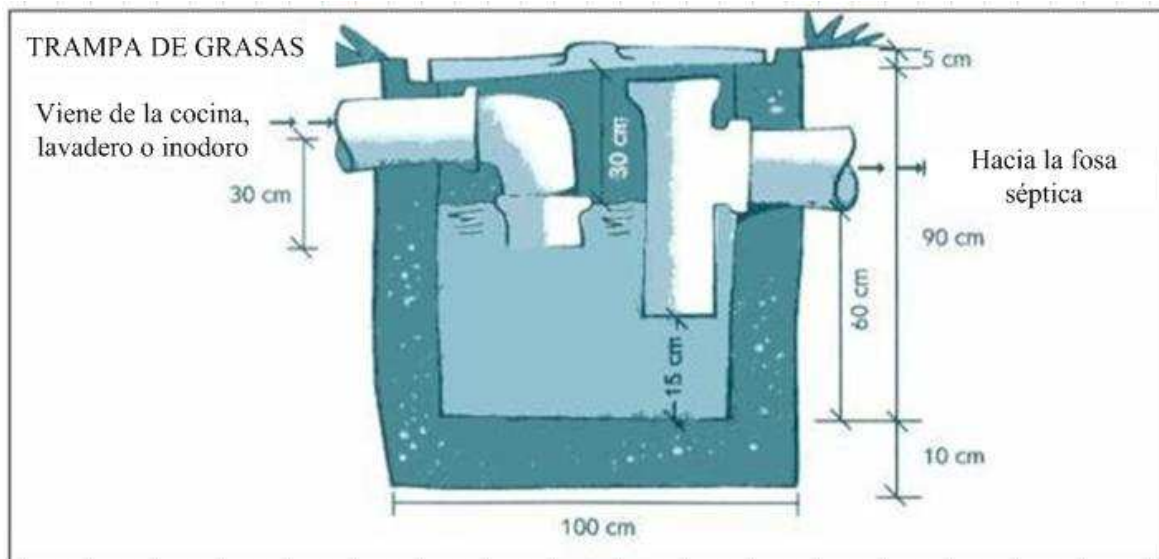


Figura 2.16 Trampa de grasas, (OPS, 2005)

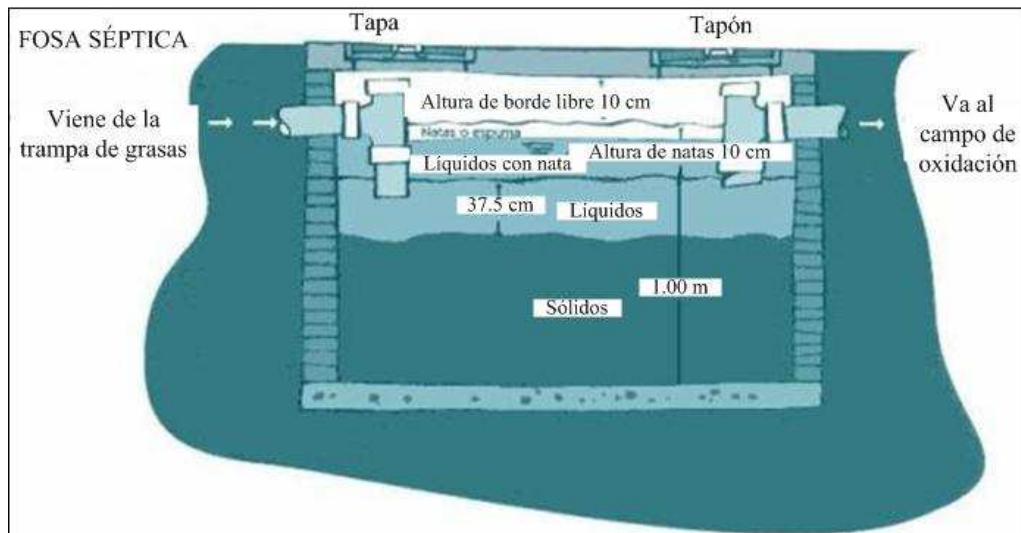


Figura 2.17 Fosa séptica, (OPS, 2005)

