

---

## CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN

Históricamente la energía ha sido fundamental para la humanidad, siendo ésta el motor de aspectos políticos, sociales, ambientales, económicos y tecnológicos. Es por esto, que se puede considerarla primordial para el desarrollo de los seres humanos.

### II.1 ENERGÍA

Con el fin de entender mejor el concepto de energía es necesaria una subdivisión (Rodríguez, 2008) en las diferentes dimensiones de interés.

**Dimensión física:** Capacidad de producir un trabajo o realizar la generación de calor.

**Dimensión económica:** Una medida del factor de producción como lo es el trabajo, el capital y las materias primas. Representa un ingreso y un factor (divisa) de cambio. Se le considera una materia prima imprescindible. Impulso de industrias y compañías.

**Dimensión política:** Elemento de negociación (pocos la tienen, muchos la necesitan), elemento estratégico, origen de guerras y conflictos.

**Dimensión social:** Satisfactor de necesidades primordiales e inducidas, medio para alcanzar objetivos deseados.

**Dimensión ambiental:** Uno de los principales factores de agresión al medio natural ya que su producción, transformación y uso es altamente contaminante.

**Dimensión institucional:** Sector que requiere orientación, regulación y control por parte del Estado, catalizador de uniones entre grupos

**Dimensión histórica:** Con base en el factor de progreso, se subdivide en:

- Hombre primitivo (energía humana, biomasa, solar, eólica)
- Esclavismo (más energía animal)
- Feudalismo (más hidráulica más viento)
- Capitalismo (más fósiles, nuclear, geotérmica, mareas...)

#### II.1.1 ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Se considera una fuente de energía alternativa a aquella que puede reemplazar a otra que se esté empleando como base, ya sea en su totalidad o trabajando de manera simbiótica con la misma (Brown, 2008).

Siendo que hasta el día de hoy, parece inevitable que la demanda energética sobrepase a la oferta petrolera. El desarrollo de fuentes de energía alternas debe ser una prioridad a fin de evitar crisis a todos los niveles de la estructura de un país.

Actualmente existen varias fuentes de energía alterna alcanzando su madurez y competitividad en el mercado energético, siendo algunas de las más sobresalientes enlistadas a continuación.

### II.1.1.1 ENERGÍA SOLAR

El sol es una gran planta de energía nuclear de la variedad de fusión, la cual es capaz de generar energía en ritmos de  $3.8 \times 10^{23}$  kW. Sólo una pequeña fracción de esta inmensidad arriba a la tierra. Sin embargo, esa fracción alcanza las cantidades de  $1.8 \times 10^{14}$  kW. Cerca de 60% de tal energía logra a travesar la atmósfera, llegando hasta la superficie (Goswami y Kreith, 2008).

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y calor provenientes del sol. Tal energía suele ser aprovechada ya sea de forma eléctrica directa, a través de celdas fotovoltaicas, o de forma térmica mediante almacenadores. Esta forma de energía es muy abundante, pero aún resulta costosa debido al limitado mercado actual, el cual presenta un ritmo de crecimiento lento por sus elevados precios, poco competitivos en comparación con los combustibles fósiles.

Hoy día se pretende impulsar el desarrollo solar mediante políticas que amplíen su mercado, siendo los principales países precursores de tales políticas Japón y Alemania, seguidos por EU.

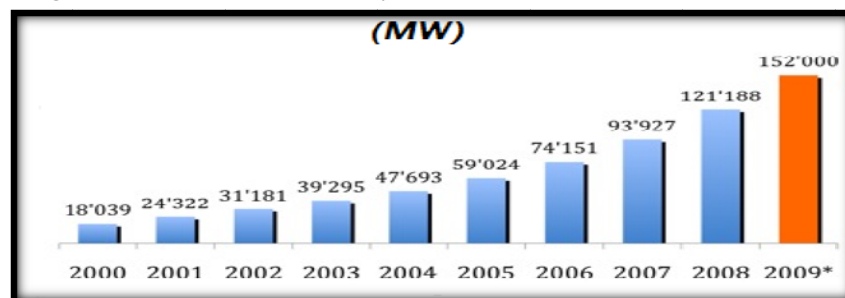
Pese a ser considerada una energía verde debido a su nula contaminación al momento de su producción, al final de su vida las celdas fotovoltaicas aún resultan un residuo contaminante difícilmente reciclable.

### II.1.1.2 ENERGÍA EÓLICA

El término Eólica que proviene del latín *Aeolicus* referente al antiguo dios de los vientos Eolo en la mitología clásica, se emplea para designar algo perteneciente o relativo al viento (RAE, 2008).

La energía eólica consiste en el aprovechamiento de la energía cinética contenida en las corrientes de aire, producidas por los diferenciales térmicos y de presión de la atmósfera. El uso más antiguo de tal energía está representado por las velas de los barcos y molinos de viento. En la actualidad tal energía es aprovechada mediante turbinas, similares en morfología a los antiguos molinos, interconectadas a generadores eléctricos.

Figura II.1: Total mundial de capacidad eólica instalada (WWEA, 2009).



La energía eólica es la fuente de energía que presenta el mayor ritmo de crecimiento a nivel mundial. Y se estima que será un contribuyente substancial en lograr la meta de las reducciones en emisiones de gases efecto invernadero (GEI) durante los próximos años.

Se estima que, pese a la crisis económica mundial, la capacidad eólica siga en aumento, tal afirmación es respaldada por las cifras que estiman un 25% de crecimiento en la capacidad instalada entre los años 2008 y 2009. Lo cual representa un aumento anual de 30,000MW (Figura 1.1), si bien tal crecimiento podría verse limitado debido a las nuevas políticas de regulación y la burocracia más que a los aspectos financieros (WWEA, 2009).

### **II.1.1.3 ENERGÍA OCEÁNICA**

El océano contiene un gran potencial de energía renovable en forma de olas, mareas y diferencias de temperaturas e incluso en las diferencias de salinidad en su contacto con ríos de montañas (SERI, 1990; Cavanagh, y col. 1993). Las olas pueden ser aprovechadas por turbinas y aspas. Las mareas extraen su energía del gradiente gravitatorio generado por el Sol, la Luna y la Tierra. El océano también actúa como una especie de colector solar gigante, atrapando energía solar en la superficie marina en forma de calor. Las bajas temperaturas del fondo al ser combinadas con las de la superficie proveen un gradiente térmico con alto potencial energético.

Otras fuentes de energía oceánica incluyen el empleo de diferencia de salinidad y la biomasa de crecimiento oceánico.

### **II.1.1.4 ENERGÍA GEOTÉRMICA**

La palabra geotermal proviene del griego *gê*, de significado tierra, y *thérm*, calor (RAE, 2008). Literalmente, la energía termal es “el calor de la tierra”. Los recursos geotermales son concentraciones de energía en forma de calor de la tierra que pueden ser empleados para su extracción y fines económicos. Hoy día solo es posible explotar concentraciones de calor asociadas a rocas permeables al agua.

### **II.1.1.5 ENERGÍA DE BIOMASA**

Se considera biomasa a los materiales orgánicos de origen biológico no fósil que pueden emplearse como fuente energética.

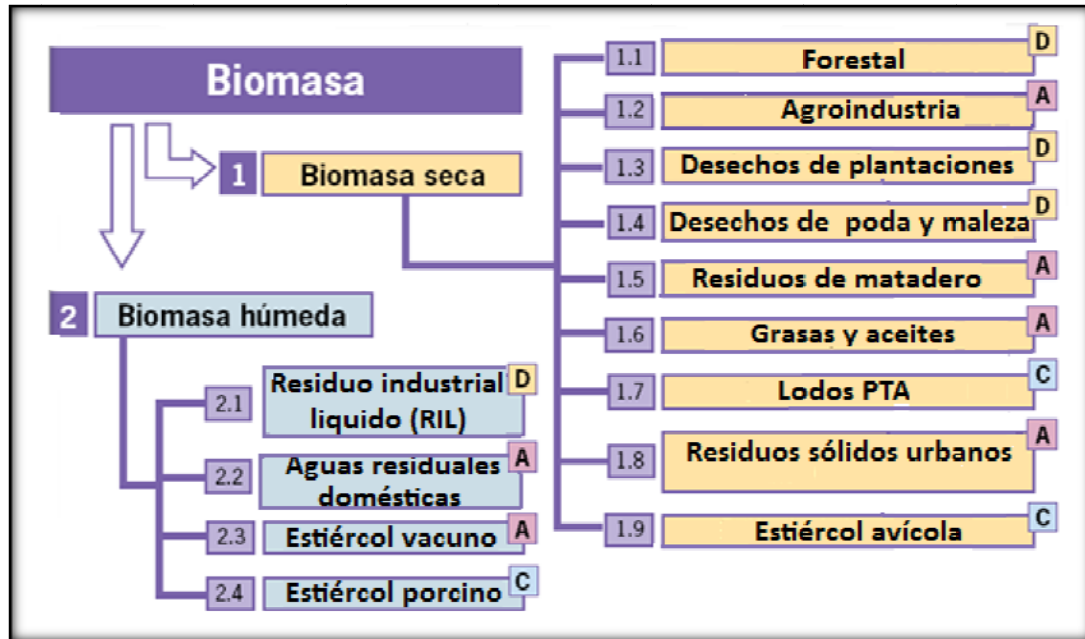
La energía contenida en la biomasa es el resultado de la energía solar almacenada en forma de carbono mediante el proceso natural de la fotosíntesis, que posteriormente es circulable a través de la cadena alimenticia.

Esta energía abarca una amplia gama de técnicas y procesos ya sean térmicos, eléctricos o carburantes de origen vegetal. Tales técnicas serán tratadas a detalle posteriormente en la presente tesis haciendo referencia a las ventajas y desventajas de las mismas.

La biomasa puede ser subdividida en residual húmeda y seca (Chamy y Vivanco, 2007). Se clasifica como biomasa húmeda a aquella que no contiene más del 10% de sustancia seca. Dentro de la biomasa residual húmeda se encuentran todos los residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas y el estiércol porcino y vacuno. Por otro lado la biomasa seca suele subdividirse según el sector que la produce. La biomasa seca incluye: Residuos forestales,

residuos agroindustriales, desechos de plantaciones, desechos de poda y maleza, residuos del matadero, aceites y grasas, lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua, residuos sólidos urbanos (RSU) y estiércol avícola.

Figura II.2: Clasificación de la biomasa (Chamy y Vivanco, 2007)



Otro punto importante al clasificar la biomasa es su densidad regional ya que la disponibilidad de biomasa para su metanización depende de que tan dispersa está. La Figura II.2 muestra además de las diversas clasificaciones de la biomasa si ésta está dispersa (D), agrupada (A) o concentrada (C).

### II. 1.2 EL PROBLEMA ENERGÉTICO

“Las tendencias energéticas actuales de abastecimiento y consumo son evidentemente insostenibles, ambiental, económica y socialmente” (IEA ,2008). “La humanidad requiere una revolución energética Global” (Nobuo, 2008).

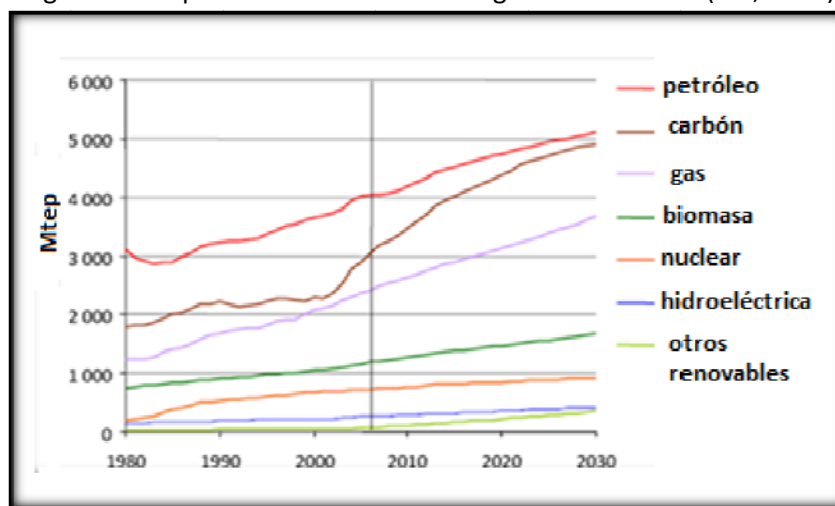
El consumo energético global se ha acrecentado de manera muy rápida desde el descubrimiento del petróleo, las naciones más desarrolladas incrementan día a día su consumo energético a fin de incrementar los niveles de confort de la población. Por su parte, las naciones en vías de desarrollo incrementan su consumo debido a su crecimiento poblacional e industria pesada.

Los asentamientos urbanos son cada vez más grandes y más demandantes energéticamente. Hoy día casi dos tercios de toda la energía se consumen en las ciudades, aunque sólo la mitad de la población habita en ellas, mientras la principal fuente de energía es cada vez más costosa y escasa. Si sumamos a lo anterior los ahora visibles efectos del cambio climático inducidos por el hombre, podremos darnos cuenta de la importancia de buscar fuentes alternativas de energía y el aprovechamiento al máximo de los recursos en el planeta.

### II.1.2.1 UN PROBLEMA MUNDIAL

Las estadísticas del World Energy Outlook 2008 (Prospectiva Mundial de la Energía 2008) de la Agencia Internacional de Energía, (IEA por sus siglas en inglés) prevé un crecimiento de la demanda de energía primaria del 45% entre los años 2008 y 2030 (Figura II.3), con tasa de crecimiento anual promedio del 1.6%, con los combustibles fósiles como representantes del 80% de la energía. Manteniéndose el petróleo como energético mayoritario seguido por el carbón, con un crecimiento muy pequeño en el ámbito del gas natural. Igualmente se prevé que para el 2010 las tecnologías renovables modernas hayan sobrepasado al gas natural convirtiéndose en la fuente de energías primarias para la generación de energía eléctrica más importante, solo superada por el carbón (WEO, 2008).

Figura II.3: Expansión de demanda energética 1980-2030 (IEA, 2008)



Las cifras aunque crudas, demuestran un desborde en el consumo energético, tal es el caso de las reservas probadas de petróleo y del gas natural, las cuales están calculadas en 1.2 billones de barriles. El tiempo que le tomó a la humanidad consumir el primer billón de barriles de petróleo fue de 140 años. El tiempo que le tomará consumir el siguiente billón será 30 años.

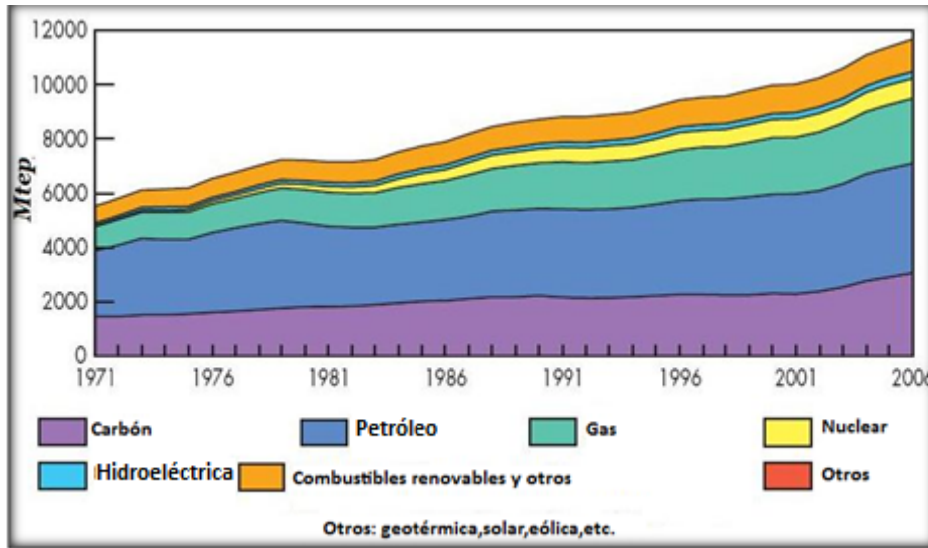
Cabe resaltar que aunque la demanda petrolera seguirá incrementándose y siendo el cimienta del consumo energético, su ritmo de crecimiento es menor que el de las últimas dos décadas. Esto debido al continuo aumento en el precio del petróleo, las mejoras en eficiencia del consumo de combustible en vehículos y las políticas que impulsan el uso de Energías Renovables (ER).

### ENERGÍAS ALTERNATIVAS EN EL MUNDO

En las estadísticas del consumo de los países de la OCDE (Figura II-4) durante 1971 al 2007 (IEAb, 2008), se puede observar un crecimiento en las fuentes de energía alternativa, debido al aumento del precio petrolero y a la maduración de la tecnología, éstas se han vuelto más competitivas. Los combustibles renovables (gases de fermentación anaerobia, RSU y biomasa sólida) pasaron de un 2.3% en 1971 a un 3.9% en el 2007. La energía producida de las fuentes solar, térmica, eólica y geotérmica crecieron de un 0.2% a 0.9%, contrario a lo anterior la fuente hidráulica pasó de

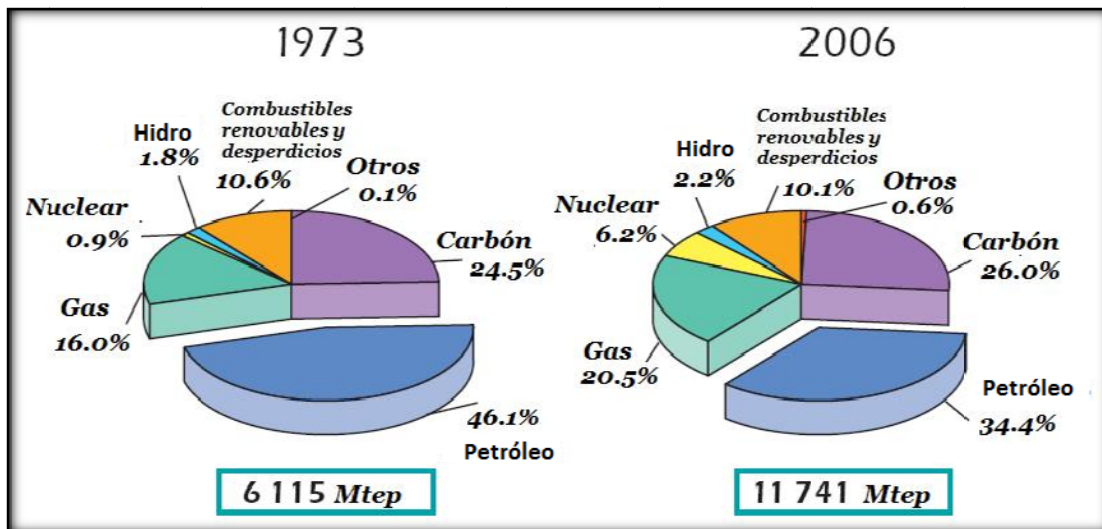
representar un 2.1% a un 1.9%, esto podría atribuirse a los actuales problemas de agua y a la gran dimensión de espacio necesario para su construcción.

Figura II.4: Evolución de las fuentes primarias de energía mundiales de 1971 a 2006 por origen (IEAb, 2008)



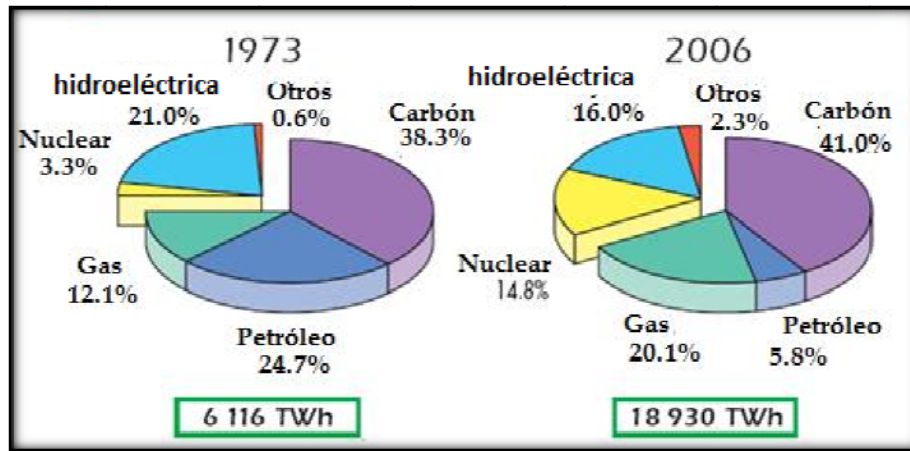
A medida que el petróleo pasó de 52.8% en 1973 a 39.3% en el 2007 (Figura II-5) se registró un decaimiento en su consumo. El gas mantiene una tendencia al crecimiento pasando del 18.2% al 22.6% durante el mismo intervalo de tiempo. Mientras que los países europeos centran su generación en la energía nuclear encabezados por Francia.

Figura II.5: Porcentajes de energía primaria total mundial de 1973 y 2006 (IEAb, 2008)



En cuanto lo que a producción de electricidad se refiere, las estadísticas (Figura II.6) también muestran un incremento en el campo de energías renovables. Las cuales en su conjunto tuvieron un crecimiento del 0.6% al 2.3%, un declive en la energía hidráulica pasando del 21% al 16% de la totalidad.