2.5.2 Reactor anaerobio de domo flotante (indio)

Este reactor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico, para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón. Se entrapa el biogás producido bajo una tapa flotante que sube y se cae en una guía central. La presión del gas disponible depende del peso del poseedor de biogás por el área de la unidad y normalmente varía entre 4 a 8 cm de presión de agua. Se puede observar en la Figura 2.18 que el reactor se alimenta semi-continuamente a través de una tubería de entrada.

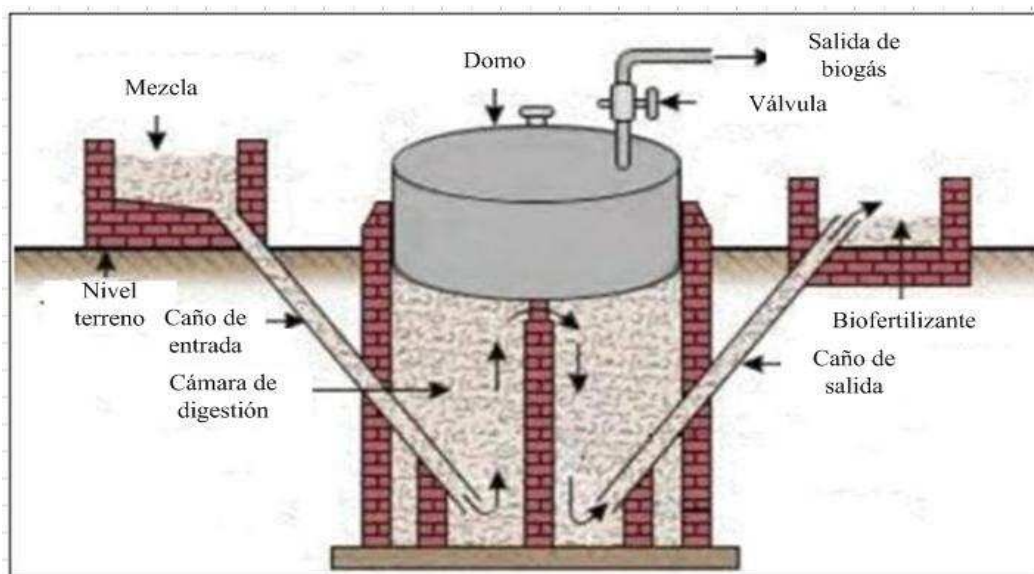


Figura 2.18 Reactor anaerobio de domo flotante, indio (FHC, 2005)

2.5.3 Reactor anaerobio de domo fijo (chino)

Este reactor consiste en una cámara de gas-firme construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cima y fondos son hemisféricos y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y extremos nivelados. Hay un tapón de la inspección a la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo y cambia de sitio algunos de los volúmenes del digestor en la cámara del efluente, con presiones en el domo entre 1 y 1.5 m de agua. Ésto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la razón para la cima hemisférica y el fondo. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de reactores anaerobios, Figura (2.19). Más de cinco millones reactores anaerobios se han construido en China y ha estado funcionando correctamente (FAO, 1992) pero, desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de China.

Esta instalación tienen como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

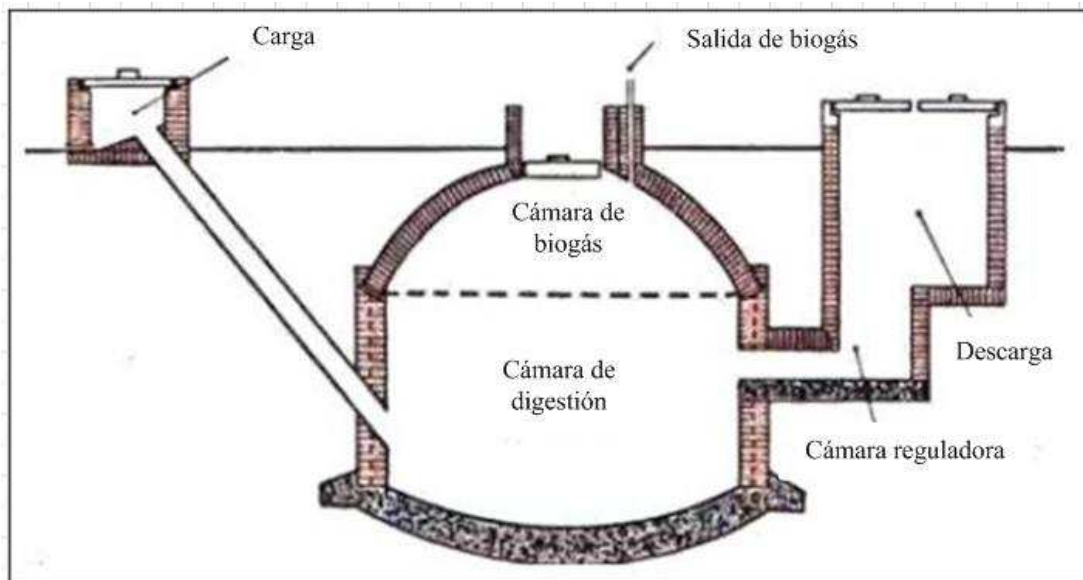


Figura 2.19 Reactor anaerobio de domo fijo, chino, (FHC, 2005)

2.5.4 Reactor anaerobio de estructura flexible

La inversión alta que exigía construir el reactor de estructura fija resultaba una limitante para el bajo ingreso de los pequeños granjeros. Esto motivó a ingenieros en la Provincia de Taiwán en los años sesenta (FAO, 1992) a hacer reactores anaerobios de materiales flexibles más baratos. Inicialmente se usaron nylon y neopreno pero ellos demostraron ser relativamente costoso. Un desarrollo mayor en los años setenta era combinar PVC con el residuo de las refinerías de aluminio producto llamado "el barro rojo PVC."

Ésto fue reemplazado después por polietileno menos costoso que es ahora el material más comúnmente usado en América Latina, Asia y África. Desde 1986, el Centro para la Investigación

en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando el reactor anaerobio de plástico económico como la tecnología apropiada por hacer mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo la presión así en otros recursos naturales.

Se puede observar el reactor anaerobio de polietileno en la Figura 2.20, el biogás se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma.

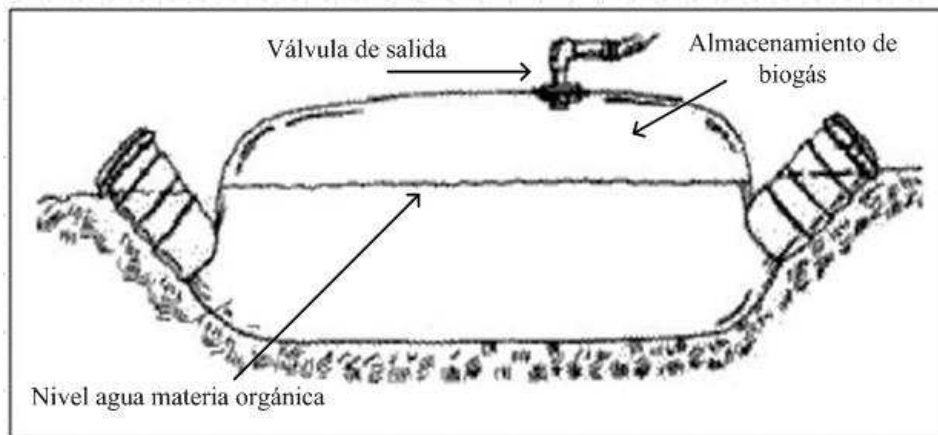


Figura 2.20 Reactor anaerobio de polietileno (Pedraza y col., 1999)