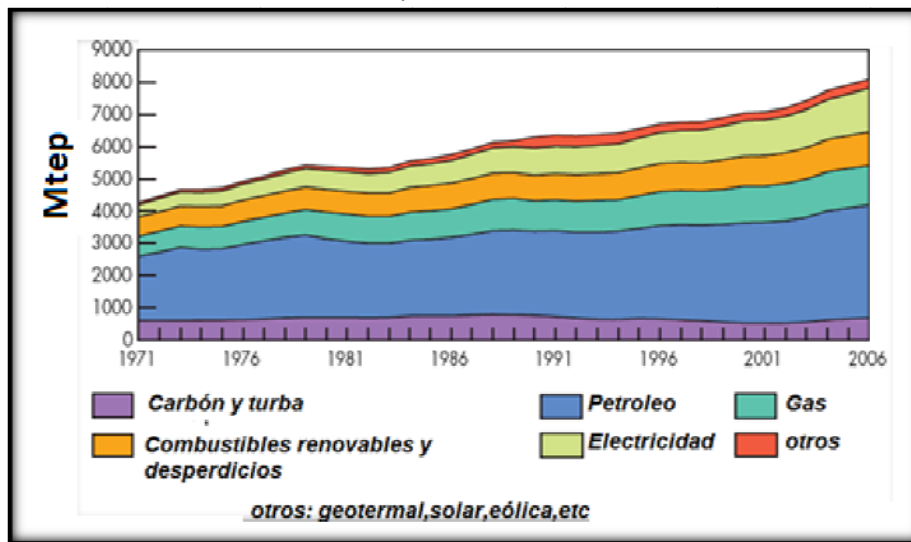
Figura II.6: Porcentajes de combustibles usados en la generación eléctrica 1973 y 2006 (IEAb, 2008)



**ENERGÍAS DE CONSUMO FINAL**

En el ámbito de la energía final de consumo se puede apreciar que pese al crecimiento en la popularidad de la energía eléctrica debido a las ventajas que ésta ofrece, sigue permaneciendo en el segundo lugar de demanda energética siendo superada ampliamente por el petróleo y seguida muy de cerca por el gas (Figura II.7).

Figura II.7: Evolución de 1971 al 2006 del consumo mundial final de energía por fuente energética Mtep, (IEAb, 2008).



Aún con los avances tecnológicos el mundo se mantiene con base en la energía térmica (Figura II.8). Ésto puede reafirmarse observando que las principales fuentes de energía como lo son petróleo y el gas, la mayoría de las ocasiones terminan siendo empleadas como combustibles. Además de que la principal fuente de energía eléctrica proviene de la energía térmica (Figura II.9).

Figura II.8: Porcentajes de fuentes energéticas de consumo final 1973 y 2006 (IEAb, 2008)

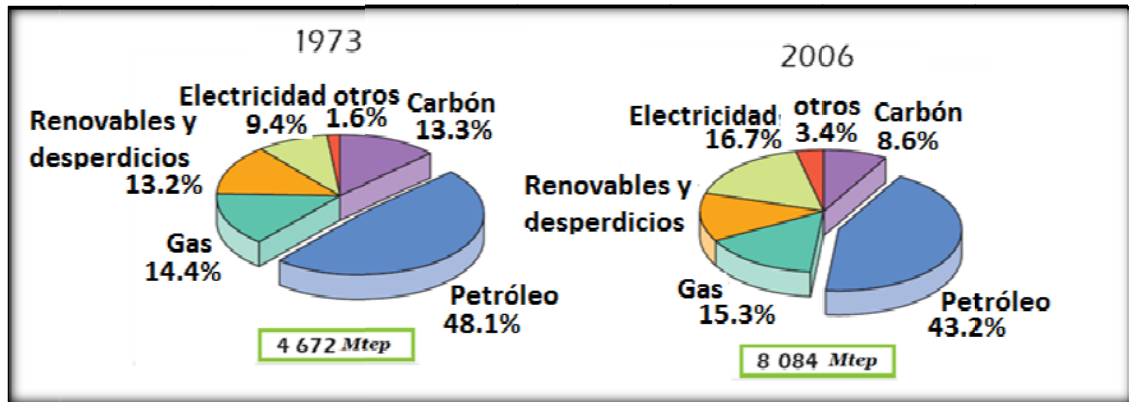
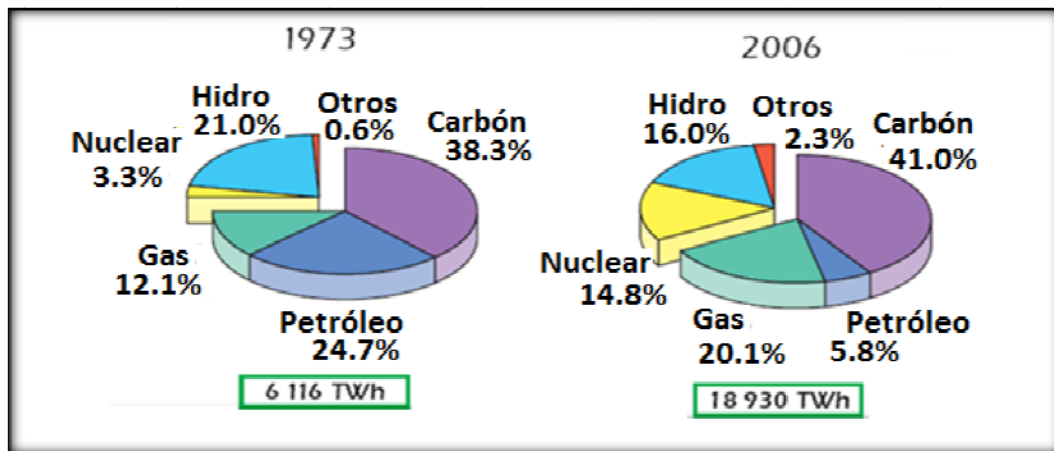


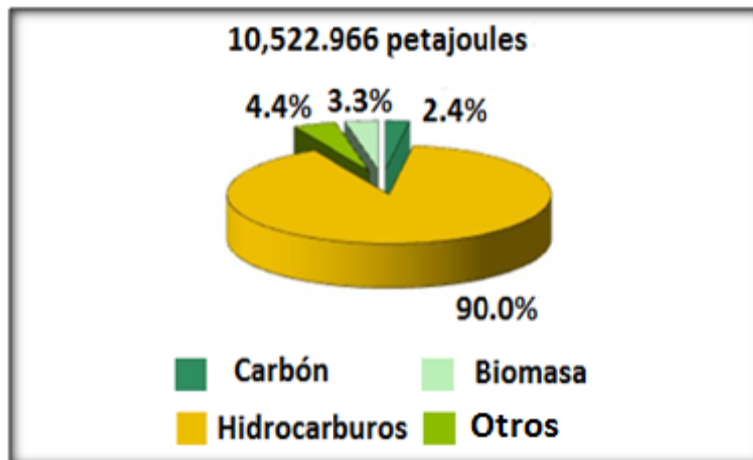
Figura II.9: Porcentajes de fuentes de energía eléctrica 1973 a 2006 (IEAb, 2008)



### II.1.2.2 EL PROBLEMA EN MÉXICO

Según el balance de energía 2007 de la Secretaría de Energía (SENER, 2007), los hidrocarburos se mantienen como fuente primordial de energía primaria en México, representando el 90% del total de producción de energía primaria (Figura II.10).

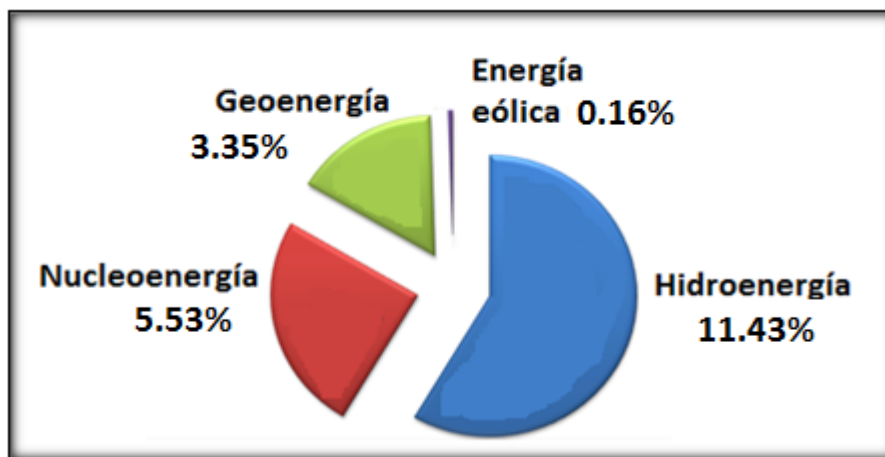
Figura II.10: Estructura de la producción de energía primaria en 2007 (SENER, 2007)





La producción de los energéticos primarios distintos a energéticos fósiles para la generación de electricidad (geoenergía, nucleenergía, hidroenergía y energía eólica) por su parte disminuyó su participación en 0.2% debido al decremento de la hidroenergía. Quedando los porcentajes de producción eléctrica de la siguiente forma: Hidroenergía 11.43%, la núcleo energía tuvo una participación del 5.53%, la geoenergía con 3.35% y la energía eólica 0.16%. Cabe destacar que esta última presentó el asombroso crecimiento de 445.7% debido a la entrada en operación comercial de La Venta II ubicada en Oaxaca, Figura II.11.

Figura II.11: Fuentes de energía eléctrica primaria en México (SENER, 2007)



#### CONSUMO FINAL TOTAL DE ENERGÍA EN MÉXICO

En el apartado del consumo final total de energía, equivalente a la suma de la oferta interna bruta de energía primaria y secundaria, los requerimientos internos de energía por unidad del PIB intensidad energética fue de 4,340 kJ por cada peso producido manteniéndose así una tendencia a la baja en el rubro de la intensidad energética, debido a las diferencias en ritmo de crecimiento del consumo energético nacional (2.7% de 1998 al 2007) y el crecimiento del PIB (3% de 1998 al 2007). Situando el consumo de energía per cápita en 1.5% mayor al consumo del 2006. Las energías en cada sector quedan distribuidas como lo muestra la Figura II.12.

#### PETRÓLEO

No es ajeno a nosotros el hecho de que México es una nación petrolizada, tal hecho puede ser confirmado a través del efecto de la variación de un dólar en el precio promedio anual del barril de crudo, el cual según estimaciones del gobierno realizadas por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) representa el equivalente a 0.06 puntos del producto interno bruto (PIB).

Durante el 2007, los ingresos por el crudo llegaron a representar el 37.7% de ingresos presupuestarios del sector público (Figura II.13).

Figura II.12: Energía por sector en México (SIE, 2008).

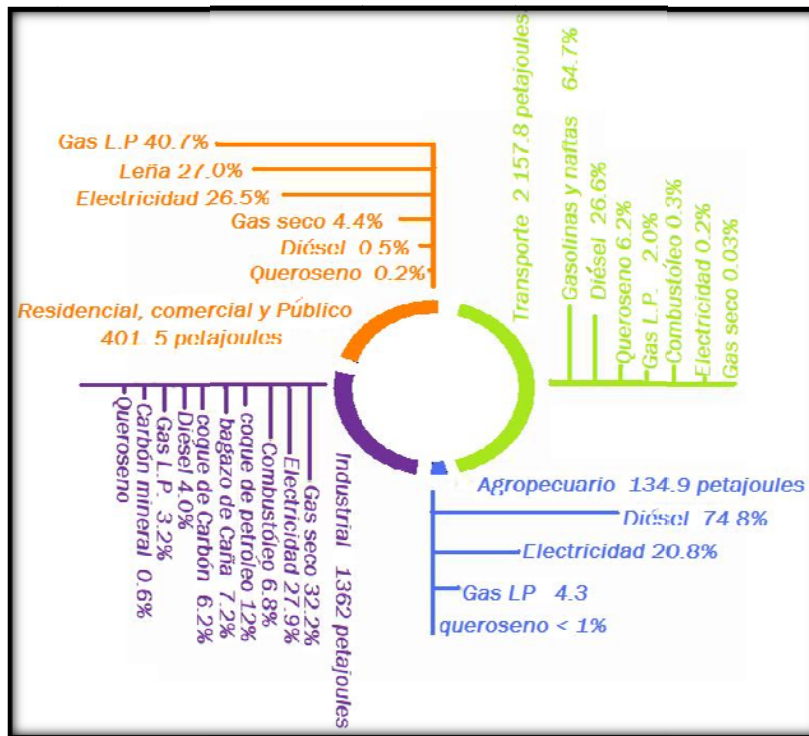
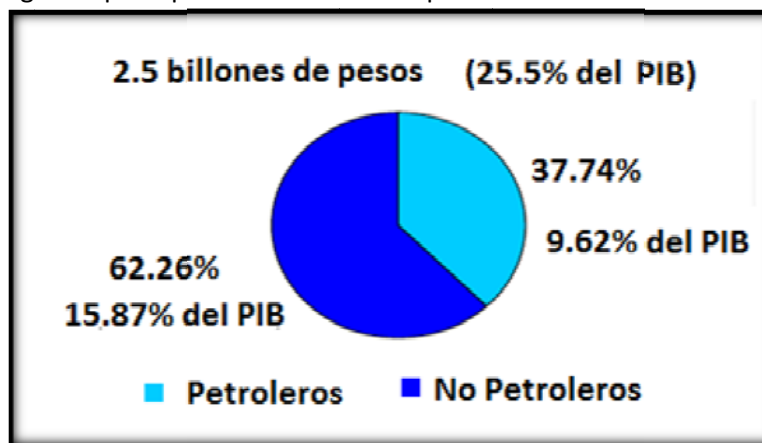


Figura II.13: Ingresos presupuestarios del sector público de México en el 2007 (SHCP, 2008)



Desde el 2002, los ingresos petroleros han rebasado los pronósticos del gobierno, debido al alto precio del crudo, atribuible a factores tales como la mayor demanda de China principalmente y los conflictos en el entorno geopolítico. Durante 2008 se alcanzaron precios históricos en el barril de crudo y se estima que el precio del mismo se incremente en los años posteriores.

Si bien esto puede sonar a una gran oportunidad de desarrollo para México se deben considerar aspectos como el hecho de si realmente México estará preparado para la recesión petrolera. Contrario al párrafo anterior, los registros de extracción de crudo en volumen muestran una disminución del 5.3% debida a la disminución de producción en el pozo Cantarell. El cual representó el 48% de la producción de crudo nacional (SENER, 2007).

A pesar de que México se encuentra entre los primeros lugares de exportadores y productores de crudo a nivel mundial (Tablall.1 y II.2), su posición en cuestión de las reservas probadas de petróleo, 16va con 1.6 miles de millones de toneladas para el final del 2008 (BP, 2009), no parece ser acorde al actual ritmo de explotación.

Tabla II.1: Principales productores de petróleo en el mundo (IEAb, 2008)

Productores	Mt	% mundial
Rusia	487	12.4
Arabia Saudita	483	12.3
Estados Unidos	310	7.9
República Islámica de Irán	218	5.5
Gente de la República de China	188	4.8
México	173	4.4
Canadá	157	4
Venezuela	138	3.5
Kuwait	136	3.5
Emiratos Árabes Unidos	131	3.3
Resto del mundo	1516	38.4
<b>Mundo</b>	<b>3937</b>	<b>100</b>

Tablall.2: Principales exportadores de petróleo a nivel mundial (IEAb, 2008)

Exportadores	Mt
Arabia Saudita	358
Rusia	248
República Islámica de Irán	130
Nigeria	119
Noruega	109
Emiratos Árabes Unidos	106
México	99
Canadá	93
Venezuela	89
Kuwait	88
Resto del mundo	764
<b>Mundo</b>	<b>2203</b>

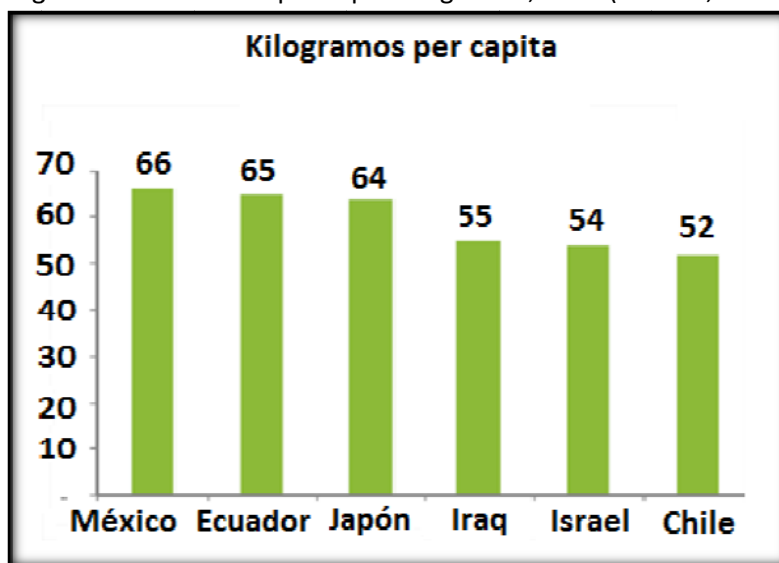
## CONSUMO DE GAS EN MÉXICO

El gas licuado es una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente de propano y butano; su producción se registra desde principios de siglo. Sin embargo, es en 1946 cuando se inicia su comercialización como estrategia para sustituir, en las casas habitación de las zonas urbanas, la utilización de combustibles vegetales.

La producción, se concentra en el sureste del país; posteriormente, se transporta a través de una red de ductos a las terminales de gas licuado y en éstas, se realizan las ventas de primera mano a las empresas privadas de distribución, quienes lo hacen llegar al consumidor final (PEMEX, 2008).

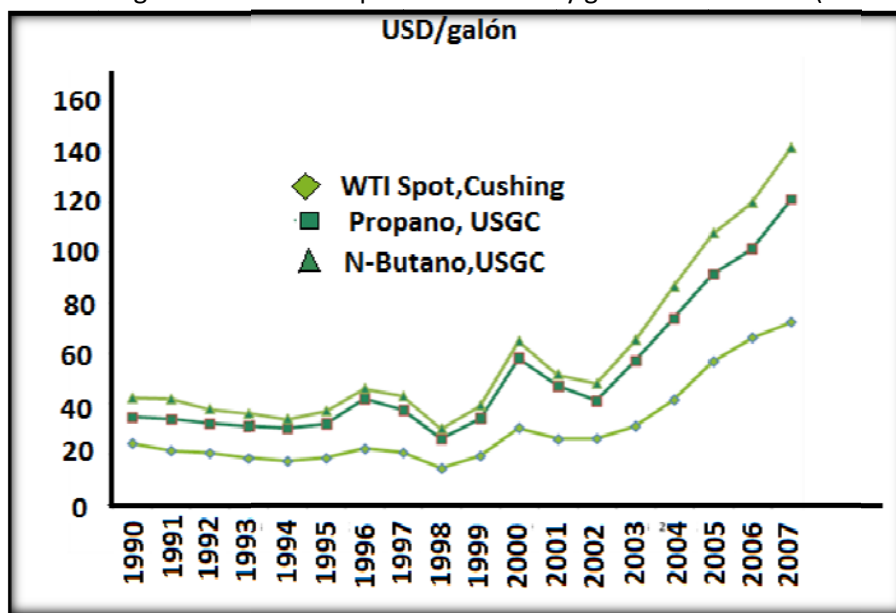
El Gas L.P. (licuado de petróleo) es un energético fundamental para la economía nacional. Al ser empleado en el 70% de los hogares en México ha llevado al país a ocupar el primer lugar en consumo per cápita (WLPGA, 2007), (Figura II.14) estimándose que 4 de cada 5 hogares lo emplea para la cocción de alimentos (SENERb, 2008).

Figura II.14: Consumo per cápita de gas L.P., 2006 (WLPGA, 2007)



Debido a que son los sectores comercial-residencial y petroquímico los que concentran tres cuartas partes de la demanda mundial (la cual ascendió a 7.4 mmbd en el 2007) son estos los que controlaran el futuro en los precios del gas L. P. La actual demanda mundial ha presentado una tendencia a la baja debido a los precios históricos (Figura II.15) que se han alcanzado haciéndolo poco costoso para los sectores domésticos en países en desarrollo. Aunque por otra parte, gracias a que igualmente el petróleo ha alcanzado precios muy altos, el sector petroquímico ha optado por la sustitución del petróleo con gas L. P. Gracias a que el nivel de oferta continua superando a la demanda, ligado a que el gas L. P. es un subproducto del petróleo energético que se busca extraer en grandes cantidades, el mercado del gas L.P. ha pasado de ser un mercado dirigido por la demanda a uno dirigido por la oferta.

Figura II.15: Histograma nacional de precios de crudo y gas L.P. 1990-2007 (PEMEX, 2008)

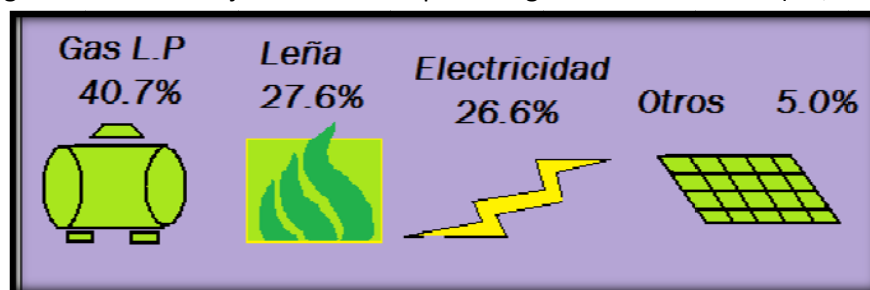


Actualmente México destina el 65% de su demanda nacional al sector doméstico siendo la región centro y centro-occidente, las que concentran dos terceras partes de la demanda (122.6 mbd y 69.7mbd respectivamente) Siendo los estados integrantes de la Zona Metropolitana del Valle de México los de mayor demanda. En cuestión de hogares representa el mayor consumo energético seguido por la leña, la cual aún tiene mayor presencia que la energía eléctrica y otras alternativas (Figura II.16).

Desde el 2004, México mantiene una tendencia a la baja en cuanto a consumo de gas L.P. Ésto es atribuible al hecho de la caída de su consumo en el sector autotransporte el cual presenta una tendencia a la baja anual de 9% (SENER, 2008).

Se estima que al final del 2015, la tasa de decrecimiento llegue a 7.8% lográndose así un saldo neto a favor en cuestión de importaciones y exportaciones.

Figura II.16: Porcentajes de consumo por energía sector doméstico (SIE, 2007)



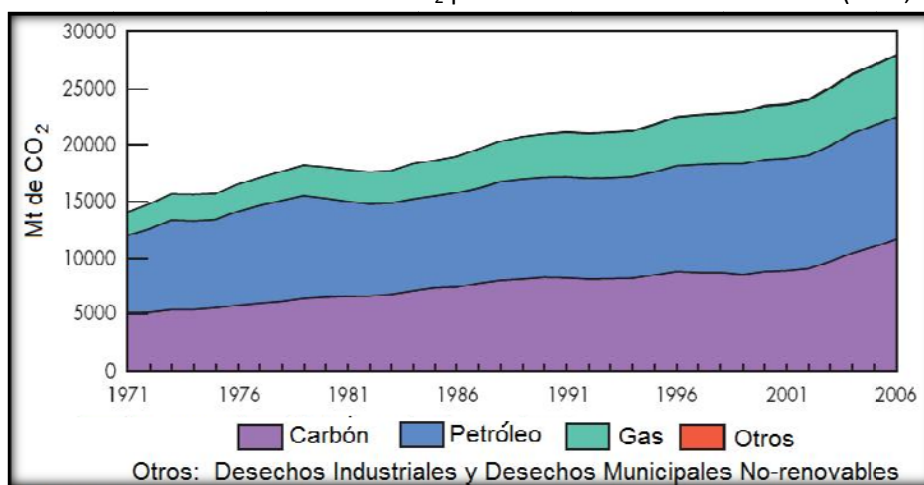
En cuanto el apoyo de otras energías se espera que para el 2017 se tenga en operación 7.6 millones de metros cuadrados de calentadores solares de los cuales el 82% suplirá el uso del gas L.P. para calefacción (SENER, 2008).

### II.1.3 CAMBIO CLIMÁTICO Y EMISIONES DE CO<sub>2E</sub>

Desde el establecimiento de las políticas sobre el impacto de las emisiones de gases efecto invernadero, causadas por las actividades de la especie humana, se ha incrementado la atención prestada a dichas emisiones cuyos efectos son cada vez más tangibles mesurándolas en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Los datos estadísticos indican que el actual ritmo de producción de gases efecto invernadero debido a los procesos energéticos se ha acelerado pese a la implementación de nuevas tecnologías (Figura II.17) y el mecanismo de desarrollo limpio. Ésto es atribuible al gran crecimiento de la demanda energética global aunada al hecho de la imperfección del protocolo de Kioto.

Figura II.17: Emisiones Mundiales de CO<sub>2</sub> por combustible de 1971 al 2006(IEAb, 2008)



Si bien es cierto que son las naciones más desarrolladas las que proveen el mayor aporte de emisiones de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>. El actual crecimiento de las emisiones de China es digno de destacar ya que ha triplicado sus emisiones y presenta la más alta tasa de crecimiento anual de las mismas (IEA, 2008).

#### EL CAMBIO CLIMÁTICO COMO PROCESO NATURAL

La capa más baja de la atmósfera, conocida como tropósfera, se extiende desde la superficie de la tierra hasta el límite conocido como tropopausa (superficie ideal que marca el fin de la tropósfera, a una altura en donde la temperatura llega aproximadamente a los 57°C) la cual está ubicada cerca de 10 a 11 km en los polos y unos 15 a 18 km en los trópicos. En esta capa, la temperatura disminuye en función de la altura teniendo un decremento de aproximadamente 6°C cada kilómetro. La tropósfera contiene cerca del 75% de la masa de gases totales que forman la atmósfera (CIDAM, 2008).

Existen 4 reglas básicas que rigen el comportamiento de la tropósfera:

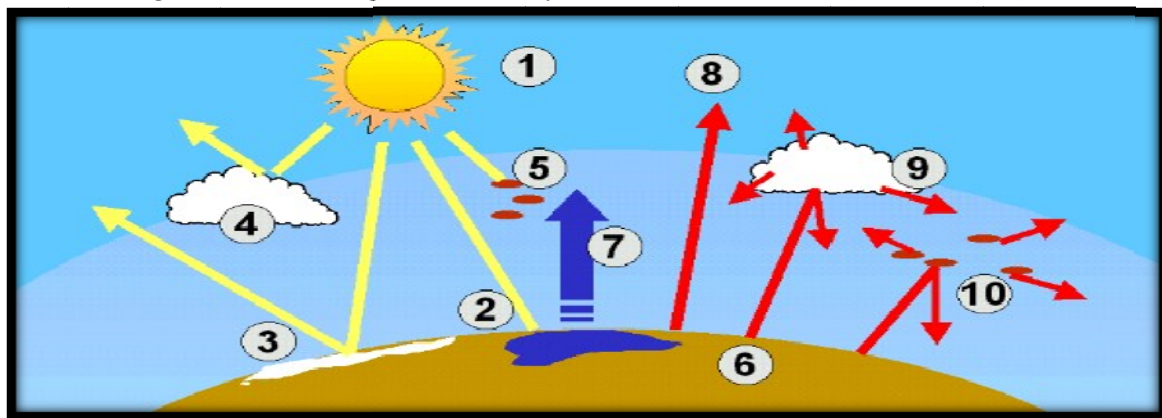
1. El aire caliente asciende debido a su menor densidad en comparación con el aire frío
2. El agua evaporada asciende a regiones más altas y frías con el aire ascendente

3. El aire frío no puede absorber mucha agua. Se condensa formando nubes y en algunas ocasiones precipitaciones
4. Al alcanzar la tropopausa (región de mínima temperatura) la mayoría del aire y agua comienzan su descenso

Como consecuencia de lo anterior, en la tropósfera tienen lugar la meteorología (evaporación, formación de nubes, lluvia y nieve) y la mayoría de los compuestos procedentes de los océanos, la tierra y las actividades del hombre.

No sería posible la vida en la Tierra, sino se diera un efecto invernadero natural. Sin los gases de efecto invernadero la Tierra sería 33°C más fría y la temperatura media sería 18°C en lugar de 15°C. El vapor de agua y el bióxido de carbono son los principales gases de efecto invernadero (sin contemplar actividades humanas). El vapor de agua causa cerca del 60% de efecto invernadero natural, el dióxido de carbono, cerca del 20% (Uherek, 2004). Los gases de efecto invernadero retienen el calor que emite la tierra y lo mantienen cerca de la superficie. La Figura 4 muestra cómo se controla el sistema de “calefacción central” de nuestro planeta.

Figura II.18: La energía del mundo y su sistema de radiación (Uherek, 2004)

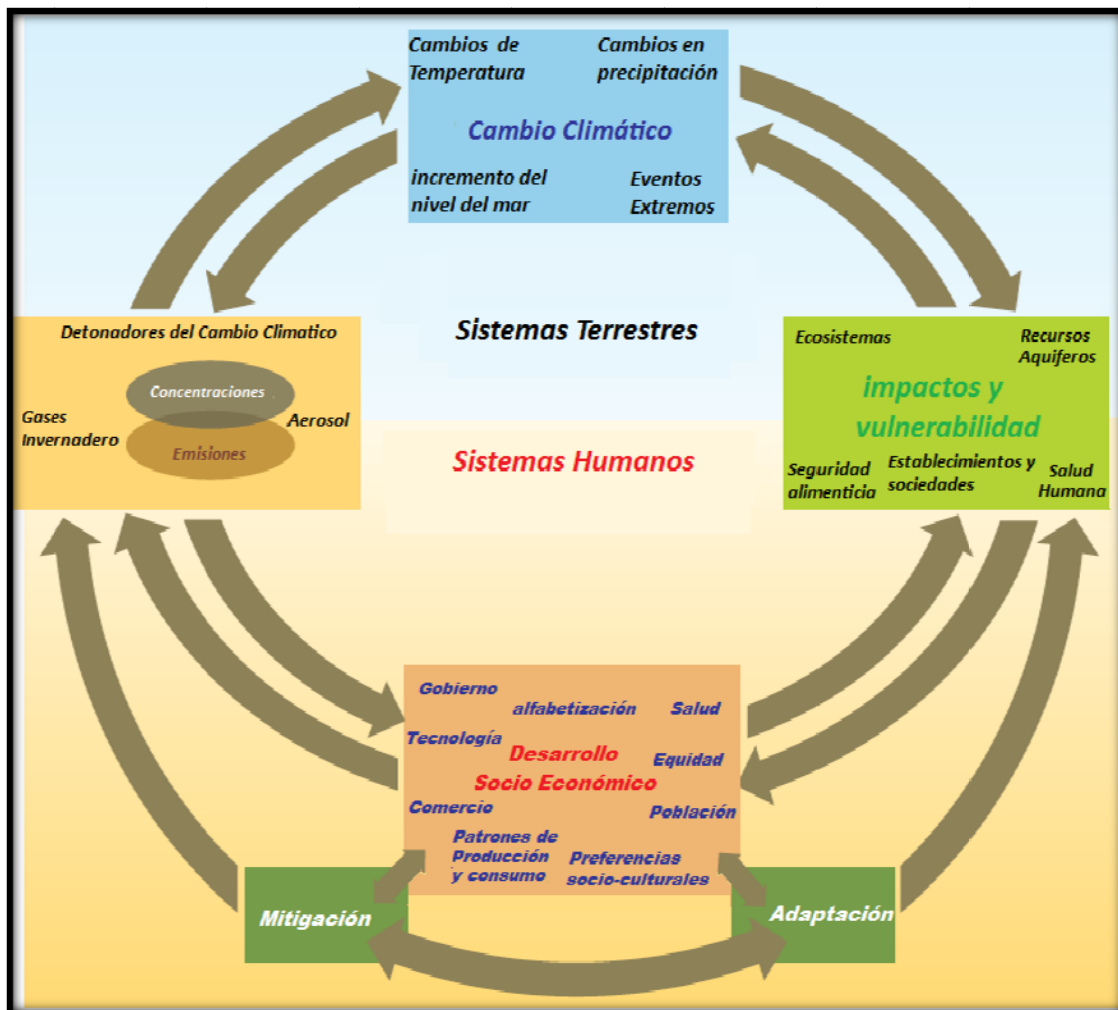


- 1) El sol es la fuente de la energía que llega a la Tierra.
- 2) La luz del sol llega a toda la superficie de la Tierra.
- 3) La superficie de la Tierra refleja una parte de la energía solar de vuelta al espacio
- 4) Parte de la luz solar se refleja de vuelta al espacio por la superficie de las nubes
- 5) Los gases y partículas de aire absorben la luz solar.
- 6) La superficie de la Tierra absorbe la radiación procedente del sol. Esta radiación es re-emitida en forma de calor (radiación infrarroja de onda larga), calentando la Tierra.
- 7) Se necesita una pequeña parte de la energía absorbida para que el agua se evapore.
- 8) Una pequeña cantidad de radiación infrarroja va directamente al espacio.
- 9) Las nubes no sólo reflejan la luz solar, sino que también absorben la radiación de calor emitida por la Tierra. Un cielo nuboso mantiene caliente la Tierra.
- 10) Existen partículas y gases en el aire que absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra. Los gases se llaman gases de efecto invernadero, debido a que retienen la energía de calor cerca del suelo.

## EL FACTOR HUMANO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Para el Panel Internacional de Expertos en el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el término cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (usando pruebas estadísticas), entendiéndose por cambio a la alteración de sus propiedades y su persistencia por largos periodos de tiempo, típicamente décadas o más. El término se refiere a cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea por la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana. El empleo de tal término difiere de aquel empleado en la convención del marco de trabajo sobre el cambio climático de las naciones unidas, el cual lo define como los cambios en el clima ocasionados directa o indirectamente por la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global en adición con la variabilidad natural del clima observada en periodos de tiempo comparables.

Figura II.19: Esquema de los causantes antropológicos del cambio climático (IPCC, 2008)



La Figura II.19 muestra una síntesis de los principales detonantes antropológicos, así como de los impactos y respuestas ante el cambio climático. Hasta el año 2001 (IPCC, 2008) se pensaba que los procesos ocurrían solo en sentido de las manecillas del reloj. Sin embargo, la información hoy en

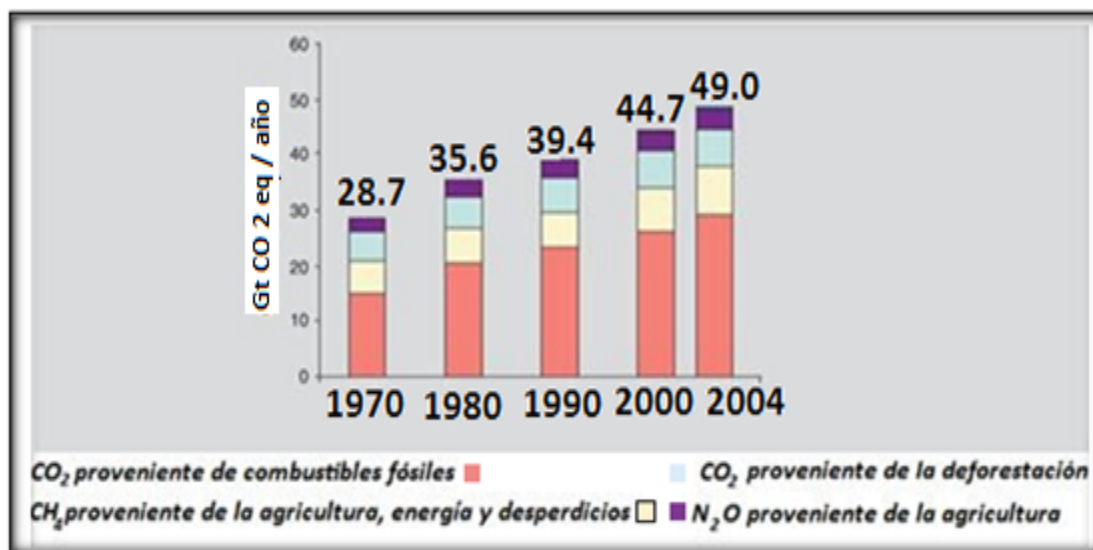


día disponible indica que las influencias ocurren igualmente en contra de las manecillas del reloj. El calentamiento del sistema climático es inequívoco, ya que ahora son evidentes las observaciones en el incremento de las temperaturas promedio globales en los océanos y aire, el derretimiento global de nieve y hielo, así como el aumento en el nivel del mar. Los últimos años han sido de los 12 más calurosos desde que se tienen registros instrumentales de la temperatura de la superficie de la Tierra (1850). Muchos sistemas naturales, en todos los continentes y algunos océanos están siendo afectados por los cambios en el sistema climático. Tal es el caso de la acidez de la superficie oceánica la cual ha estado incrementándose desde 1750.

### EMISIONES EQUIVALENTES DE DIÓXIDO DE CARBONO

Las emisiones anuales antropogénicas de GEI se han incrementado en 70% de 1970 al 2004 (Figura II.20). Siendo el CO<sub>2</sub> el más representativo de todos los GEI cuyas emisiones se han incrementado cerca del 80% en el periodo de 1970 a 2004 representando el 77% del total de emisiones de GEI. Debido a lo anterior y al hecho de que los GEI difieren en su influencia de calentamiento (forzamiento radiativo), con base en sus propiedades radiactivas y su periodo de vida en la atmósfera, suele expresarse las cantidades de GEI en “emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>” y “concentraciones equivalentes de CO<sub>2</sub>”.

Figura II.20: Emisiones de gases efecto invernadero según su fuente (IPCC, 2008)



**La emisión equivalente de CO<sub>2</sub>:** Es la cantidad necesaria de emisiones de CO<sub>2</sub> necesarias para causar el mismo efecto de forzamiento radiativo en un intervalo integral de tiempo. La emisión equivalente de CO<sub>2</sub> se obtiene a partir de multiplicar la emisión de un GEI por su Potencial de Calentamiento Global (PCG).

**La concentración equivalente de CO<sub>2</sub>:** Es la concentración de CO<sub>2</sub> que tiene la capacidad de causar la misma cantidad de forzamiento radiativo que una mezcla dada de CO<sub>2</sub> y otros componentes. En la Tabla II.3 se enlistan las equivalencias calculadas por el IPCC en el año 2008.

Tabla II.3: Equivalencias de dióxido de carbono para varios compuestos (IPCC, 2008)

Compuesto	Equivalencia CO <sub>2</sub>	Tiempo de permanencia en la atmósfera
Dióxido de carbono	1	4
Metano	25	10
Óxido nitroso	296	114
HFC-23	12,000	260
HFC-125	3,400	28
HFC-134 <sup>a</sup>	1,300	15.5
HFC-143 <sup>a</sup>	4,300	41
HFC-152 <sup>a</sup>	120	1.7
HFC-227ea	3,500	35-38
HFC-236fa	9,400	220
Tetrafluoruro de carbono (CF <sub>4</sub> )	5,700	>50,000
Hexafluoruro de carbono (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	11,900	4,600
Sulfuro de hexafluoruro (SF <sub>6</sub> )	22,200	3,600

## II.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

### II.2.1 EL PROBLEMA EN EL MUNDO

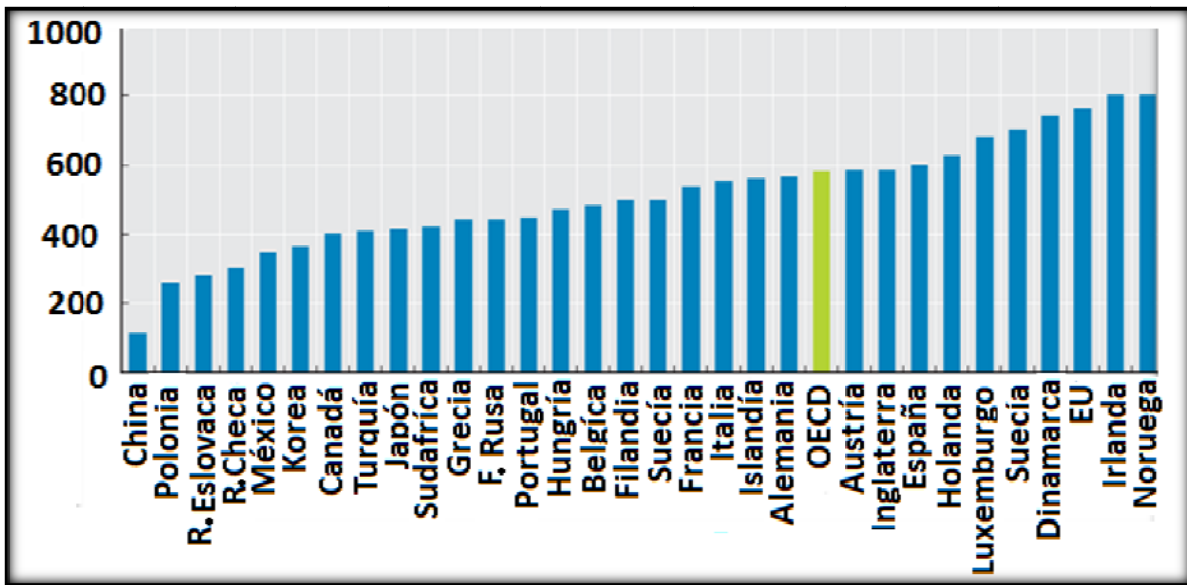
Debido al constante crecimiento de las zonas metropolitanas alimentadas por las dificultades económicas, la demografía y las malas condiciones del campo que fuerzan la migración de campesinos a las ciudades en busca de empleo; la cantidad de desechos producidos en las ciudades crece de forma exponencial causando contaminación, riesgos a la salud y gastos económicos. El problema se agrava cuando traemos a consideración el hecho de que a medida que el espacio urbano y la cantidad de desechos crecen los lugares destinados a la colocación de los desechos disminuye.

Pero, ¿qué es en sí un desecho? Si bien se pueden encontrar varias definiciones en diccionarios y enciclopedias tales como: “Un desecho es cualquier sustancia u objeto el cual el propietario desecha, busca desechar o necesita desechar”; se debe escudriñar más a fondo tal concepto ya que el porqué y él cuando un objeto se convierte en desecho, tiene su fundamento en el uso que el propietario en turno le da, es esta pequeña inferencia lo que hasta la fecha ha incrementado enormemente la producción de desechos y lo que sienta la base primordial de la presente tesis. Hoy día es muy común que sustancias ampliamente reutilizables o usables por otros terminen siendo desperdiciadas en tiraderos, combustiones o aún peor en lugares inapropiados como sistemas de drenajes o zonas comunes (OECD, 2009).

El mundo actual experimenta un crecimiento alarmante de la cantidad de desechos per cápita, asociada al grado de urbanismo de la sociedad de la que provienen, y en otros casos a la explotación demográfica. Para el primer caso se puede observar que los países de mayor

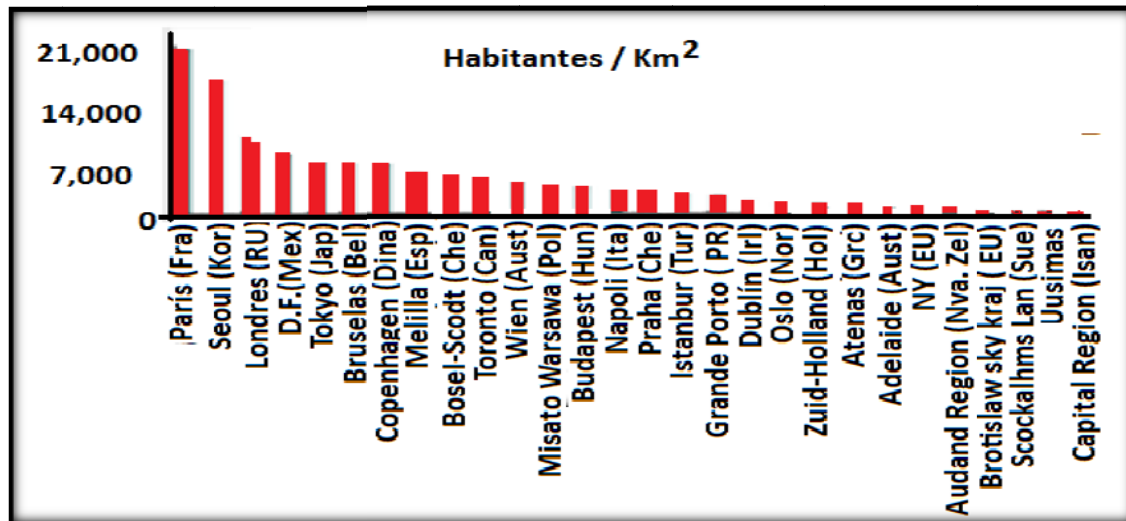
desarrollo se colocan en los primeros lugares de generación de desechos per cápita como lo muestra la Figura II.21.

Figura II.21: Generación anual de desechos, kg per cápita. 2006 (OECD, 2009)



La Figura II.21 podría parecer engañosa a primera vista ya que un descuido podría hacer creer que China es un país poco contaminante lo cual es totalmente falso, hecho que puede ser demostrado al multiplicar el número de individuos que compone su población (1,328,630,000 en la China continental para el 2007) por la generación per cápita de los mismos.