Dentro de los componentes que utiliza el reactor anaerobio de polietileno se tienen:

- Tubo de admisión
- Fermentador y bolsa de almacenamiento
- Tubo del afluente
- Tubo de metano
- Dispositivo de seguridad
- Tubo de limpieza
- Instalación
- Mantenimiento

2.5.5 Reactores anaerobios de alta velocidad o flujo inducido

Estos son los utilizados comúnmente en instalaciones industriales o semi industriales. Generalmente trabajan a presión constante, por lo que se podrían catalogar como Digestores Tipo indio modificado. Se les conoce de ordinario como reactor convencional de agitación (CSTD). Se diferencian de los reactores anaerobios convencionales en que se les ha agregado algún tipo de agitación mecánica, continua o intermitente, que permite al material aún no digerido, entrar en contacto con las bacterias activas y así obtener buena digestión de la materia orgánica, con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, de hasta 15 días. Éste es un concepto nuevo dentro de la tecnología de fermentación anaerobia, combina las ventajas de varios tipos de digestores en una

sola unidad, facilitando el manejo y procesamiento de material biodegradable de diverso origen y calidad.

Generalmente los desechos de origen animal, excrementos de cualquier clase, son procesados en digestores convencionales de tipo continuo, que periódicamente reciben carga y entregan por desalajo efluente ya digerido. El tiempo de operación continua de estos equipos es bastante largo y requiere un mínimo de atención al momento de cargarlos, como es el evitar introducir elementos extraños tales como arena, piedra, metal, plásticos o cualquier otro tipo de material lento o imposible de digerir. Luego de unos cuatro o cinco años se debe detener su funcionamiento para hacer una limpieza general y retirar sedimentos no digeridos. Buscando un tipo de digestor ideal, se llegó al concepto de digestor de Segunda y Tercera generación, siendo los clásicos modelos indio o chino, los de la primera generación.

Este nuevo modelo de digestor retiene la materia de origen vegetal, que normalmente tiende a flotar, dentro de las zonas de máxima actividad bacteriana como son la inferior y la de sobrenadante intermedia, para que las bacterias tengan tiempo de atacar, hidrolizar y procesar efectivamente el material en descomposición; al mismo tiempo permite que los gases y el material parcialmente degradado sigan el recorrido del proceso normal dentro del digestor (FHC, 2005).

Ventajas de los Digestores de alta velocidad o flujo inducido

- Menor tiempo de operación
- Evita la formación de una costra de material dentro del digestor
- Logra la dispersión de materiales inhibitorios de la acción metabólica de las bacterias, impidiendo concentraciones localizadas de material potencialmente tóxico para el sistema
- Ayuda a la desintegración de partículas grandes en otras más pequeñas, que aumentan el área de contacto y por lo tanto la velocidad de digestión
- Mantiene una temperatura más uniforme de la biomasa dentro del digestor para una reacción y degradación más uniformes
- Inhibe el asentamiento de partículas biodegradables de mayor tamaño
- Permite una más rápida separación y el ascenso del gas a medida que se va formando dentro del digestor
- Mejora las condiciones de control y estabilidad de la biomasa dentro del digestor

Precauciones a tener en cuenta con los reactores anaerobios de alta velocidad o flujo inducido

Cuando al digestor convencional de tipo continuo se introducen indiscriminadamente materiales orgánicos de origen vegetal como pasto u hojas de árbol, sobrantes de cosechas o basuras biodegradables, que tienden a flotar en el agua por su alto contenido celulósico, terminan por atascarlo y parar su operación efectiva en poco tiempo, incluso días, dependiendo de la cantidad de material suministrado.

Para evitar taponamientos, la materia de origen vegetal se procesa en digestores convencionales en tandas o carga única (Batch Digestors) en ciclos de 60 a 80 días, lo que supone que para el suministro de gas y efluente durante un año, se debe disponer mínimo de cuatro unidades con una producción alternada. Estas soluciones representan un alto costo y un gran esfuerzo.

2.5.6 Los reactores anaerobios de segunda y tercera generación

Los reactores de segunda generación dividen al convencional en dos cámaras, una de ellas a un nivel inferior del resto del digestor. Utiliza compartimentos en ferrocemento o mampostería, espaciados adecuadamente para retener los materiales y las partículas sólidas grandes, pero permite el paso del gas y los líquidos. A este modelo se puede adicionar hasta un 25% de carga de origen vegetal sin que se atasque o paralice la operación (Guardado, 2007).

Los reactores anaerobios de Tercera Generación modifican radicalmente al de tipo indio tradicional, aunque sigue los lineamientos de esta escuela. Ha logrado una eficiencia de trabajo en forma continua que permite cargarlo con toda clase de materiales, hasta un 50 o 60% de materia de origen vegetal mezclada con excrementos, empleando una sola unidad que trabaja en forma de digestor continuo (Figura 2.21).

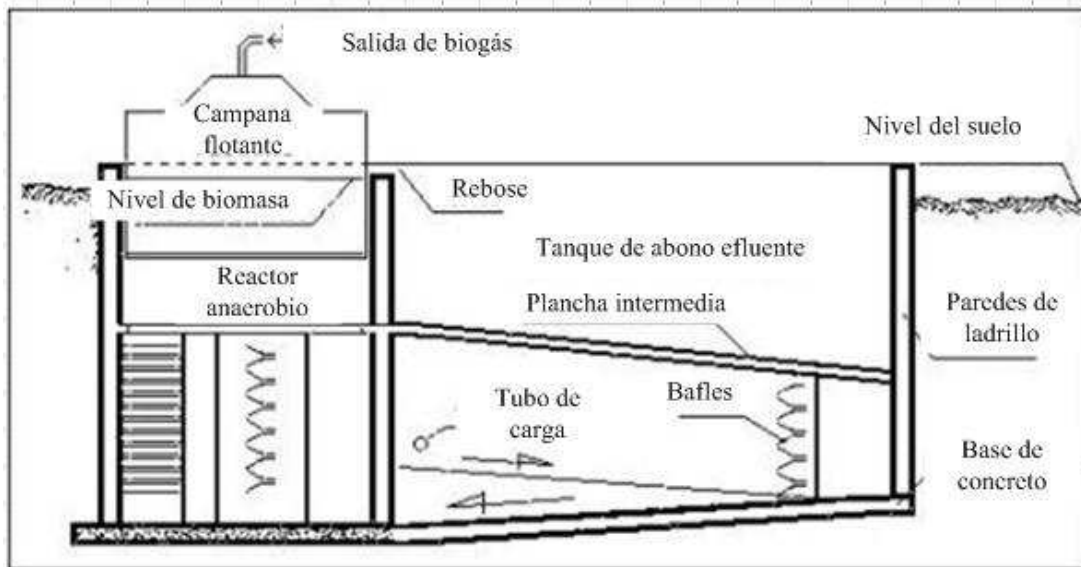


Figura 2.21 Esquema reactor anaerobio tercera generación, (FHC, 2005)

2.5.7 Instalaciones Industriales

Las instalaciones industriales de producción de biogás emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado.

Este tipo de planta, debido al gran volumen de materia orgánica que necesita para garantizar la producción de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtiene, se diseña con grandes estanques de recolección y almacenamiento contruidos de ladrillo u hormigón, se puede observar en la Figura 2.22. Con el objetivo de lograr su mejor funcionamiento se usan sistemas de bombeo para mover el material orgánico de los estanques de recolección hacia los reactores anaerobios, y el biofertilizante de los digestores hacia los tanques de almacenamiento. También se utilizan sistemas de compresión en los tanques de almacenamiento de biogás con vistas a lograr que éste llegue hasta el último consumidor.

Para evitar los malos olores se usan filtros que separan el gas sulfhídrico del biogás, además de utilizarse válvulas de corte y seguridad y tuberías para unir todo el sistema y hacerlo funcionar según las normas para este tipo de instalación.