Figura II.22: Regiones de la más alta densidad poblacional en 2005 (OECD, 2009)



Otro aspecto a considerar es el hecho de la densidad poblacional de algunos lugares del planeta. La cual suele servir como indicador del estrés ejercido sobre los individuos, ambiente, economía y la demanda energética. Lo anterior suele ser un aspecto cotidiano para los residentes del Distrito

Federal, el cual para el 2005 se presentaba como el cuarto lugar mundial en densidad poblacional (Figura II.22).

### **II.2.1.1 IMPACTO ECONÓMICO DE LOS DESECHOS**

Existen primordialmente dos aspectos que rigen la interacción de los desechos sólidos urbanos y la economía donde se producen.

El primero surge del hecho que una vez que no se requiere algo se busca alejarlo, a fin de no verlo más, hecho que se traduce en la necesidad de un sistema de recolección y transporte del mismo, tal consecuencia no es gratuita lo que implica una inversión en personal, vías y vehículos de transporte, predios destinados al almacenaje de los desechos los cuales tras ser adquiridos tienden a disminuir la plusvalía de los predios aledaños, actividades de mantenimiento además del combustible de vehículos.

El segundo aspecto tiene que ver con la compra y extracción de materias primas, como se ha mencionado un desecho se produce en base al uso requerido, lo anterior en conjunción con la actual cultura materialista ocasiona una constante “necesidad” de extracción de materias primas para la creación de productos que sustituyan al objeto desplazado y una cada vez más corta vida útil de los productos, el ejemplo más claro de lo anterior puede visualizarse con increíble facilidad en los aparatos electrónicos, tales como las computadoras que son desechadas solo porque el mercado ofrece una más poderosa.

Pese a que la concentración de materias utilizables en los desechos continúa incrementándose, gracias al desarrollo tecnológico, el precio de la extracción de materias primas ha continuado en declive aún con la decreciente densidad geográfica de recursos. Ya que aún resulta más cómoda la extracción de materias primas que el empleo de los desechos como fuente de tales materias. Sin embargo, es claro que los recursos contenidos en nuestro planeta son finitos al igual que el espacio, lo cual ocasionará un eventual colapso del actual sistema (Ludwing y col., 2003).

### **II.2.1.2 IMPACTO SOCIAL DE LOS DESECHOS**

Seguramente en alguna ocasión se habrá mirado a una persona abrir el empaque de algún comestible, tomar el producto y arrojar al suelo la envoltura. Este comportamiento tiene sus bases tanto en la psique primitiva (en un principio la naturaleza reintegraba los desechos al sistema) como en la moderna concepción de que una vez que el desecho queda fuera de mi vista deja de ser mi problema. Lo último basado en el hecho de que si no se está en contacto directo con los efectos de la polución que producimos tendemos a menospreciar los efectos de nuestro ritmo de consumo.

Lo anterior es sumamente común en los asentamientos privilegiados donde los tiraderos de basura se encuentran a kilómetros de distancia; lo que hace pensar que una vez recolectada la basura de los hogares ésta desaparece junto a los problemas asociados a ella. Sin embargo, las poblaciones de destino son las que realmente logran apreciar el impacto del consumismo en forma del mal olor producido por la basura, el crecimiento de plagas en los tiraderos y con ello el

riesgo de enfermedades para la población. Además de la reducción de las tierras sanas para asentamiento o cultivos. Es entonces cuando surge la migración en busca de un mejor lugar para vivir, lugar que comúnmente es la zona urbana que en un principio ocasionó el problema. La cual al aumentar en número de pobladores comienza a presentar mayor contaminación, problemas viales y generación de desechos que afectarán a otras comunidades para así continuar con un círculo vicioso.

Es por esto que, hasta que no se concientice a la sociedad acerca de la contaminación que produce de una manera tangible se mantendrá el acelerado ritmo de sobreexplotación del planeta.

### **II.2.1.3 IMPACTO ECOLÓGICO DE LOS DESECHOS**

Resulta obvio pensar que los desechos de las zonas urbanas se convierten en peligros ecológicos, ya que incluso las sustancias que son reintegrables al medio ambiente por procedimientos de degradación natural están demasiado concentradas para ser diseminadas por la naturaleza. Los efectos de tales concentraciones ocasionan la destrucción de espacios aprovechables que terminan convirtiéndose en tiraderos, además de originar criaderos de plagas y focos infecciosos para las poblaciones colindantes (fauna, flora, humanos) teniendo algunas otras manifestaciones como olores desagradables.

Otro de los efectos sobre el ambiente son las emisiones de metano producidas por los tiraderos a cielo abierto.

### **II.2.1.4 IMPACTO POLÍTICO DE LOS DESECHOS**

Como se ha mencionado anteriormente, el nivel de competitividad de los residuos sólidos urbanos como fuente de materia y energía primas está limitado por los precios de las materias primas recién extraídas de la biosfera los cuales tienden a ser más baratos pero con un impacto ecológico-social notablemente mayor. Tal problema puede ser mediado a través de una legislación que tenga dos aspectos fundamentales:

- a) Reprenda la excesiva producción de desechos de manera económica
- b) Promueva la reducción y reemplazo de los RSU a través de reducción en costos

Se ha demostrado que las comunidades donde se establecen cuotas por disposición de desechos en base al volumen han reducido la cantidad de desechos entre un 10% (Goldberg, 1990) y 30% (Skumatz, 1991).

## **II.2.2 MÉXICO Y LOS RSU**

Tradicionalmente en México, los residuos sólidos urbanos orgánicos, se han utilizado para la fabricación de composta, como mejoradora de suelos, aunque no de manera extensiva. Actualmente comienzan a ser valorados para aprovechar su contenido energético. Los primeros esfuerzos han sido encaminados a aprovechar el biogás de los rellenos sanitarios ya existentes y que aún poseen un potencial adecuado para la generación eléctrica.

Se estima, no obstante, que la creación de nuevos rellenos sanitarios debería ser la última alternativa a seleccionar debido a la existencia de otras técnicas como el proceso anaerobio de materias orgánicas para la generación de biogás (aproximadamente 60% metano) que proporciona un subproducto con una mayor cantidad de nutrientes que la composta (Sarmiento, 2008).

Como se ha mostrado anteriormente, la densidad de población en el Distrito Federal es muy grande, lo cual ocasiona el problema de la falta de espacio de destino para los RSU. Pues no existen poblaciones locales dispuestas a tener cerca un tiradero a causa del mal olor, los riesgos sanitarios, el mal aspecto y la devaluación de propiedades.

Esto sumado al problema de que los principales centros de destino carecen de la capacidad adecuada para la disposición de los RSU de la ciudad (Tablas II.4 y II.5) hace imperante la necesidad de la búsqueda de tratamientos alternativos, los cuales pueden no solo resolver el problema inherente sino también ayudar a cubrir las necesidades energéticas de México.

Tabla II.4: Generación de RSU en México (CINAM, 2007)

Zona	Habitantes	(kg/hab día)	(t/día)	(t/año)
Centro	51,117,711	0.788	40,281	14,702,565
D.F.	8,683,824	1.329	11,541	4,212,465
Norte	19,501,930	0.891	17,376	6,342,240
Sur	12,615,849	0.629	8,328	3,039,721
Frontera Norte	6,347,055	0.956	6,067	2,214,455
Nacional	98,266,367	0.853	83,831	30,598,325

Tabla II.5: Plantas de selección y aprovechamiento de RSU (CINAM, 2007)

Planta	Capacidad (t/día)
Bordo Poniente	1,553
San Juan de Aragón	1,411
Santa Catarina	1,320
Total	4,284

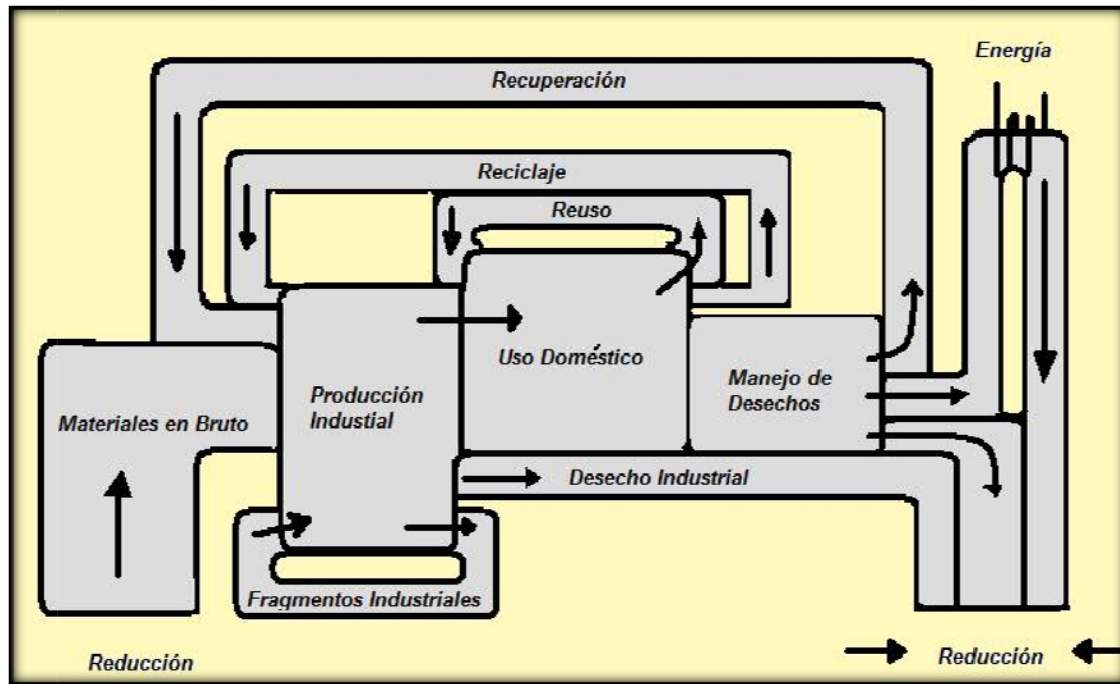
### II.2.3 EL CICLO DE LOS MATERIALES EN LA SOCIEDAD

La Figura II.23 ilustra el flujo de los materiales en la sociedad urbana, el inicio y el final son de proporciones idénticas, haciendo énfasis en el hecho de que la sociedad no consume materiales sólo los usa para en dado momento devolverlos (generalmente transformados) al medio de origen y que los recursos son finitos gracias a la entropía.

El flujo de los materiales a través de la sociedad se origina en la extracción de los recursos naturales en la superficie terrestre, que se suman a los provenientes de la recuperación y los fragmentos producidos en la manufactura para generar los productos que serán vendidos al sector doméstico. La industria, al no presentar una eficiencia del 100%, genera desechos de los que busca

deshacerse. Una vez en la etapa doméstica los usuarios en turno tiene varias opciones a elegir, después del uso de los productos: Re-usarlos para un mismo o diferente propósito, desecharlos al medio, reciclarlos a la industria o seleccionar materiales en cantidades suficientes para su recuperación o la producción energética.

Figura II.23: Ciclo de los materiales en la sociedad (Vessilind y col., 2002)



El sistema representado en la Figura II.23 presenta una entrada igual a la salida en un estado estable, es decir, disminuir alguna de ellas implica la disminución de la otra. Lo cual proporciona dos alternativas para atacar el problema de los RSU: Disminuir el requerimiento de materiales extraídos del medio o la disminución de los desechos depositados al medio.

Lo anterior se logra a base de 4 mecanismos conocidos como las grandes R's o las 4R's:

- a) Reducción
- b) Re-uso
- c) Reciclaje
- d) Recuperación

#### **LAS 4R: REDUCCIÓN, RE-USO, RECICLAJE Y RECUPERACIÓN**

##### **REDUCCIÓN**

El veloz crecimiento de demanda en energía y materiales de la sociedades occidentales es claramente insostenible (Ludwing y col., 2003), "...es simplemente imposible para la totalidad del planeta sostener el nivel de consumo occidental para todos sus habitantes. De hecho, si 7 billones de personas consumieran tanta energía y recursos como nosotros (las sociedades occidentales) lo

hacemos hoy en día se requerirían 10 planetas, no uno, para satisfacer nuestras necesidades” (Brundtland, 1994).

La reducción de desperdicios puede lograrse a través de tres caminos básicos (Vesilind y col., 2002):

- 1.- Reduciendo la cantidad de materiales empleados por producto sin sacrificar la utilidad de los mismos; empleando nuevas tecnologías o mejorando la eficiencia de los procesos de manufactura)
- 2.- Incrementando la vida media de un producto creando productos más duraderos o de componentes fácilmente reemplazables
- 3.- Eliminando la necesidad del producto creando productos multifuncionales o evitar el uso de productos no esenciales

En la industria, la reducción es llamada prevención de polución (3M y DuPont), esta opción es tan atractiva como elevados sean los costos de disposición de desechos ya que en muchas ocasiones el gasto de la disposición sobrepasa el gasto en un cambio de procesos. La prevención de polución es el proceso de cambiar las operaciones a fin de que los contaminantes jamás sean emitidos.

A nivel doméstico la reducción es llamada reducción de desechos o reducción de recursos englobando actividades tales como: Evitar el uso de bolsas desechables para una sola ocasión, rellenar los contenedores de los productos que así lo permitan, preferir los productos con mayor contenido neto sobre aquellos en presentación multi-empaque, etc. (Conn, 1995).

### **RE-USO**

El re-uso consiste en emplear un producto o partes del mismo en otro fin una vez que el objetivo primordial del mismo ha sido cubierto, el re-uso engloba desde el traspasar las prendas de un familiar a otro, hasta el emplear un frasco de café como almacenador de objetos.

### **RECICLAJE**

Reciclar consiste en seleccionar productos o partes de los mismos para los cuales ya no se tiene un uso, evitando el mezclado de los mismos con el resto de los desechos producidos a fin de reenviar los materiales a la industria para la creación de nuevos productos.

El reciclaje presenta varios problemas en su aplicación, el primero y propio es el hecho de que gracias a la inevitable degradación que los materiales sufren a través de cada uno de sus recorridos en el ciclo, el reciclaje perpetuo se vuelve imposible. Otros problemas incluyen la incertidumbre del mercado que desee comprar productos reciclados, la disposición de las comunidades hacia el pago por la infraestructura necesaria, la aparición de nuevos materiales predilectos y la disposición de materiales en bruto.



## RECUPERACIÓN

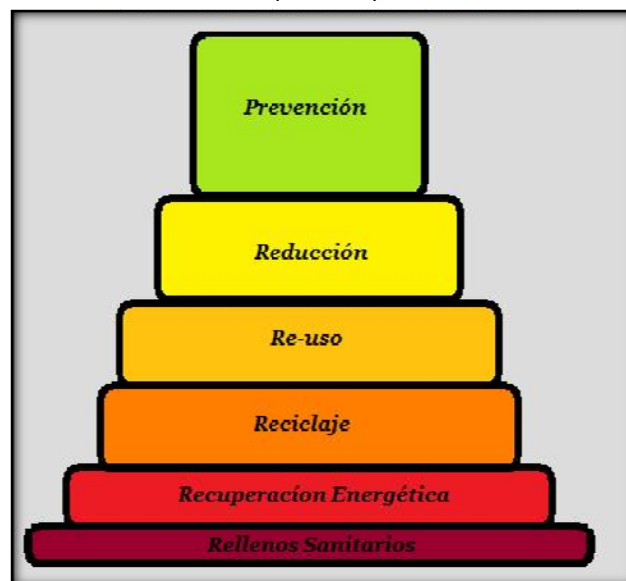
La recuperación es el proceso en donde los RSU son recolectados sin que exista una previa separación de los mismos en base a sus características, para después ser tratados y obtener los materiales deseados. Un punto a destacar es el hecho de que contrario al reciclaje, los materiales obtenidos de la recuperación se encuentran en un estado más básico, lo que hace posible que el material creado a base de los mismos llegue a igualar la calidad de uno producido con materiales en bruto. Sin embargo, tal cualidad no es gratuita ya que la energía necesaria para el proceso supera a la destinada a los procesos del reciclaje. Fortuitamente es aquí, cuando aparece el segundo uso de la recuperación el cual es la posibilidad de realizar una recuperación energética de los desechos. Esta posibilidad será tratada a detalle posteriormente.

### II.2.4 JERARQUÍA EN LA ADMINISTRACIÓN SOSTENIBLE DE RSU

Como se ha mencionado las 4r son esenciales dentro del ciclo de los materiales a través de la sociedad, sin embargo, el objetivo de la administración sostenible de los residuos las jerarquiza en base a lo deseable que es su presencia en el ciclo.

La jerarquización más ampliamente aceptada es llamada “waste not, Want not” la cual establece como prioritaria la reducción debido a la naturaleza finita de los recursos (entropía), colocando en segundo lugar al re-uso debido a su cercano a nulo empleo de energía, seguido del reciclaje minimizando la demanda energética y de materiales y la recuperación energética (no se necesita recuperar energía si se emplea menos). Para finalmente tener la alternativa menos deseable: los rellenos sanitarios. Sin embargo, no se debe dejar de lado el ideal superior a todas las alternativas mencionadas: La prevención (Figura II.24).

Figura II.24: Jerarquía de las acciones en la administración sustentable de residuos sólidos urbanos (autores)



---

## II.2. 5 MITOS ENRELAZADOS A LA ADMINISTRACIÓN SOSTENIBLE DE RSU

Se debe tener siempre presente que existen limitaciones inamovibles intrínsecas a la producción de desechos las cuales dan lugar a la creación de los llamados “mitos” en las estrategias de reducción de desechos alrededor del mundo, siendo los tres principales (Buclet y Godard, 2000).

**1.-EL MITO DE UNA SOCIEDAD POST-MODERNA DESMATERIALIZADA:** Sostiene que la intensidad de consumo de la sociedad puede ser reducida drásticamente de tal forma que la cantidad de desechos sea mínima. Siendo que el consumo material será substituido por el consumo de servicios inmateriales.

Pese a que la tendencia a los servicios inmateriales (computacionales, especulativos) es clara; estos no han disminuido la demanda de materiales, de hecho, en algunas ocasiones la han incrementado.

**2.- EL MITO DEL CICLO PERPETUO DE LOS MATERIALES:** Mantiene el hecho de que el ciclo de los materiales creados por el hombre puede llegar a ser completamente cerrado, como lo parecen los ciclos de los materiales en la naturaleza. Cualquier material puede ser re-usado o reciclado. La disipación de materiales al medio puede ser ignorada ya que su impacto ambiental es inexistente (visión “cero desperdicio”).

La visión “cero desperdicio” está inspirada en el hecho de que aparentemente, en los ecosistemas naturales no existen desperdicios, todos son reciclados por organismos especializados. Sin embargo, ningún ecosistema puede persistir sin grandes reservas de materiales y energía. Siendo así que el reciclaje total es imposible debido a que incluye pérdidas irreversibles (producción de entropía), la cual no puede ser prevenida sin una entrada energética excesiva. Es por ello que se debe buscar siempre un balance entre la energía usada y los materiales reciclados.

**3.- EL MITO DE LA MAESTRÍA DE LA CONTENCIÓN:** Sostiene que es posible crear tratamientos y contenedores perfectamente seguros, haciendo a los rellenos sanitarios irrelevantes para el medio ambiente. Descartando las posibles fugas contaminantes del aire y del agua. Sin embargo el problema de los desechos sólidos no es cuestión única del apartado técnico ya que en el remoto caso que se lograra la creación de tales depósitos, siempre saltaría el problema de donde colocarlos (Buglet y Godard, 2000)

Si bien el objetivo de los mitos no es el desvanecer las esperanzas de la administración sostenible, es una referencia necesaria para la concientización acerca de lo fútil de tomar una medida de forma aislada, ya que las mismas solo funcionan en conjunto lo cual ha dado origen a la administración integral de desperdicios (IWM, por sus siglas en inglés).

## II.3 TECNOLOGÍAS Y PROCESOS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RSU

### II.3.1 TÉRMICOS

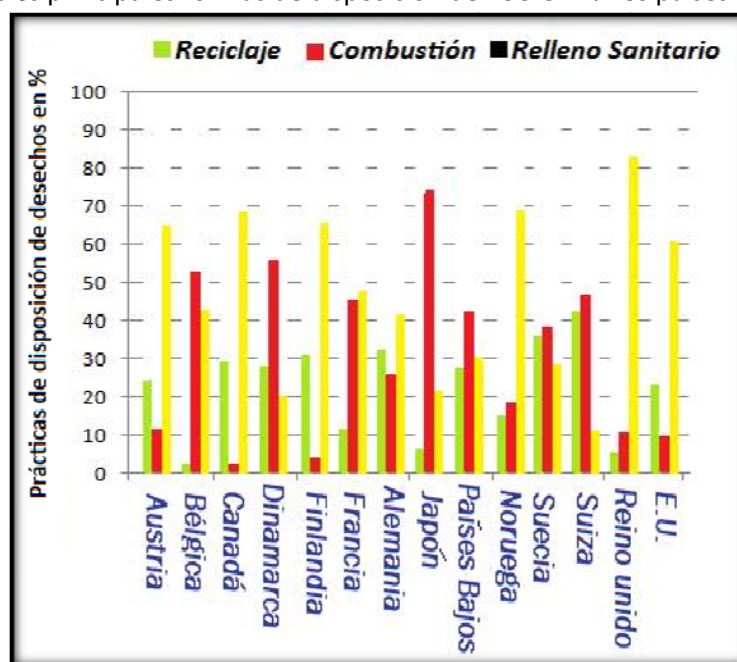
Los procesos térmicos basan su principio en la conversión termoquímica de la biomasa, es decir, la descomposición de la biomasa a través de calor. Tal transformación tiene como objetivo obtener material combustibles o en el caso de la combustión directa la energía en forma de calor.

#### II.3.1.1 COMBUSTIÓN DIRECTA (COMBUSTIÓN MÁSCICA O INCINERACIÓN)

Por mucho una de las más populares (Figura II.25) y en gran medida la menos eficiente de las tecnologías de recuperación y tratamiento de RSU (siendo sólo superada por los rellenos sanitarios). La combustión directa o másica es también la de menor dificultad y menor coste inicial de las tecnologías.