La tendencia mundial en el desarrollo de los reactores anaerobios es lograr disminuir los costos y aumentar la vida útil de estas instalaciones, con el objetivo de llegar a la mayor cantidad de usuarios de esta tecnología (FHC, 2005).



Figura 2.22 Reactor anaerobio industrial (Pedraza y col., 2002)

2.5.8 Reactores anaerobios en el mundo

Con el paso de los años China es probablemente el país con más experiencia en la práctica de la digestión en zonas rurales. Existen algunos digestores que llevan trabajando desde 1920 en China, actualmente se tienen 4.4 millones de reactores anaerobios domésticos trabajando, la mayoría de estos situados en áreas rurales.

El descubrimiento de los reactores anaerobios fue en 1920 y corrió a cargo de Lo Guo-ruí, su primer reactor anaerobio lo realizó en su hogar ubicado en Swatow. Después de construir varios fundó su propia empresa, la cual estaba situada en Shanghai, además de construirlos se dedicó a capacitar gente para que siguieran construyendo digestores (Hawkes, 1986).

2.6 Substrato a digerir

El substrato a digerir es la materia prima que será empleada como fuente de energía. De sus características y nutrientes así como de las temperaturas de operación depende en gran medida la producción de biogás. La disponibilidad del substrato puede y debería ser calculada mediante el empleo de al menos dos métodos paralelos.

- Medida directa de la disponibilidad del substrato en la localidad donde se planea implementar el sistema de aprovechamiento de biogás
- Empleo de datos literarios y estadísticos sobre la disponibilidad del substrato

La medida directa presenta la desventaja de cierto grado de subjetividad a menos que se realice en largos periodos de tiempo, ya que la cantidad de desechos suele variar según la estación del año, el clima y la situación económica de la época. El empleo de datos literarios suele proporcionar una mejor aproximación a lo que puede considerarse “cantidad y composición de un desecho estándar”. Sin embargo, de no combinarse con la medida directa se podría menospreciar o sobrevalorar el potencial de implementación de una planta de biogás.

Si bien lo mejor es realizar los estudios de potencial de producción de biogás (reactor a una carga, estudio de lignina y quimiostato) para el substrato a emplear, la literatura también resulta ser una fuente confiable de información debido a la gran cantidad de proyectos implementados y a la gran variedad de substratos empleados en estos.

La Tabla 2.13 muestra la composición y cantidad de producción anual de excremento animal para diversas especies de granja, las cuales representan los substratos más comunes en la mayoría de plantas de aprovechamiento de biogás. La Tabla 2.14 muestra la composición de la “basura estándar” producida en el D.F.

Tabla 2.13 Cantidad y composición anual de excremento producido por diversos animales de granja (Gtz, 2001)

	Peso total kg/año	Sólidos totales		Sólidos volátiles	
		kg/año	%	kg/año	%
Vaca	16,100	1,850	11.6	1,400	8.7
Cerdo	13,500	1,130	8.4	900	6.7
Pollo (Excreta fresca)	18,250	4,020	22.0	3,170	17.4
Pollo (Excreta seca)	4,230	3,390	80.0	2,560	60.0

2.7 Dimensionamiento

Para el correcto dimensionamiento de un reactor anaerobio familiar de tecnología simple se requiere conocer los siguientes factores:

- Demanda energética del usuario
- Cantidad de biomasa disponible
- Temperatura media del lugar
- Producción específica de biogás según la biomasa disponible

Tabla 2.14 Composición de los RSU en el D.F. (CINAM, 2007)

Componentes de los RSU	% RSU	% Humedad	% Sólidos	% Ceniza
Alimentos y otros residuos orgánicos	41.84	66	34	13.3
Plásticos	10.02	29	71	7.8
Textiles	2.58	33	67	4.0
Papel y cartón	25.51	47	53	5.6
Piel y hule	0.11	11	89	25.8
Madera	1.27	35	65	5.2
Metales	4.29	6	94	94.0
Vidrio	7.23	3	97	97.0
Inertes (mat. construcción, similares y otros)	5.44	10	90	90.0
Finos	1.71	32	68	45.6