En Europa existían 304 plantas de incineración de desechos en operación para finales del 2000 (Granstein, 2001) mientras que en Estados Unidos eran 269. El total de la capacidad de las plantas era de 50.2 millones de toneladas de RSU. El total de la energía recuperada era de 49.6 TWh/año, de los cuales el 70% era empleado en la generación de calor y 30% en la generación de electricidad. El tamaño y producción energética de las plantas de incineración está incrementándose, de los 100 GWh/año en los 80's a los 400 GWh/año en los 90's, procesando de 125,000 t/año a 225,000 t/año. Siendo la planta más grande la AVR en los países bajos capaz de procesar 1.5 millones de toneladas y generando 500MW de electricidad (Granstein, 2001).

Figura II.25: Las tres principales formas de disposición de RSU en varios países (Granstein, 2001)



La combustión es la rápida oxidación de las sustancias combustibles que implica la liberación de energía en forma de calor. El oxígeno es el soporte esencial de toda combustión. El carbón y el

hidrógeno son por mucho las sustancias combustibles más importantes. Estos dos elementos están involucrados en todas las sustancias combustibles sólidas, líquidas y gaseosas. El azufre es el único otro elemento considerado como combustible (Tablall.6). En la combustión de RSU el azufre es despreciado en el apartado calórico debido a su baja aportación. Sin embargo, sus concentraciones son de alta importancia en cuestiones de sistemas de control de contaminación del aire. Debe destacarse que la única fuente de oxígeno considerada en la combustión directa es el oxígeno contenido en el aire que nos rodea.

Con motivos de estandarización se define una atmósfera seca promedio como una mezcla mecánica de 20.947% de O<sub>2</sub>, 78.086% N<sub>2</sub>, 0.934% Ar (argón), y 0.033% de CO<sub>2</sub>, por unidad de volumen (Lide, 1990). Debido a sus bajas concentraciones se suele agrupar al CO<sub>2</sub> y al argón con el nitrógeno bajo el concepto de "nitrógeno atmosférico" (N<sub>2atm</sub>), para de esta manera establecer la composición de aire por volumen y peso como lo muestra la Tablall.7 y emplear la misma para los cálculos de combustión.

El aire de la atmósfera también contiene cierta cantidad de vapor de agua. El nivel de vapor de agua, o su humedad, es una función de las condiciones atmosféricas. Si se desconocen los datos específicos la asociación americana de calderas ha optado por considerar un estándar de 5.896 g (0.013 libras) por kg de aire seco, lo que corresponde a 60% de humedad relativa y una temperatura de secado de 26.66°C.

Tabla II.6: Elementos presentes en la combustión (Hecklinger, 1996)

Substancia	Símbolo	Forma
Carbón	C	Sólido
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	Gas
Azufre	S	Sólido
Monóxido de carbono	CO	Gas
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Gas
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	Gas
Nitrógeno atmosférico	N <sub>atm</sub>	Gas
Aire seco		Gas
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Gas
Agua	H <sub>2</sub> O	gas/líquido
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	Gas
Óxidos de nitrógeno	NO <sub>x</sub>	Gas
Ácido clorhídrico	HCL	Gas

Tablall.7: Composición del aire (Lide, 1990)

Componente	% en Volumen	% en Peso
Oxígeno, O <sub>2</sub>	20.95	23.14
Nitrógeno atmosférico, N <sub>atm</sub>	79.05	76.86

Los principales factores a considerar para el empleo de la combustión directa de los RSU como medio de recuperación energética son: La humedad, su contenido combustible y la volatilidad de sus materiales constituyentes.

La **porción combustible** de los RSU se compone mayoritariamente de celulosa y materiales orgánicos similares originarios de la madera, mezclados con cantidades apreciables de plástico y goma, así como otras grasas, aceites, y ceras. Aproximadamente 35%-40% de la fracción combustible de los RSU está compuesta de materiales derivados de la celulosa como el papel y madera. El calor desprendido por la quema de celulosa es aproximadamente 8,000 BTU/lb (en seco). El calor liberado en la quema (seca) de basura es sólo ligeramente menor al de la celulosa. Sin embargo, la humedad en los RSU suele ser alta.

La **humedad** es una característica muy importante y ampliamente variable de los RSU. El contenido de humedad de los RSU suele ser del 25%, pero se han observado variaciones del 15 al 70%.

### II.3.1.2 PIRÓLISIS

La pirólisis (también conocida como carbonización, destilación destructiva, o destilación seca) es la descomposición de una sustancia a través del calor en ausencia de oxígeno. En la práctica donde la ausencia absoluta de oxígeno es imposible, se opta por cantidades de oxígeno menores a las estequiométricas. Ésta generalmente ocurre en temperaturas relativamente bajas (482.2°C a 593.33°C, comparados con los 982.2 para la combustión másica). La naturaleza heterogénea de los RSU ocasiona que las reacciones de la pirólisis sean complejas y difíciles de controlar. El proceso de pirólisis produce 3 componentes: Un sólido (carbón), un líquido (etileno) y un gas (metano); siendo todos los anteriores combustibles para usos subsecuentes y de amplio valor comercial. La calidad de los productos combustibles depende del material con que se alimente el reactor pirolítico (dependiente de las concentraciones de ceniza, celulosa, humedad, contenidos traza, etc.) y las condiciones de operación (ejemplo: Temperatura y tamaño de las partículas) del mismo (USCOTA, 1989).

Cabe destacar una diferencia fundamental entre los procesos de combustión y pirólisis. La combustión es un proceso exotérmico, mientras que los procesos de pirólisis son endotérmicos. Las dos variables más importantes en los sistemas pirolíticos son: a) La rapidez de calentamiento que tan rápido se eleva la temperatura del material con el que se alimenta y b) La temperatura final. Los rangos de estas dos variables se enlistan en la Tabla II.8.

Tabla II.8: Variables primarias de la pirólisis (Vessilind y col., 2002)

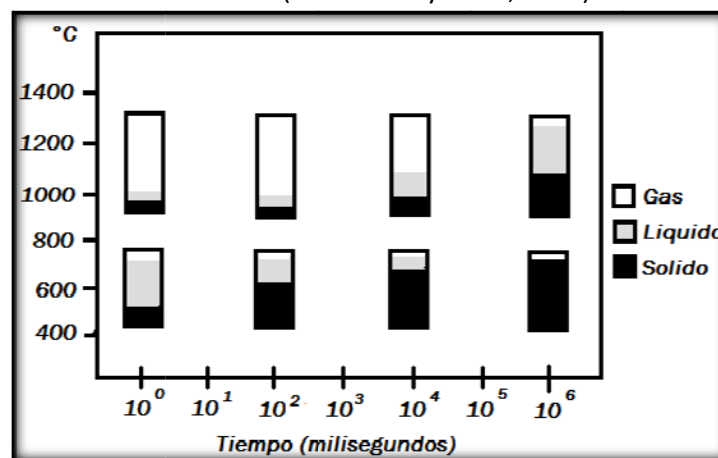
Velocidad de Calentamiento	°C/seg.	Temperatura	°C
Lento	<1	Baja	500 a 750
Intermedio	5 a 100	Intermedia	750 a 1,000
Rápido	500 a 10,000,000	Alta	1,000 a 1200
Relámpago	>100,000,000	Muy alta	>1200

Los estudios de Probestein y Hicks (1982) resumen de forma gráfica (Figura II.26) los productos obtenidos de la pirólisis en función de la temperatura máxima y el tiempo de residencia. La Tabla 2.9 muestra los productos obtenidos de diversos materiales a una temperatura de 500°C.

Tabla II.9: Productos originados de la pirólisis en % por unidad de peso a 500°C (Vessilind y col 2002)

Material	Gas de bajo valor calórico	Aceites	Ceniza/carbón vegetal
Carbón	56	31	10
Aceite esquisto	4	16	80
Mazorca desgranada	17	22	26
Estiércol	20	18	28
RSU	23	11	<50
Papel	16	47	10
plaquetas de leña	23	19	27

Figura II.26: Productos de la pirólisis en función de la temperatura máxima y el tiempo de residencia (Probestein y Hicks, 1982)



### II.3.1.3 GASIFICACIÓN

Al igual que la pirólisis, la gasificación es un proceso de descomposición de la materia a través de calor en el cual una cantidad (de cuya magnitud depende si la reacción se realiza de forma exotérmica o endotérmica) de oxígeno es introducida, como oxígeno puro o aire. Sin embargo, la gasificación ocurre a temperaturas de aproximadamente 1,200°C. La reacción produce un gas sintético con un contenido energético de aproximadamente 9.308 MJ/m<sup>3</sup> (250 BTU/ft<sup>3</sup>). La composición aproximada por volumen base en seco del gas se muestra en la Tabla II.10. Posteriormente el gas sintético es enfriado para reducir la formación de dioxinas y realizar un lavado (Goswami y Kreith, 2008).

Tablall.10: Componentes típicos del gas sintético de un gasificador (Goswami y Kreith, 2008)

Componente	% en volumen (seco)
Monóxido de carbono	25 a 42
Hidrógeno	25 a 42
Dióxido de carbono	10 a 45
Nitrógeno y otros	3 a 4

Existen primordialmente tres productos principales como resultado de la gasificación:

- a) Gases hidrocarbonados (también llamado gas de síntesis)
- b) Líquidos hidrocarbonados (aceites)
- c) Ceniza

Una vez que los sólidos carbonosos o el material líquido son convertidos a una fase gaseosa, las sustancias indeseables tales como los compuestos de azufre y ceniza pueden ser removidas del gas. En contraste con los procesos de combustión, que trabajan con exceso de aire, los procesos de gasificación suelen llevarse a cabo con una fuente de oxígeno sub-estequiométrica (generalmente con un 35% del oxígeno teóricamente requerido para completar la combustión).

Dependiendo de las condiciones de operación del gasificador, la configuración del sistema y el material gasificado pueden hallarse cuatro tipos de gases de síntesis (Rezaiyany Cheremisinoff, 2005):

- Gas de valor calórico bajo ( $3.5$  a  $10 \text{ MJ/m}^3$ ) puede ser empleado como gas combustible para turbinas, para calderas de vapor, y para reducción y derretimiento de hierro. Sin embargo, debido a su alto contenido de nitrógeno no es usable como sustituto del gas natural o celdas de combustible.
- Gas de valor calórico medio ( $10$  a  $20 \text{ MJ/m}^3$ ) usable en turbinas de gas, como sustituto del gas natural en combinación con procesos de metanización, para la producción de hidrógeno, para la alimentación de celdas de combustible, y para síntesis química.
- Gas de valor calórico alto ( $20$  a  $35 \text{ MJ/m}^3$ ) puede ser empleado como combustible para turbinas de gas, como sustituto de gas natural, como fuente de hidrógeno, en celdas de combustibles y en síntesis químicas sin la necesidad de procesos de metanización.
- Sustituto de gas natural (más de  $35 \text{ MJ/m}^3$ ) usable para la producción de hidrógeno y químicos, así como alimento para las celdas de combustible.

## II. 3.2 BIOLÓGICOS

Los residuos sólidos urbanos están formados por aproximadamente un 75% de material orgánico, que si bien puede convertirse a energía térmica por medio de una descomposición térmica, también puede transformarse por medio de procesos bioquímicos.

Como la totalidad de su composición, el porcentaje de material orgánico contenido en los RSU varía en cuestión de locación geográfica, las estaciones del año y hábitos alimenticios de la comunidad que los produce. Sin embargo, una constante es el hecho de que la parte orgánica de los RSU es la que posee el mayor contenido de humedad y por ende la mayor demanda de energía térmica para su transformación por medio de calor. Los siguientes métodos de tratamiento y aprovechamiento de RSU son considerados como de amplio espectro, es decir, se desconoce los organismos y reacciones específicas que intervienen en la bioconversión de los materiales, por lo cual su descripción y caracterización está basada en información empírica.

Si bien lo anterior puede resultar desalentador se debe recordar que los procesos biológicos también poseen cualidades que los hacen merecedores de atención. Tales procesos suelen tener costos de implementación y mantenimiento menores a aquellos de los procesos térmicos, así como un balance energético más favorable. Añadiéndose también el hecho de resultar una alternativa de menor impacto ambiental a nivel global. Los procesos biológicos destacan además por su relativa simpleza tecnológica.

### **II.3.2.1 RELLENOS SANITARIOS**

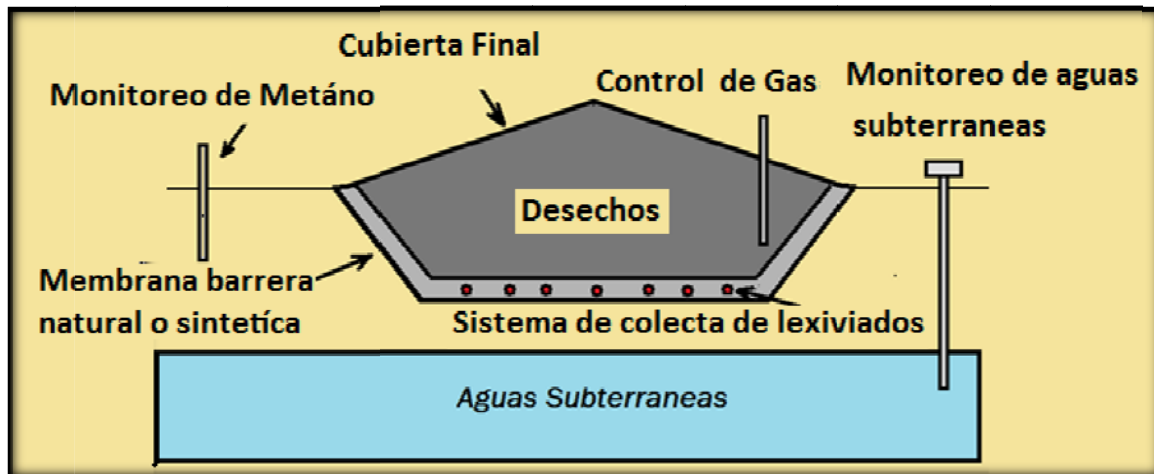
Aunque se logre una gran implementación de las medidas re-uso, reciclaje y recuperación de energía, siempre existirá una fracción sobrante de desechos que deben ser devueltos al medio. Es aquí cuando la opción menos deseada, sin embargo necesaria, debe ser adoptada: Los rellenos sanitarios. Dejando de lado la opción de su envío al espacio, alternativa seriamente considerada en 1970 por la agencia de protección ambiental (EPA) de Estados Unidos. Sólo existen dos posibles lugares para la colocación de los residuos sobrantes: a) El fondo de grandes cuerpos acuáticos b) espacios de tierra continental. Siendo que el primero está legalmente penalizado y además que desde el punto de vista filosófico los depósitos marítimos son un centro de almacenamiento más no un centro de tratamiento la única alternativa remanente es su disposición en tierra (Skumatz, 1991).

En un principio todos los lugares de destino para los materiales consistían en tiraderos a cielo abierto, los cuales presentan una gran cantidad de inconvenientes comenzando con el hecho de una mayor intensidad de sus efectos contaminantes sobre los alrededores, ya que tienden a atraer una gran cantidad de fauna nociva, que desplaza a las poblaciones locales y fomenta la transmisión de enfermedades. Hoy día se busca la eliminación paulatina de tales tiraderos, los cuales deberán ser reemplazados por rellenos sanitarios.

Un relleno sanitario es una infraestructura destinada a la disposición final de los residuos, en la cual son aplicados métodos de ingeniería a fin de minimizar los posibles impactos negativos de la deposición de los desechos sobre el medio y mantener un mayor control sobre las sustancias y gases que son producidos por los mismos. Los hoy día considerados componentes básicos para el cumplimiento de tal tarea pueden ser observados en la Figura II.27



Figura II.27: Componentes básicos para un relleno sanitario (Vesilindy col., 2002).



**Membrana barrera:** Tiene como objetivo evitar la migración de los lixiviados (agua contaminada proveniente de la base del relleno sanitario a consecuencia de la degradación de los desechos) y facilitar la remoción de los mismos. Generalmente consiste de múltiples capas de materiales de baja permeabilidad o las llamadas geo-membranas (materiales sintéticos impermeables).

**Sistema de Colecta de Lixiviados:** Es un sistema de tuberías guía para el flujo de lixiviado cuyo objetivo es facilitar la veloz remoción de estos, a fin de minimizar los riesgos de fugas a los mantos de agua subterráneas. Generalmente basan su función en el flujo activado por gravedad o el bombeo. Una vez colectados los lixiviados deben ser almacenados para su posterior tratamiento o bien re-circulado a fin de apresurar la descomposición de desechos.

**Sistema de control de gas:** A fin de evitar la fuga de gases hacia sitios indeseables (drenajes, cavernas, sótanos, etc.) y prevenir los riesgos de explosiones, es necesaria la creación de ventilas de gas o pozos de baja presión. Existen dos tipos de sistemas de control de gas:

- a) pasivos: Consisten en la liberación del gas sin un tratamiento previo o convergencia a un punto común
- b) activos: Conectan los sistemas de extracción a pipas de almacenamiento, extrayendo el gas mediante el empleo de bombas generadoras de vacío. A fin de realizar tratamientos posteriores sobre él, ya sea a través de su combustión directa y posterior liberación a la atmósfera o mediante un proceso que permita su empleo como fuente energética.

La última opción mencionada es poco usada hoy día, pese a una clara tendencia a su crecimiento, en virtud del incremento de costos en material, los problemas asociados a la naturaleza corrosiva de algunos componentes del gas y el bajo o nulo potencial térmico de otros, la limpieza y extracción de gas, y las posibles pérdidas energéticas.

**Sistemas de monitoreo:** Los sistemas de monitoreo fungen a manera de centinelas capaces de alertar sobre fugas contaminantes provenientes de lixiviados o gases, las cuales indicarían deficiencias en los sistemas de membrana y recolección de lixiviados.

## Procesos de degradación

Los rellenos sanitarios de RSU representan un medio carente de oxígeno, por lo cual el único lugar donde ocurren procesos aerobios es en su superficie (Hamilton y col., 1995). Siendo que los residuos sólidos urbanos contienen una gran fracción de materia orgánica que puede ser metabolizada por diversos microorganismos. Se da origen a una serie de procesos, paralelos debido a la composición heterogénea de los desechos, llevados a cabo por las comunidades microbianas existentes en el relleno sanitario.

Un patrón "clásico" general de degradación de la materia orgánica se presenta en la Figura II.28. Los materiales orgánicos son degradados en la presencia de oxígeno por hongos y bacterias heterotróficas, lo que resulta en la formación de compuestos orgánicos simples, por ejemplo la glucosa es el resultado de la descomposición de la celulosa. Estos compuestos pueden posteriormente ser empleados en presencia de oxígeno por microorganismos heterotróficos formándose así dióxido de carbono como producto final. En la ausencia de oxígeno los microorganismos desnitrificadores son capaces de metabolizar los compuestos de carbono para formar dióxidos y compuestos reducidos en nitrógeno tales como nitrógeno molecular ( $N_2$ ) o amonio ( $NH_4^+$ ). En la ausencia de nitrato como aceptador de electrones, el proceso de fermentación conlleva generalmente a la formación de acetato, otros ácidos grasos volátiles, compuestos simples de carbón, dióxido de carbono e hidrógeno. Pese a que el hidrógeno es el principal producto en la mineralización anaerobia, éste solo puede detectarse significativamente en sistemas anaerobios en casos raros. Solo es posible detectar altos niveles de hidrógeno en una fase donde los organismos fermentadores y sus procesos son predominantes. El hidrógeno puede ser empleado como donador de electrones por una serie de microorganismos (reductores de hierro, nitratos y sulfatos como también por metanógenos autotróficos).

Generalmente, el material orgánico solo es completamente degradado bajo una cierta presión parcial de hidrógeno debido a razones termodinámicas. Altas concentraciones de hidrógeno son capaces de inhibir las reacciones de fermentación. Tal inhibición solo puede ser sobrepasada gracias a la actividad de bacterias pepenadoras de hidrógeno. Sin embargo, en algunos casos la formación microbiana de bio-membranas permite la formación de reacciones de fermentación aún en altas concentraciones de hidrógeno.

Los ácidos grasos volátiles (AGV) pueden ser empleados por bacterias reductoras de hierro y magnesio. El sulfato es reducido por bacterias reductoras de sulfato (usando acetatos y carbono como fuente) llevando a la formación de sulfuro de hidrógeno mientras que en ausencia de sulfatos los AGV son convertidos en acetato por la acción de bacterias acetogéneas. El acetato es usado por las bacterias acetoclásticas metanogénicas para formar metano y dióxido de carbono como producto de la mineralización anaerobia. Adicionalmente, el metano puede ser formado por metanógenos autotróficos usando dióxido de carbono de desecho e hidrógeno de los procesos de fermentación. Como consecuencia los principales productos terminales resultado de la degradación orgánica de la materia orgánica en un ecosistema natural son el dióxido de carbono y el metano.

Si bien el proceso de degradación anaerobia se da por causas naturales dentro de los rellenos sanitarios, es bien sabido que tal procedimiento puede llevarse a cabo de manera más eficiente y veloz en un ambiente controlado.