El conocimiento de estos factores permite dimensionar el volumen requerido del reactor anaerobio y el volumen del almacenamiento del biogás. El biogás, al igual que otros gases como el L.P. y el gas natural, tiene una gran variedad de usos, tanto doméstico como industrial. Su principal uso doméstico es en las cocinas y el alumbrado, por cuanto no requiere ser purificado (Guardado, 2007).

Los usos más importantes del biogás para determinar la demanda energética del usuario son:

- a) Cocinas: Se emplea con una presión de 75-90 mm de columna de agua (CA), a razón de 0.38-0.42 m³ por persona/día. Para presiones inferiores el per cápita debe calcularse a razón de 0.5 m³/día.
- b) Alumbrado: si se utiliza una lámpara de 60W, consume de 0.11 a 0.15 m³/h de biogás, requiriendo una presión de 70 a 80 mm de CA.
- c) Calderas: En dependencia del tamaño del quemador, los consumos serán:
 - Diámetro del quemador 50mm: 0.32 m³/h
 - Diámetro del quemador 100mm: 0.46 m³/h
 - Diámetro del quemador 150mm: 0.63 m³/h

En resumen, la demanda energética de los usuarios se puede calcular según los parámetros expuestos en la Tabla 2.15.

2.7.1 Dimensionamiento del reactor

El tamaño como se mencionaba depende de la cantidad y calidad del sustrato a emplear, además de la temperatura de operación del mismo. El volumen de un reactor (VD) se determina con base al tiempo de retención (TR) elegido normalmente con base en la producción máxima de reactores a lotes y el sustrato a ingresar diariamente (SD):

$$VD = (SD)(TRH)m^3 = \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right) (\text{días}) \dots \dots \dots [2.4]$$

El tiempo de retención suele variar con la temperatura. Para una planta de biogás carente de sistema de calentamiento, la temperatura dominante en el interior puede considerarse $\pm 2^\circ\text{C}$ sobre la temperatura del suelo. La variación de la temperatura en base a la estación del año debe ser tomada en consideración, el reactor debe estar dimensionado para la estación más desfavorable (mayor tiempo de retención). Para una planta de biogás minimalista, el tiempo de retención debe ser considerado de al menos 40 días. La experiencia práctica muestra tiempos de retención de 60-80 días e inclusive 100 días cuando ocurren escases de sustrato o bajas temperaturas. Por otra parte, los tiempos de residencia mayores incrementan también la producción máxima de biogás, hasta un 40% (ISAT, 2009). Para sustratos poco variables y reactores con controles de temperatura suele seleccionarse el tiempo de residencia igual al tiempo de residencia máximo (también llamado pico) con un margen de 5 ó 10 días más a fin de estar protegidos ante escasez de sustrato.

El sustrato a ingresar es dependiente del agua a añadir al sustrato para adquirir concentraciones de sólidos entre 4 y 8 %:

$$SD = \text{biomasa (B)} + \text{agua (H}_2\text{O)} \frac{m^3}{\text{día}} = \frac{m^3}{\text{día}} + \frac{m^3}{\text{día}} \dots \dots \dots [2.5]$$

En la mayoría de los casos suele emplearse relaciones biomasa-agua (B:H₂O) 1:3 ó 1:2

Tabla 2.15 Demanda energética de los usuarios (Guardado, 2007)

Equipo	Consumo
Cocina (1 quemador)	150-200 L/h
Lámpara de iluminación	120-200 L/h
Refrigerador doméstico	50-100 L/h
Motor de combustión	500 L/h*HP
Cocina industrial	1,000-3,000 L/h
Consumo por persona (1 comida)	150-300 L
Consumo por vivienda (5 personas y 2 comidas)	1500-2400 L/día