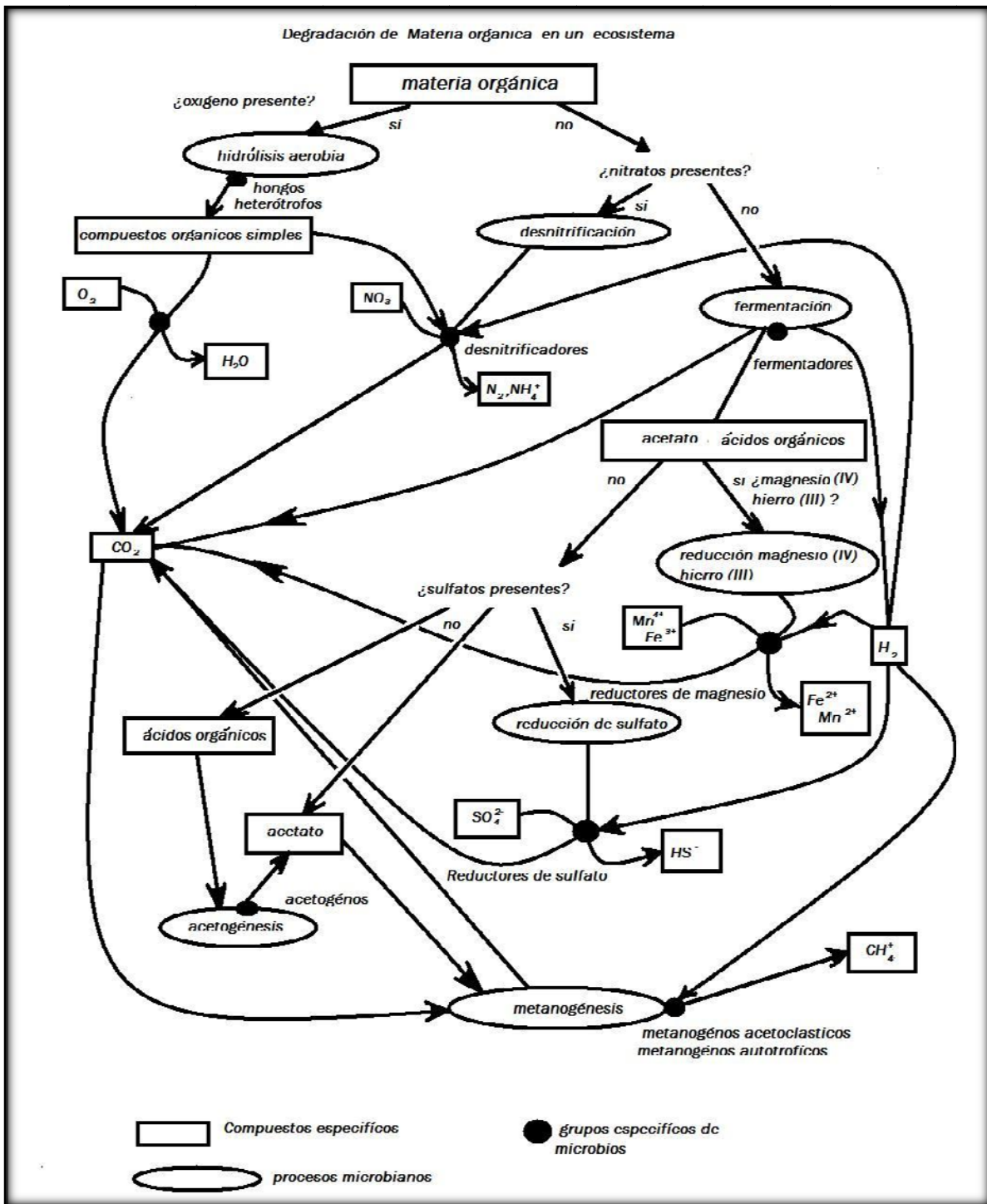
El gas resultante generalmente contiene de 40 a 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y 60 a 40% de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Anónimo, 1998) y otros gases en menor proporción (Tablall.11). Ambos gases son causantes del efecto invernadero, principalmente el metano cuyo impacto es cerca de 25 veces mayor al del dióxido de carbono. Los estimados de emisiones por tonelada de desechos alcanzan los  $10\text{m}^3$  anuales, logrando mediciones totales de 150 a  $300\text{m}^3$  (Schemid y Crowe, 2000).

Tablall.11: Componentes típicos del gas de rellenos sanitarios (Tchobangolus y col., 1993)

Componente	% en volumen (seco)
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrógeno	2 – 5
Oxígeno	0.1 - 1.0
Amoniaco	0.1 - 1.0
Hidrógeno	0 - 0.2

Cabe destacar que además de los dos componentes primordiales ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ), una amplia variedad de constituyentes minoritarios tales como hidrocarburos, hidrocarburos halogenados, alcoholes, éteres, ésteres cetonas y compuestos órgano-sulfúricos pueden ser detectados en concentraciones de significancia toxicológica (Schemid y col., 2001). En algunas ocasiones incluso se puede detectar emisiones de metales en forma de iones, compuestos solubles en agua y también en forma gaseosa (Lindberg y col., 2001).

Figura 11.28: Proceso de degradación en un relleno sanitario. (Ludwing y col, 2003)



### II.3.2.2 REACTORES ANAEROBIOS

Un reactor biológico puede definirse como un depósito en el que se producen una serie de reacciones bioquímicas llevadas a cabo por los microorganismos o enzimas que se encuentran dentro del mismo (Morris y Gealt, 1997).

El proceso de fermentación anaerobia es un caso particular donde ocurre la degradación de materia orgánica en condiciones anaerobias, es decir, en ausencia de oxígeno molecular como aceptador de electrones.

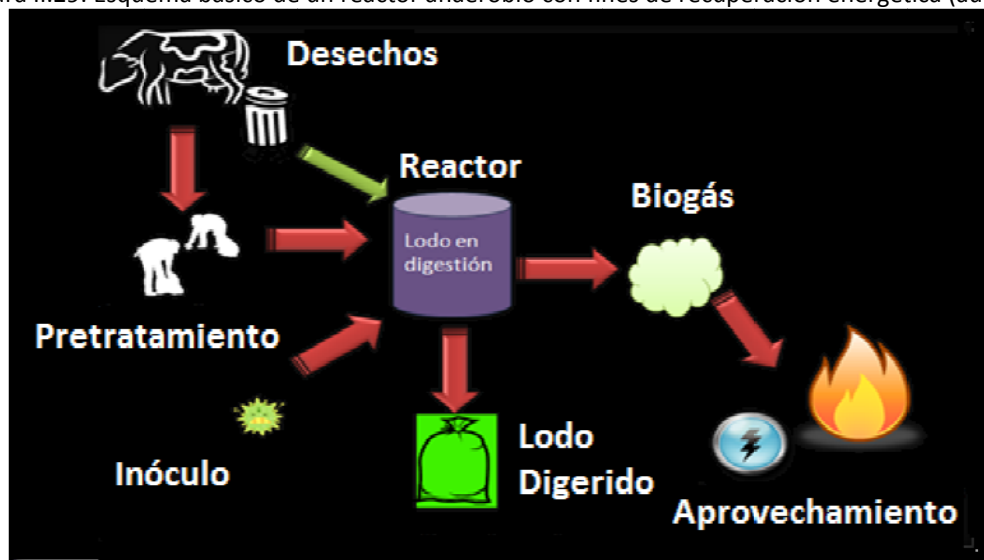
La principal ventaja de los procesos anaerobios con respecto a los aerobios es que en el segundo caso el balance energético suele ser positivo, al emplear tecnología de bajo costo para la transformación de desechos a energía. La Tabla 12 muestra algunas de las principales diferencias entre los procesos anaerobios y aerobios.

Tabla 12: Comparativa entre sistemas de degradación aerobios y anaerobios (Holland y col., 1987)

Aerobios	Anaerobios
60% de la energía perdida en la construcción de nueva biomasa (microorganismos).	90% de la energía es depositada en biogás.
40% de energía perdida en forma de calor.	7% de la energía perdida en forma de calor
50% del carbono del sustrato es convertido en biomasa.	5% del carbono del sustrato es convertido en biomasa.
50% del carbono es convertido en bióxido de carbono.	90% del carbono del sustrato es convertido en biogás.

Un sistema de degradación básico puede esquematizarse en forma de la Figura II.29, como puede observarse, algunos materiales deben ser pre-procesados para: 1) Remover sustancias tóxicas, 2) Remover materiales no-degradables o para tener una ingesta de nutrientes equilibrada. La mayoría de los desperdicios de ganado y aguas negras de plantas de tratamiento son relativamente homogéneos y suficientes en nutrientes. Lo cual implica la ausencia o mínima necesidad de tal tratamiento.

Figura II.29: Esquema básico de un reactor anaerobio con fines de recuperación energética (autores)



Cuando se emplea un desecho diferente a las heces de bovinos o porcinos, suele agregarse una porción de éstos a fin de cultivar los microorganismos preexistentes. A tal proceso se le denomina “inoculación”.

En cuestión de los procesos biológicos que se llevan a cabo en el interior del reactor puede clasificárseles en 3 etapas principales: a) Hidrólisis, b) Ácidogénesis y c) Metanogénesis. Cada una de éstas llevada a cabo por un grupo bacterial distinto. En la Figura II.30 se muestra un esquema generalizado de la degradación anaerobia (Tchobangolous y col., 1993).

a) **Hidrólisis :**

Es la 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:**

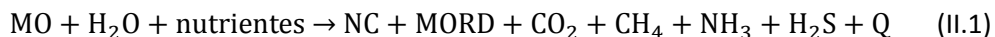
En esta etapa los monómeros resultado de la hidrólisis son transformado en el ácidos grasos volátiles (AGV) tales como los ácidos acético (representando cerca del 70% de los AGV), propiónico y butírico. En ésta etapa también se forma hidrógeno molecular ( $H_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

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 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 hidrógenos. 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 II.1 (Tchobangolous y col., 1993).

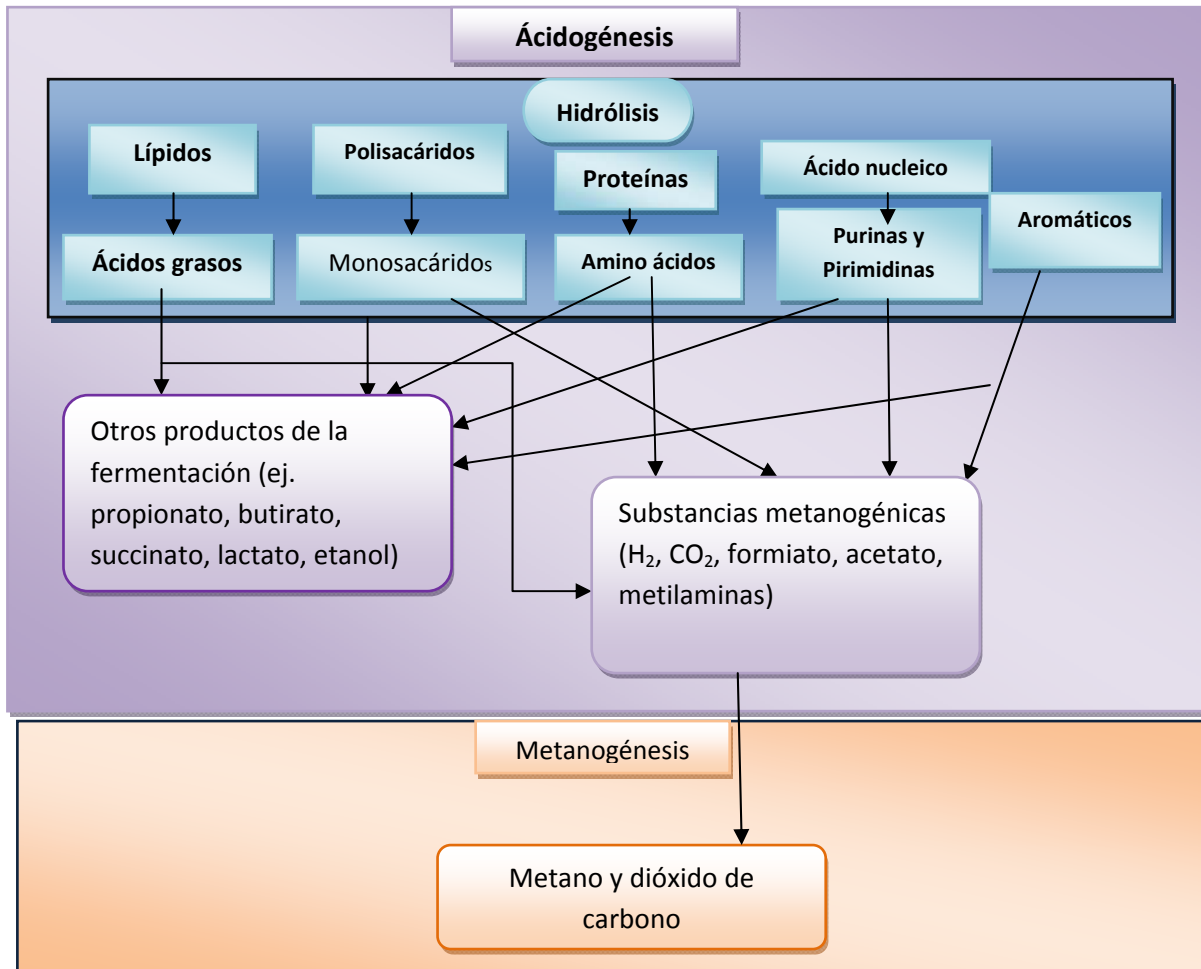


Donde:

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 más económicas y de fácil adquisición para pequeña generación. El metano al ser un gas inflamable puede ser 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  $CH_4$  puede ser empleado como combustible para vehículos de combustión interna (Vessilindy col. 2002).

Figura II.30: Etapas de la degradación anaerobia (Tchobangolous y col. 1993)



Algunas de las principales virtudes del proceso anaerobio incluyen:

- La reducción de emisiones de  $CH_4$  a la atmósfera
- Reduce la contaminación acuífera al usar desechos que muy probablemente terminarían en ríos y lagos
- La materia prima es de coste negativo (y en el caso de heces de fácil recolección)
- Disminuye el espacio necesario para la disposición final de desechos
- Incrementa las condiciones de higiene
- Reduce el olor proveniente de los desechos tratados
- El subproducto de la degradación, los llamados lodos digeridos, son usables como alimento para animales o abonos ricos en nutrientes de labranza cero

## II.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO

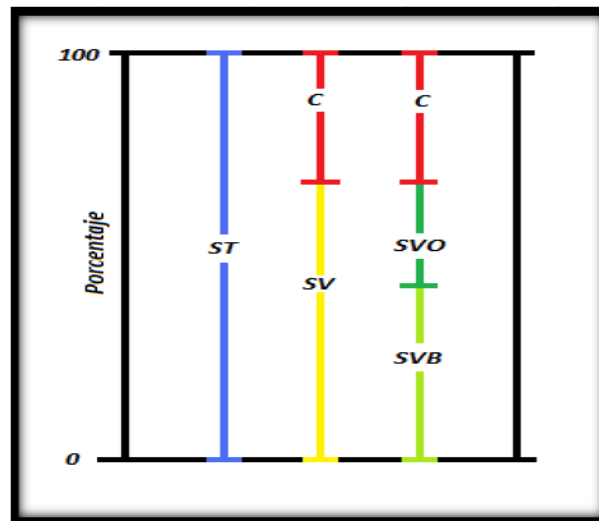
### II.4.1 FACTORES BIOLÓGICOS Y BIODEGRADABILIDAD

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 requiera largos periodos de tiempo. La Figura II.31 tiene como objetivo facilitar la apreciación de los componentes antes mencionados.

Figura II.31: Características típicas de un sustrato orgánico (Goswami y Kreith, 2008)



#### II.4.1.1 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 substrato 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 en el substrato inicial fue convertida en biogás.

En la Tabla II.13 se muestra los estimados del porcentaje de SVB contenidos en la fracción de SV para diversos componentes de los RSU.

Tabla II.13: Estimaciones de SVB contenidos en varios sustratos en 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

\*mezcla= 19% p. periódico, 53% p. oficina, 15% D. jardín, 13% D. comida

### b) Medición del contenido de lignina

Otro de los métodos analíticos disponibles para la determinación de la fracción de SVB de un substrato es la medición del contenido de lignina (CL) del mismo. Chandler y col.(1981) 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 substrato se muestra en la ecuación II-2. La Tabla II.14 muestra el contenido de lignina de algunos sustratos.

$$SVB = 0.83 - (0.028)(CL) \quad (II-2)$$

Donde:

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

Tablall.14: Contenido de lignina de algunos substratos 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

\*Mezcla= 19% papel periódico, 53% papel de oficina, 15% desechos de jardín, 13% de desperdicio de comida

### c) Estudios de quimiostato:

El último estudio a tratar está basado en la técnica de “La materia orgánica verdaderamente digerible”(True digestible organic matter, TDOM) desarrollada por médicos veterinarios para cuantificarla 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, BMP por sus siglas en inglés). En el ensayo PBM se determina la biodegradabilidad de cierto substrato 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.

#### II.4.1.2 BACTERIAS ANAEROBIAS

La degradación anaerobia de los residuos es resultado de la combinación y coordinación de procesos metabólicos de cierta población de microorganismos. Tal población puede dividirse en 4 grandes grupos, véase Tablall.15. Por convención suele agruparse también como: a) Hidrolíticas b) Acetógenos c) Metanógenos.

Tablall.15: Los cuatro grandes grupos bacteriales de la degradación anaerobia (Holand y col., 1987)

Grupo bacterial	Función
Bacterias hidrolíticas.	Catabolizar sacáridos, proteínas, lípidos y otras trazas.
Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno.	Catabolizar algunos ácidos grasos y productos neutros finales.
Bacterias homoacetogénicas.	Catabolizar compuestos unicarbonales o hidrolizar los compuestos multicarbón de ácido acético.
Bacterias metanogénicas.	Catabolizar acetato y compuestos de un carbón en metano.

Las bacterias metanogénicas son anaerobias obligadas que no toleran breves exposiciones al oxígeno (O<sub>2</sub>). En ambientes anaerobios son muy abundantes, tales como pantanos y suelos profundos, sedimentos marinos y de agua dulce, siendo bastante comunes en los intestinos de ciertos animales como vacas y porcinos. Su metabolismo es capaz de emplear el H<sub>2</sub> como fuente de energía y el CO<sub>2</sub> como fuente de carbono para su crecimiento (Brown, 1989).

Las bacterias metanogénicas identificadas hasta ahora y algunas de sus características se incluyen en la Tablall.16. Los géneros identificados comprenden *Methanococcus*, *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum*, y *Methanobacillus*. Debido a su morfología cambiante

(pleomorfología) son difíciles de identificar bajo el microscopio. Suelen variar en tamaños de 2 a 5  $\mu\text{m}$ .

Tablall.16: Características morfológicas de las bacterias metanogénicas, tamaño en  $\mu\text{m}$  (Holland y col., 1987)

Organismo	Morfología	Tamaño	pH óptimo	Donador de electrón
<i>Methanobacterium formicium</i>	bastones, pares sencillos o cadenas	2-15	-	hidrógeno y CHOO-
<i>M. strain MOH</i>	bastones, pares sencillos o cadenas	2-4	-	Hidrógeno
<i>M. arborphilicum</i>	bastones, pares sencillos o cadenas	2-3.5	7.5-8	Hidrógeno
<i>M. strain AZ</i>	bastones, pares sencillos o cadenas	2-3	6.8-7.2	Hidrógeno
<i>Methanosarcina barkeri</i>	Sarrcina	1.5-5	7	methanol e hidrógeno
<i>Methanobacterium rominatium</i>	cadena de cocos	1-2 diámetro	6.8-7.2	hidrógeno y CHOO-
<i>Methanococcus vannielli</i>	cocos	0.5-4 diámetro	7.4-9.2	CHOO-
<i>Methanobacterium mobile</i>	Bastón	-	-	hidrógeno y CHOO-
<i>Methanobacterium thermoautophium</i>	bastón	5-10	-	Hidrógeno
<i>Methanobacterium hungatii</i>	espiroquetas	50	-	hidrógeno y CHOO-

### NUTRICIÓN REQUERIDA

Para obtener éxito en la producción de metano a través de un sistema controlado, es necesario poner especial atención en sus procesos de estabilización. Las deficiencias nutricionales pueden resultar en inestabilidad y una bioconversión incompleta de los sustratos orgánicos.

Las bacterias metanogénicas tienen requerimientos de nutrientes minerales variables. Tales necesidades de nutrientes suelen clasificarse como macro y micronutrientes. Varios estudios conducidos en la Universidad de California Davis, muestran los rangos de las concentraciones necesarias de nutrientes para estimular el tratamiento anaerobio de la parte orgánica de los RSU. Los datos obtenidos a través de tres años del proyecto de gasificación biológica de sólidos en la UC Davis se muestran en la Tablall.17.

Tablall.17: Concentraciones de requerimientos nutricionales para una degradación anaerobia robusta(Kayhanian y Rich, 1995)

Nutriente	Unidad	Rango	Típico
C/N	—	20-30	25
C/P	—	150-300	180
C/K	—	40-100	70
Co	mg/kg	<1-5	2
Fe	mg/kg	100-5000	1000
Mo	mg/kg	<1-5	2
Ni	mg/kg	5-20	10
Se	mg/kg	0-0.05	0.03
W	mg/kg	0.05-1	0.1

## II.4.2 FACTORES FÍSICOS Y QUÍMICOS QUE AFECTAN LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA

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 éstos se muestra de manera sintetizada en la Figura II.32.

Figura II.32: Síntesis del efecto de los parámetros físico químicos sobre la producción de biogás (realizada a partir de Goswami y Kreith, 2008)



### II.4.2.1 TEMPERATURA

Con base a los rangos de temperatura (teóricamente de 3 a 70°C) de operación, un reactor puede clasificarse como mesófilico, termófilo o psicófilico. El reactor psicófilico opera en un rango de temperaturas entre los 3 y 20°C, lamentablemente tales temperaturas ocasionan actividades bacterianas muy bajas lo cual deriva en una producción de biogás despreciable. Un reactor mesófilico es aquel con temperaturas de operación entre los 20 y 40°C, entre sus principales cualidades se contemplan el decremento de humedad y CO<sub>2</sub> en el biogás, una población metanógena diversificada en especies y un balance energético más favorable. Por su parte un reactor termófilo es aquel que opera en rangos de temperatura entre los 45 y 65°C, como sus cualidades más favorables podemos citar los cortos tiempos de residencia hidráulica (tiempo mínimo de permanencia del sustrato dentro del reactor para alcanzar la máxima producción de biogás), la destrucción de gran parte de los organismos patógenos contenidos en el sustrato, presencia de especies metanógenas de metabolismo acelerado, y menor formación de lodos digeridos (ISAT, 2009). En la Tabla II.18 puede observarse una comparación entre los reactores termófilos y mesófilicos.

Tabla II.18: Ventajas y desventajas de reactores termofílicos y mesofílicos (Castro, 2008)

Reactor Termófilo	Reator Mesófilico
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

#### II.4.2.2 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 hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = - \log [H^+] \quad (II.3)$$

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:  $pH = \log[10^{-8}] = 8$ .

Diversos estudios de laboratorio han demostrado que los valores de pH por debajo del neutral, (Figura II.15) son indicadores de fallo en un reactor. Igualmente se cita al valor de 6.2 como punto de cese total de producción de gas metano (Vesselindy 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 su pH entre 7 y 8.5 debido al efecto amortiguador de dióxido de carbono y el amoniaco/amonio ( $NH_3- NH_4$ ), el nivel de pH es raramente considerado como medida de potencial de producción de biogás. Un reactor con altas concentraciones de ácidos volátiles requiere un pH más elevado de lo normal (ISAT, 2009).

Figura II.33: Relación de pH, pOH y concentraciones  $H^+$  y  $OH^-$  (ASTM, 1994)

#### II.4.2.3 MEZCLADO

Algunos substratos y varios modos de fermentación requieren de cierto grado de agitación o mezcla para mantener estabilidad dentro del reactor (ISAT, 2009). Los objetivos más importantes de la agitación se enlistan a continuación:

- Remoción de metabolitos
- Mezclado de la población bacteriana y el substrato fresco
- Prevención de formación de sedimentos y escoria
- Prevención de gradientes de temperatura pronunciados
- Creación de una densidad de población bacteriana uniforme
- Remoción de espacios muertos que reduzcan el volumen efectivo del reactor

Cuando se realice la selección del proceso de agitación se deben tener a consideración los siguientes tres puntos

1.- La relación simbiótica de las poblaciones bacterianas es vital para la estabilidad del reactor. El proceso de mezclado puede ocasionar que las concentraciones de especies puedan o no resultar adecuadas ocasionando una mayor o menor producción de biogás por parte del reactor. Se recomienda la agitación lenta sobre una violenta.

2.-Mientras que la escoria se mantenga húmeda es inofensiva para la eficiencia del reactor.

3.- Ciertos tipos de reactores son capaces de funcionar sin necesidad de agitación mecánica. Tales reactores suelen asociarse con substratos de alto contenido de sólidos, en los cuales suele no ocurrir estratificación.

#### **II.4.2.4 SUSTANCIAS ASOCIADAS A LA INHIBICIÓN METANOGENICA**

##### **INHIBICIÓN POR NITRÓGENO**

Todos los compuestos orgánicos contienen nitrógeno. Para 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 amoníaco-nitrógeno de 1,700mg por litro de substrato. Los microorganismos necesitan tanto carbono como nitrógeno para la construcción de sus 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 substrato (ISAT, 2009). La Tabla 1.19 muestra las relaciones C/N para diversos materiales.

##### **LIGNINA Y OTROS SÓLIDOS**

Como se ha mencionado la totalidad del porcentaje orgánico del substrato no es biodegradable, así pues grandes cantidades de lignina reducen la eficiencia de producción de biogás, debido a su difícil aprovechamiento. Igualmente el proceso de degradación es afectado por la superficie de reacción del substrato por lo cual se recomienda la previa trituración de los grandes componentes del mismo. Se denomina degradación baja en sólidos a la cual involucra substratos semilíquidos (sólidos <10%) y degradación alta en sólidos a aquella que involucra substratos semi-sólidos (20<sólidos<32).

##### **CONCENTRACIÓN DE SULFATOS**

El parámetro más significativo afectando la metanogénesis es la presencia de sulfatos. Una gran concentración de sulfatos estimula la producción de sulfuro que en pequeñas concentraciones pueden estimular el crecimiento de metanógenos, pero en grandes concentraciones pueden ocasionar la inhibición de los mismos.

##### **METALES PESADOS Y OTROS ELEMENTOS**

Se considera metales pesados a todos los metales con una densidad elemental mayor a 4.2 kg/L y que son metabolizados y desechados deficientemente por los organismos causando diversos impactos tóxicos (SEMARNAT, 2000).

Tablall.19: Relaciones C/N para diversos desechos

Material	N en %	C en %	Fuente
<b>A. Excremento animal</b>			Maramba , 1978
Porcino	2.8	13.7	
Carabao	1.6	23.1	
Vaca	1.8	19.9	
Gallina	3.7	9.65	
Pato	0.8	27.4	
Pugo	5	6.74	
<b>B. Desechos Caseros</b>			
Heces humanas	7.1	6.72	
Desperdicio de cocina	1.9	28.6	
<b>C. Residuos vegetales</b>			
Tallo de maíz	1.2	56.6	
Paja de arroz	0.7	51	
Mazorcas de maíz	1	49.9	
Cascara de maní	1.7	31	
Cogon	1.07	-	
Bagazo	0.4	-	
<b>D. otros</b>			
Kang Kong	4.3	7.8	Barnett, 1978
Lirio acuático	2.9	11.4	
Recortes de hierba	2.5	15.7	
Heces humanas	6	6-10	
Estiércol de vaca	1.7	18	
Estiércol de gallina	6.3	7.3	
Estiércol de caballo	2.3	25	
Heno	4	12	
Alfalfa	2.8	17	
Alga marina	1.9	79	
Paja de avena	1.1	48	Kaltwasser, 1980
Paja de trigo	0.5	150	
Bagazo	0.3	150	
Aserrín	0.1	200-500	
Heces humanas	6	5.9-10	
Estiércol de vaca	1.7	16.6-25	
Estiércol de puerco	3.8	6.2-12.5	
Gallinaza	6.3	5-7.1	
Estiércol de caballo	2.3	25	
Estiércol de oveja	3.8	33	
Heno	4	12.5-25	
Alfalfas	2.8	16.6	
Algas	1.9	100	
Paja de avena	1.1	50	
Paja de trigo	0.5	100-125	
Bagazo	0.3	140	
Aserrín	0.1	200-500	
Calabaza	3.6	12.5	
Jitomate	3.3	12.5	
Mostaza	1.5	25	
Cascara de papa	1.5	25	
Paja de arroz	0.6	67	
Paja de maíz	0.8	50	
Hojasca	1.0	50	
Soya	1.3	33	
Cacahuete	0.6	20	



Para la mayoría de los organismos del planeta la acumulación de metales pesados son causantes de enfermedad y muerte para las bacterias metanógenas causando inhibición en la producción del reactor. La Tabla II.20 muestra las concentraciones límite (mg/L) para varios inhibidores del proceso metanogénico.

Tabla II.20: Concentraciones límite de inhibidores de la biometanización (Gtz, 2001).

Substancia	[mg/l]
Cobre	10-250
Calcio	8000
Sodio	8000
Magnesio	3000
Níquel	100-1000
Zinc	350-1000
Cromo	200-2000
Azufre	200
Cianuro	2

#### II.4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL BIOGÁS

Como se ha mencionado el resultado de la degradación anaerobia es la generación de biogás, una mezcla principalmente compuesta de metano y dióxido de carbono (Tabla II.21).

Tabla II.21: Composición del biogás (FIRCO, 2007)

Gas	%
Metano	55-70
Dióxido de carbono	35-40
Hidrógeno	1-3
Nitrógeno	0.5-3
Sulfuro de hidrógeno	0.1
vapor de agua	Trazas

Debido a ser una composición variable de gases, las características del biogás suelen variar de caso en caso. Sin embargo, gracias a su composición primordial de dos gases (metano y dióxido de carbono y ácido sulfúrico) es posible una caracterización general del biogás. Algunas de las características de estos gases se presentan en la Tabla II.22.

El gas metano es poco soluble en agua. Solo una de cada tres unidades de metano (en volumen) pueden ser diluidas en 100 unidades de agua a 20°C y 1 atm de temperatura. Por otra parte, el dióxido de carbono es 1.5 veces más denso que el aire. Una unidad de CO<sub>2</sub> puede ser diluida en 1.5 unidades de agua a 20°C (MESSER, 2009).

Al quemarse, el metano produce una flama azul y una gran cantidad de calor. La combustión completa de  $1\text{m}^3$  de metano produce  $38\text{MJ}$  o cerca de  $950\text{kcal}$ . Comparativamente la combustión de un mismo volumen de biogás produce cerca de  $20$  a  $26\text{MJ}$ , lo cual representa un valor combustible relativamente bajo. Además requiere altas presiones para su licuefacción  $34,450\text{kPa}$  lo cual ocasiona una baja densidad energética en comparativa con otros combustibles fósiles (D. Goswami y Kreith, 2008)

Tablall.22: Características físicas de los componentes principales del biogás (Goswami y Kreith, 2008)

Características	Unidad	Valor promedio		
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S
Peso molecular	G	44.1	16.04	34.08
Presión de vapor a 21°C	kP	5719.0	-	1736.3
Volumen específico a 21°C, 101 kP	M <sup>3</sup> /kg	0.456	1.746	0.701
Punto de ebullición a 101 kP	°C	-164.0	-161.61	-59.6
Punto de congelación a 101 kP	°C	-78.0	-182.5	-82.9
Peso específico a 15°C(aire=1)		1.53	0.555	1.189
Densidad a 0°C	Kg/m <sup>3</sup>	1.85	0.719	1.539
Temperatura crítica	°C	31.0	82.1	100.4
Presión crítica	kP	7386.0	4640.68	9007.0
Densidad crítica	Kg/m <sup>3</sup>	0.468	0.162	0.349
Calor latente de vaporización at bp	kJ/kg	982.72	520.24	548.29
Calor latente de vaporización at mp	kJ/kg	189.0	58.74	69.78
Calor específico Cp a 21°C, 101 kP	kJ/kg°C	0.83	2.206	1.06
Calor específico Cv a 21°C, 101 kP	kJ/kg°C	0.64	1.688	0.803
Relación de calor específico Cp/Cv		1.303	1.307	1.32
Conductividad térmica	W/mK	0.8323	-	0.0131
Límites de flamabilidad en el aire	% /volumen	-	5.3-14	4.3-45
Solubilidad en agua	Kg/m <sup>3</sup>	4.0	24.0	3.4
Viscosidad	mPas	0.0148	0.012	0.0116
Calor neto de combustión a 25°C	MJ/m <sup>3</sup>	-	36.71	-
Calor bruto de combustión a 25°C	MJ/m <sup>3</sup>	-	37.97	-
Temperatura de encendido	°C	650.0	-	-
Octanaje	-	-	130	-
Ecuación de combustión	-	-	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S + 2O <sub>2</sub> → SO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O

El biogás es un poco más ligero que el aire, pesa la mitad que este último a 20°C. Su densidad a esa temperatura  $0.685\text{ kg/m}^3$  con un poder calorífico superior de  $18,262\text{ kJ/kg}_{\text{biogás}}$ . Su temperatura de inflamación es de  $700^\circ\text{C}$  y su llama alcanza temperaturas alrededor de los  $870^\circ\text{C}$ . Al combinarse con aire en una relación 1:20 y tener un porcentaje de de metano mayor o igual al 50% crea una mezcla explosiva que puede ser empleada en motores de combustión interna.

## II.4.4 EQUIVALENCIAS Y EMPLEO DEL BIOGÁS

### ENERGÉTICAS

Para comprender el potencial del biogás, se debe realizar una comparación con algunos usos de la energía que resulten más familiares. La Tabla 23 ilustra algunos ejemplos del uso de  $1\text{m}^3$  de biogás, con concentraciones de 60-70% de metano.

Tabla 23: Usos equivalente 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  $6\text{kWh}/\text{m}^3$ , cercano a medio litro de diesel, en la Tabla 24 se muestran las correspondencias de  $1\text{m}^3$  con algunos de los combustibles más comunes. El valor calorífico neto es dependiente de la eficiencia de los quemadores.

Tabla 24: Correspondencia de  $1\text{m}^3$  de biogás con otros combustibles (ICAR, 2008)

Combustible	Poder calorífico aprox. kWh/kg	Correspondencia de $1\text{m}^3$ biogás kg
Diesel	12	0.5
Keroseno	12	0.5
Madera	4.5	1.3
Estiércol de vaca	5	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	0.24

### AMBIENTALES

Gran parte de la población rural de México aún continúa empleando la leña como su energético primordial usándolo en cocción de alimentos, y para calentar y hervir agua. Como en otras partes del mundo, la utilización de la biomasa forestal para fines energéticos se realiza al margen del control y la gestión de agencias especializadas. Estudios de la Organización de Alimentación y Agricultura de las Naciones Unidas (Food and Agriculture Organization, FAO por sus siglas en inglés) estiman consumos de madera (leña y carbón) de  $38\text{Mm}^3/\text{año}$  ( $24.9\text{Mm}^3$  en el sector doméstico de auto consumo,  $6\text{Mm}^3$  en el sector comercial,  $6\text{Mm}^3$  en pequeñas industrias y  $0.7\text{Mm}^3$  en la generación de carbón). Igualmente se concluyó que el consumo per cápita se establece entre 2.1 y 2.6 kg/día. Las familias que recolectan leña emplean cerca de 3 a 4 jornales mensuales para

abastecerse del combustible mientras que la compran gastan entre 45 y 177 pesos, dependiendo de la región.

Estimando que 3kg per cápita de madera al día equivalen a un consumo energético diario aproximado a 13kWh, el cual puede ser cubierto por cerca de 2m<sup>3</sup> de biogás (ICAR, 2008). Una planta de dicha capacidad sustituiría a más de 4 toneladas de leña y 32 litros de keroseno anualmente. Un sistema de generación de biogás de 2.8m<sup>3</sup> de volumen podría salvar cerca de 0.12 hectáreas de bosque anuales (ICAR, 2008). En cuestiones de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, el reciente estudio de Winrock International "Nepal Biogas Support Program" ha demostrado que plantas de biogás de capacidad similar son capaces de mitigar la emisión de aproximadamente cinco toneladas equivalentes de dióxido de carbono anualmente. Debido a que el metano mantiene el segundo lugar como el gas de efecto invernadero más predominante y a que su potencial en la creación de éste efecto es 25 veces mayor. Las plantas de biogás producen un efecto gemelo de apoyo a la conservación ambiental:

1.-Al emplear energía renovable disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la demanda de combustibles fósiles.

2.-Reducen la cantidad de metano que es arrojada a la atmósfera, y por ende las concentraciones de gases efecto invernadero.

Esto puede visualizarse más fácilmente si se toma en cuenta que en promedio un 1m<sup>3</sup> de estiércol es capaz de producir 22.5 m<sup>3</sup> de biogás lo cual es equivalente a 146 kWh brutos y esto a su vez lo es a 36kg de emisiones de CO<sub>2</sub>. Las pequeñas unidades rurales adicionalmente reduce el uso de recursos forestales lo que como se ha mencionado reduce la deforestación al igual que la degradación del suelo, ayudando a impedir inundaciones y la desnitrificación del suelo. Nuevamente puede realizarse una conversión numérica de los efectos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> considerando:

$$1\text{m}^3 \text{ biogás (60\% \leq \%CH}_4) = 0.5 \text{ L de petróleo} = 1.6\text{kg CO}_2$$

$$1\text{m}^3 \text{ biogás} = 5.5\text{kg de leña} = 11\text{kg CO}_2$$

Aún cuando el biogás generado por los diversos desechos no tenga otro final que el ser incinerado, se tendrá un beneficio ambiental irrefutable sobre los combustibles fósiles debido a que la combustión del mismo representa tan sólo el 80% del CO<sub>2</sub> generado por la combustión de petróleo y el 50% de la quema de carbón.

## **II.4.5 COMPONENTES DEL SISTEMA**

### **II.4.5.1 TIPOS DE REACTORES EN BASE A SU ALIMENTACIÓN**

Existen diversos tipos de reactores para sistemas anaerobios. La clasificación más común tiene su fundamento en el modo de alimentación, pudiéndose así distinguir los siguientes tipos fundamentales (Goswami y Kreith, 2008):

- a) Reactores Batch (de una carga o a lotes)
- b) Reactores de mezclado total aflujo continuo
- c) Reactores de contacto anaerobio
- d) Reactores de flujo concatenado
- e) Reactor de crecimiento anaerobio adjunto
- f) Reactor con flujo reciclado

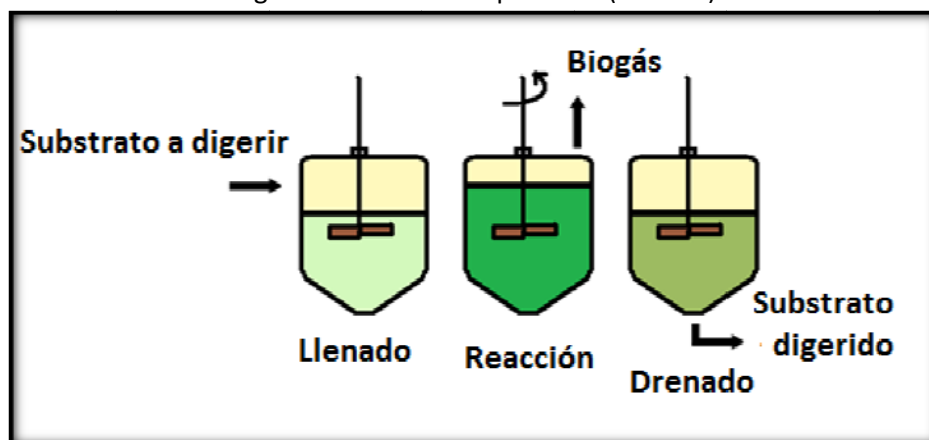
Sin importar el diseño de reactor que se elija, el reactor debe cumplir con las siguientes características:

- **Impermeabilidad ante el agua y biogás:** Impermeabilidad ante el agua a fin de evitar escurrimientos y filtraciones que resulten en un riesgo para los mantos acuíferos. Impermeabilidad ante el biogás a fin de evitar pérdida del mismo así como reducir el riesgo de explosión por entrada de aire.
- **Aislamiento térmico:** A fin de minimizar la pérdida de calor debido al clima local
- **Área de superficie mínima:** A fin de mantener los costos de construcción lo más bajos posibles y reducir las pérdidas de calor a través de las paredes del reactor. Idealmente la forma esférica presenta la relación volumen-área de superficie más ventajosa, pero para facilidades de construcción se suele emplear la forma hemisférica de base cónica.
- **Estabilidad de la estructura:** Suficiente para resistir las cargas dinámicas y estáticas, durables y resistentes a la corrosión.

#### II.4.5.1.1 REACTORES A LOTE (REACTOR BATCH)

Un reactor batch, también llamado de una carga, es aquel que es alimentado una única vez y es vaciado en su totalidad una vez que el tiempo de residencia hidráulico concluye. Suelen ser los reactores más simples y con la menor demanda de equipo. Los reactores tipo batch son ideales cuando el sustrato en degradación requiere tiempos de retención muy largos, siendo lo más común grandes sólidos. Otra de las principales aplicaciones de los reactores tipo batch es a escala laboratorio cuando se desea conocer el potencial de producción de metano de un sustrato en particular.

Figura II.34: Reactor tipo batch (autores)



El principal problema de los reactores tipo batch es su gran necesidad de volumen a escalas diferentes a la de laboratorio. Otro problema concerniente a este tipo de reactores es que requieren más supervisión humana que aquellos a flujo continuo. La Figura II.34 muestra el esquema básico de un reactor tipo batch.

#### II.4.5.1.2 REACTORES DE MEZCLADO TOTAL A FLUJO CONTINUO

Se denomina reactor a flujo continuo a aquellos reactores que son alimentados y drenados continuamente. Debido a esto, el substrato a digerir debe ser semilíquido y homogéneo. Suelen vaciarse automáticamente cuando ocurre un desbordamiento a causa del ingreso de nuevo material a digerir.

Sus principales ventajas sobre los reactores tipo batch son: a) La ausencia de la necesidad de espacio extra destinado al almacenamiento de desechos entre cargas y b) Una producción de biogás constante y generalmente mayor a aquella del tipo batch.

Hoy día la mayor parte de los reactores opera a flujo continuo. Sin embargo, los reactores batch aún mantienen cierta importancia debido a que para maximizar el aprovechamiento del potencial de producción de biogás de cierto substrato debe conocerse el tiempo de residencia necesario para su degradación.

El ritmo de alimentación necesario para un reactor a flujo continuo puede determinarse mediante la ecuación:

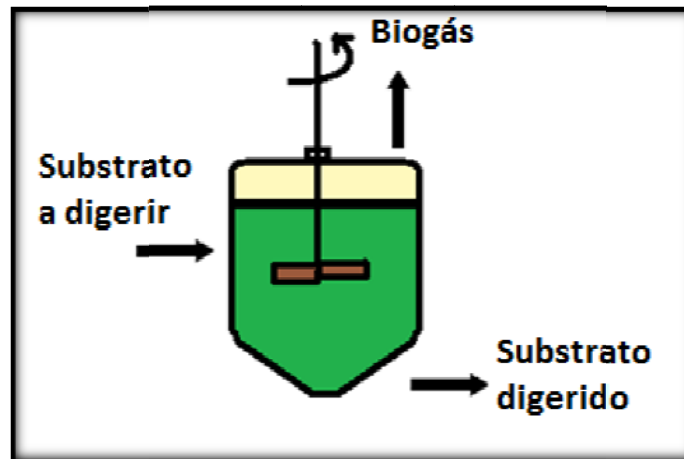
$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{II-4})$$

Donde: Q= flujo (vol/tiempo), V= volumen del reactor, t=tiempo de residencia hidráulica

Existen dos tipos de reactores intermedios entre los procesos a flujo continuo y lotes. Un reactor que es alimentado una única ocasión durante el día se conoce como reactor de alimentación semi-continua. Igualmente, un reactor que es alimentado de forma continua, pero solo es drenado cuando se ha alcanzado la estabilización (caída en la producción de biogás) del substrato, se conoce como reactor semi-batch.

En un reactor de mezclado total a flujo continuo, el contenido del reactor es mezclado hasta la homogeneidad mediante un sistema de mezclado. El efluente que abandona el reactor es exactamente el mismo material que en todo el reactor. Éste tipo de reactor puede también ser descrito como reactor bien-mezclado o reactor de tanque continuamente agitado (Continuous stirred-tank reactor, CSTRs). Debido al mezclado continuo los reactores de mezclado total a flujo continuo suelen tener ritmos de descomposición más lentos que otros reactores. En la Figura II.35 se puede observar el esquema de este tipo de reactor.

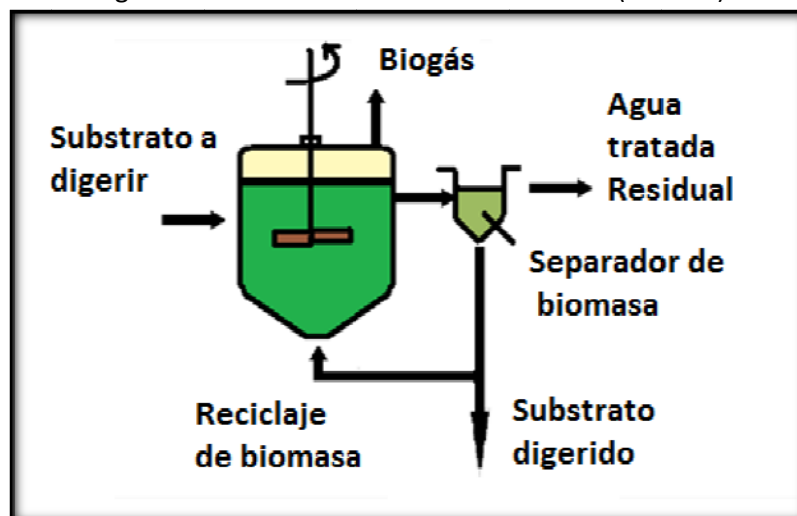
Figura II.35: Reactor de mezclado total a flujo continuo (autores)



#### II.4.5.1.3 REACTOR DE CONTACTO ANAEROBIO

El proceso de contacto anaerobio (anaerobic contact process, ACP) es empleado para sobrepasar las desventajas de los reactores de mezclado total sin emplear la recirculación. A fin de apresurar el ritmo de tratamiento del sustrato, la biomasa es separada del efluente y devuelta al reactor. La biomasa reciclada puede emplearse para reducir el tamaño y costo del reactor. Tiempos de residencia hidráulica tan bajos como medio día han resultado en serias disminuciones del tamaño del reactor. Este tipo de reactores suele ser empleado para el tratamiento de desechos de empacadoras de carne y materiales de desecho altamente resistentes y suelen ser operados normalmente en bajos-sólidos (sólidos totales <8%). La Figura II.36 esquematiza un reactor de contacto anaerobio.

Figura II.36: Reactor de contacto anaerobio (autores)



#### II.4.5.1.4 REACTOR DE FLUJO CONCATENADO (REACTOR DE ENCHUFE DE FLUJO)

Todos los reactores de este tipo son de alimentación continua o semi-continua. En este tipo de reactores el sustrato introducido atraviesa idealmente el reactor sin entrar en contacto con la

carga previa o con la carga posterior a la carga en cuestión. Los reactores de flujo concatenado suelen consistir de una serie de tubos cada uno con un lote de sustrato a degradar, ya sea en una conformación vertical u horizontal.

El tiempo de residencia de un reactor de flujo concatenado es el tiempo necesario para que un lote de sustrato que es introducido al inicio del reactor sea removido en el extremo final del mismo.

La mayoría de los reactores de flujo concatenado son operados en bajos-sólidos (usualmente  $ST < 10\%$ ). Debido a su configuración y su ausencia de mezclado los reactores a flujo concatenado suelen ser bastante susceptibles a desbalances por sobre carga de desechos. Las Figuras II.37 y II.38 muestran la configuración vertical y horizontal del reactor de flujo concatenado respectivamente (Goswami y Kreith, 2008).

Figuras II.37: Reactor de flujo concatenado vertical (autores)

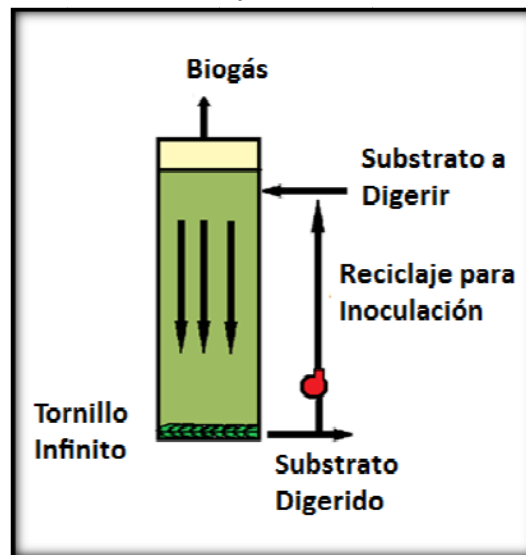
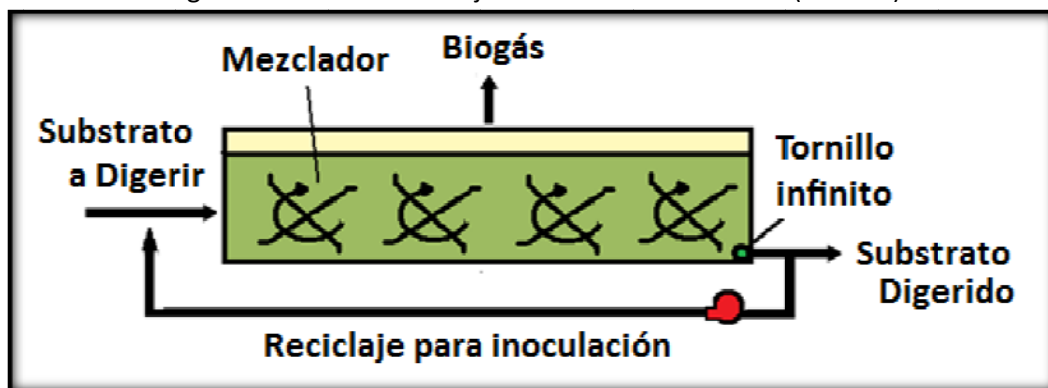


Figura II.38: reactor de flujo concatenado horizontal (autores)

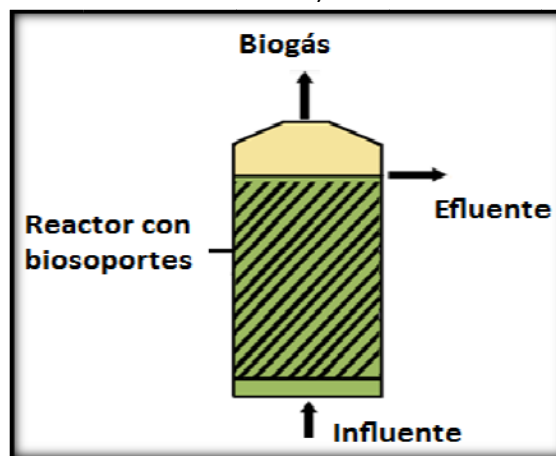




#### II.4.5.1.5 REACTOR DE CRECIMIENTO ANAEROBIO ADJUNTO

Los reactores de crecimiento anaerobio adjunto son empleados para prevenir el agotamiento de la población bacteriana dentro del reactor, de tal manera que la eficiencia del reactor sea incrementada. La retención bacteriana dentro del reactor es lograda introduciendo soportes microbianos (algún tipo de material que resulte altamente adherente para las bacterias). Varios materiales tales como rocas, trozos de madera y materiales plásticos de diversas formas y tamaños pueden ser empleados como soportes microbianos. Las bacterias adheridas filtran el material en tratamiento, mientras que las bacterias no adheridas son desechadas con el efluente. Este tipo de reactor es empleado normalmente para materiales de alta resistencia en baja concentración de sólidos ( $ST < 8\%$ ). La Figura II.39 muestra el esquema básico para el reactor de crecimiento anaerobio adjunto.

Figura II.39: Reactor de crecimiento anaerobio adjunto (realizado a partir de Goswami y Kreith, 2008)



#### II.4.5.1.6 REACTORES CON FLUJO RECICLADO

A menudo resulta ventajoso reciclar y mezclar el efluente de un reactor anaerobio con el influente del mismo. El reciclaje es particularmente ventajoso cuando es necesario inocular el sustrato a digerir con bacterias aclimatadas al sistema. El reciclaje de la biomasa puede usarse también para decrementar el tiempo de residencia promedio en el reactor y diluir las grandes concentraciones de desechos. Igualmente el proceso de reciclaje de una porción de la biomasa puede usarse a manera de control, permitiendo al reactor responder a fluctuaciones en los desechos. El reciclaje, sin embargo, añade costos, tanto capitales como operacionales, al sistema. Por lo tanto, a menos de ser necesario, el uso de un sistema más simple, carente de reciclaje debe ser favorecido

#### II.4.5.2 MATERIALES DEL REACTOR

Los reactores pueden ser contruidos de cualquiera de los siguientes materiales (ISAT, 2009).

---

## **REACTORES DE ACERO**

Inherentemente impermeables al gas los reactores de acero tienen una buena resistencia a la tensión y son relativamente fáciles de construir. En muchos casos los recipientes de acero de desecho pueden ser aprovechados como reactores. Su susceptibilidad ante la corrosión tanto externa (humedad del aire) como interna (medio agresivo) pueden ser un serio problema, por lo cual siempre se deben recubrir con un material anticorrosivo que debe ser aplicado y revisado cada determinado tiempo. Los reactores de acero son de balance económico positivo solo cuando provienen de los desechos.

## **REACTORES DE CONCRETO**

A fin de garantizar su impermeabilidad ante el gas los reactores de concreto requieren de una construcción cuidadosa y recubrimientos de aislamiento. Su principal problema suelen ser las filtraciones por cuarteaduras en las uniones superiores y laterales. Sus principales ventajas son su aparentemente ilimitada vida útil y su construcción relativamente barata.

## **REACTORES DE MAMPOSTERÍA**

La mampostería se ha colocado como el material más común para la creación de reactores en pequeña escala. Su construcción más común suele ser bajo tierra en acabado de domo. A fin de evitar fugas se debe emplear tabiques bien cocidos y bloques de concreto de alta calidad.

## **REACTORES DE PLÁSTICO**

Actualmente los reactores de mayor difusión en la ingeniería del biogás. Se debe tener en cuenta que existen diferencias entre los plásticos flexibles y los rígidos. Los plásticos flexibles pueden ser empleados para la construcción total de la cámara de reacción como la tapa para ésta última. La durabilidad, permeabilidad ante el biogás, resistencia a la corrosión, resistencia a los rayos UV y al estrés mecánico varía en cada tipo de plástico en base a sus procesos de creación. El plástico de mayor empleo en la actualidad debido a su resistencia a la corrosión y esperanza de vida así como por su fácil reparación es el denominado plástico reforzado con fibra de vidrio (glass-fibre reinforced plastic), el cual normalmente es empleado en la configuración "sándwich" (GRP-espuma de aislamiento-GRP) a fin de minimizar los costos de aislamiento "local" y facilitar su transporte.

### **II.4.5.3 INÓCULO**

Se denomina inocular al proceso de introducir en un sistema una sustancia que contiene organismos ajenos o de menor presencia dentro del mismo. En un sistema de degradación, el inóculo suele ser empleado a fin de agilizar el proceso de metanización, y suele consistir comúnmente en estiércol de animales de granja, sedimentos de río o idealmente efluentes de un reactor destinado al aprovechamiento de un substrato idéntico o similar al que se desea aprovechar.

#### **II.4.4.4 TANQUE DE COLECTA DE INFLUENTES**

Normalmente se suele tener un tanque de almacenamiento de substratos preliminar a su ingreso al reactor. Dependiendo del sistema, el tanque debe tener la capacidad de almacenar el substrato de uno o dos días. El tanque de colecta puede ser empleado adicionalmente para la homogenización del substrato y para obtener la consistencia deseada en él mismo. Una locación cálida es capaz de ayudar a calentar los contenidos del tanque antes de que éstos entren al reactor lo cual ayuda a prevenir los choques térmicos que pueden tener lugar debido a la diferencia de temperaturas entre el substrato en degradación y el substrato de entrada. Otro aspecto importante a considerar es el factor del hedor que puede ocasionar un mal manejo del tanque de colecta de influentes, ya que pese a que los procesos dentro del reactor consumen los compuestos aromáticos, logrando una remoción de hedor hasta un 97% (Lusk,1998), el substrato a entrar al reactor presenta propagación de olores.

#### **ENTRADA Y SALIDA**

Las tuberías de entrada (alimentación) y salida (drenaje) deben conectarse en forma recta al reactor y con ángulos de contacto inclinados. Para substratos líquidos se requieren diámetros de tubería de 10 a 15cm, mientras que los substratos fibrosos requieren diámetros entre los 20 y 30cm (ISAT, 2009).

Las tuberías de entrada y salida deben ser rectas, de tal forma que de ser necesario pueda introducirse una varilla de desazolve en ellas. Las tuberías deben conectarse cerca del nivel más bajo del substrato sin sobresalir del mismo.

La tubería de entrada debe ser colocada a mayor altura que la tubería de salida a fin de promover un flujo más uniforme del substrato.

#### **II.4.5.5 MODELOS DE PLANTAS DE BIOGÁS**

Existen diversos modelos de plantas de biogás cada una de ellas con un tipo básico de almacenadores de gas para los sistemas de aprovechamiento de biogás, enlistándose a continuación los más comunes (ISAT, 2009):

- Planta de tambor flotante
- Planta de domo fijo
- Planta tipo globo
- Planta de foso de tierra
- Plantas de ferrocemento
- Planta europea

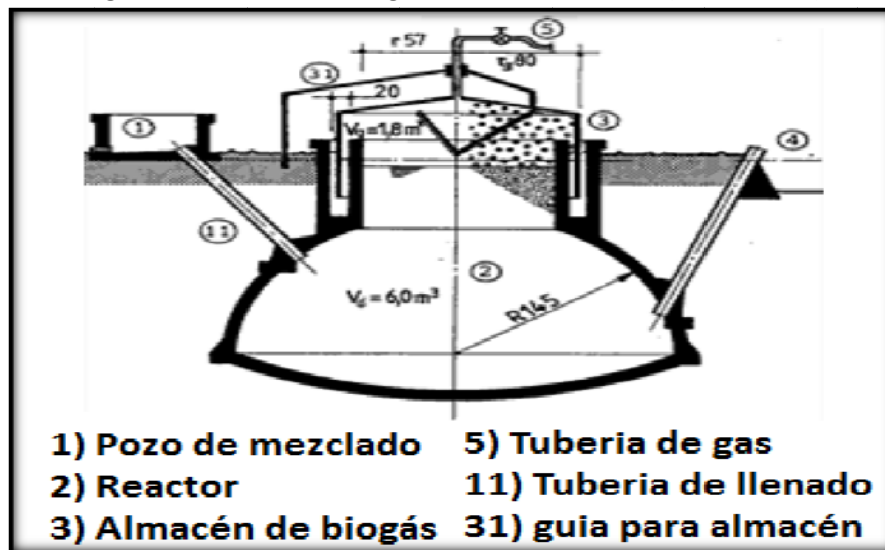
La elección de diseño en los países en desarrollo está en gran medida determinado por las condiciones climáticas, substrato a emplear y especialmente por las condiciones económicas de la región. El espacio y estructura del suelo determina si el reactor estará bajo tierra o sobre esta. Su estructura debe estar caracterizada para su fácil adaptación a las estructuras de existencia previa.

Se debe buscar minimizar costos, especialmente cuando los beneficios monetarios se prevén como bajos. Continuamente la reducción de costos está ligada de forma indirectamente proporcional a la obtención de gas.

#### II.4.5.5.1 TAMBOR FLOTANTE

Los reactores más comunes en el pasado de la India. Consisten en una de forma cilíndrica o de domo y de un almacenador de gas en forma de tambor flotante. El reactor suele construirse de masonería o ladrillo. Los tambores suelen ser construidos en su mayoría por hojas de acero de 2-4mm de espesor, con los laterales de mayor espesor a fin de compensar el mayor grado de corrosión. El tambor suele flotar ya sea directamente sobre el substrato en degradación o en una chaqueta de agua separada (Sasse, 1984). Si el biogás es producido, el tambor se mueve hacia arriba, si el biogás es consumido el tambor se hunde. En la Figura II.40 se muestra el esquema de este tipo de planta.

Figura II.40: Planta de biogás de tambor flotante (Sasse, 1984)



Este tipo de plantas son empleadas en la degradación de excrementos de animales y humanos en alimentación continua. En pequeñas granjas suele sugerirse medidas de los 5 a 15m<sup>3</sup> mientras que para instituciones y complejos agroindustriales suelen emplearse medidas entre los 20-100m<sup>3</sup>. En la Tabla II.25 se muestra una comparativa entre las ventajas y desventajas de este tipo de plantas.

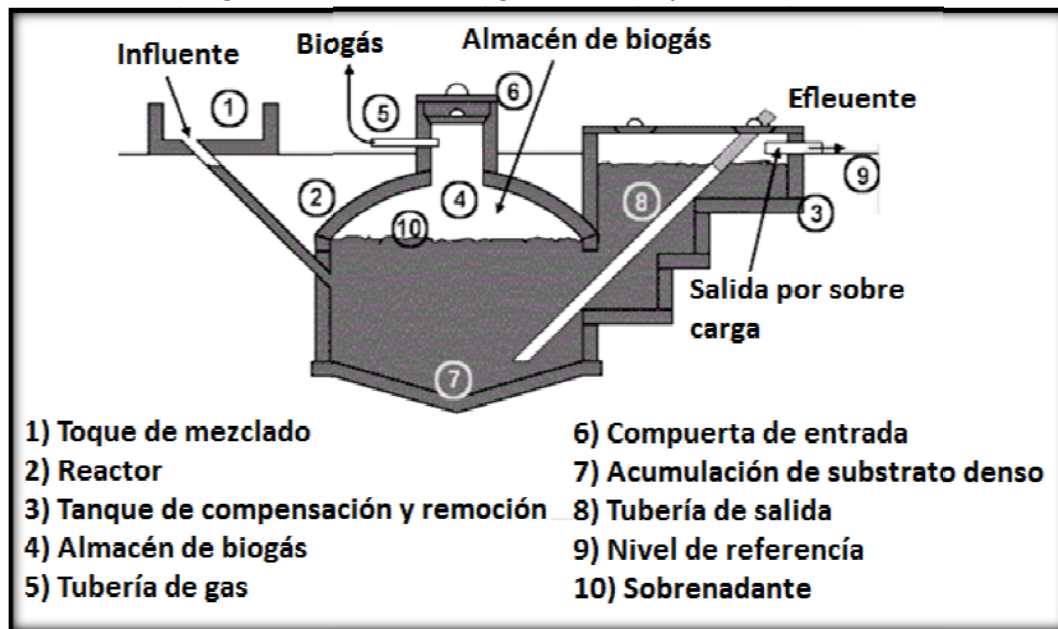
Tabla II.25: Ventajas y desventajas de las plantas de biogás tipo tambor flotante (ISATb, 2009)

Ventajas	Desventajas
La planta de biogás es sencilla de operar y comprender	El tambor es relativamente caro y requiere mantenimiento constante
Proveen gas a presiones constantes	El tiempo de vida útil del tambor es corto (alrededor de 15 años en zonas templadas y 5 años en los trópicos)
El volumen de gas presente es fácilmente perceptible por la posición del tambor	Si se emplea un substrato fibroso el tambor tiende a quedar adherido a la superficie del mismo
La permeabilidad ante el gas no presenta problema mientras se de mantenimiento al tambor	

### II.4.5.5.2 PLANTA DE DOMO FIJO

El reactor de mayor auge en China con variaciones en su construcción presentes en la India y Tanzania. De mayor sencillez que las plantas de tambor debido a la ausencia de partes móviles. Las plantas de domo fijo son de costo relativamente bajo. Igualmente, la son menos susceptibles a la corrosión al no presentar partes de acero, logrando una vida útil cerca a los 20 años o más. El reactor suele construirse bajo tierra a fin de ahorrar espacio y protegerlo contra el daño físico (Fulford, 1985). Mientras que esta locación permite aislarlo de las bajas temperaturas nocturnas e invernales, ocasiona también un aislamiento ante el calor proveniente del sol. La Figural.41 muestra los elementos básicos de construcción para una planta de domo fijo.

Figural.41: Planta de biogás de domo fijo (Fulford, 1985)



Las plantas de domo fijo consisten en un reactor cerrado en forma de domo con un almacén de gas rígido y un pozo de desplazamiento también llamado tanque de compensación. El gas es almacenado en la parte superior del reactor. Cuando la producción de gas comienza el substrato en degradación es desplazado al tanque de compensación por acción de presión ejercida por el gas.

Los reactores de domo fijo suelen construirse de mampostería. Las plantas de domo fijo son capaces de producir las mismas cantidades de biogás que aquellas de tambor flotante. Sin embargo, el empleo del gas se ve afectado debido a las substanciales fluctuaciones de presión, ocasionando que los quemadores no pueden ser empleados de forma óptima. Cuando se requiera de una presión constante (ej. motores) es necesaria la implementación de un regulador.

Las plantas de domo fijo requieren de una cubierta de tierra en su parte superior como medida para contrarrestar la presión interna del gas (cerca a 0.15 Bar). Debido a factores económicos se recomiendan medidas mínimas de  $5\text{m}^3$ . Mientras que las máximas conocidas y posibles llegan hasta

los 200m<sup>3</sup> (Amaratunga,1986). La Tabla II.26 muestra una comparativa entre las ventajas y desventajas de las plantas de domo fijo.

Tabla II.26: Ventajas y desventajas de las plantas de domo fijo (ISATb, 2009)

Ventajas	Desventajas
<p>Bajo costo inicial y larga vida útil.</p> <p>Carencia de partes móviles y susceptibles a la corrosión.</p> <p>De bajos requerimientos espaciales y calefacción.</p> <p>Proveen de empleo a la comunidad donde se construye</p>	<p>Requieren aislantes y habilidades técnicas especializadas para garantizar impermeabilidad ante el gas.</p> <p>Presentan fugas frecuentes de gas</p> <p>Fluctuaciones constantes en la presión del gas dificultan su aprovechamiento.</p> <p>Es difícil percibir el la cantidad de gas presente dentro del reactor.</p> <p>La excavación puede resultar difícil en terrenos rocosos</p>

#### II.4.5.5.3 PLANTAS DE TIPO GLOBO

Las plantas de tipo globo consisten de una bolsa de polímero sellada al calor, que funge a manera de reactor y almacén de gas. El gas se almacena en la parte superior del globo, mientras que la entra y salida están directamente incrustadas a la superficie del mismo. La presión de gas puede ser aumentada o disminuida con tan solo colocar peso sobre él. Debido a que la presión ejercida por el gas puede llegar a superar la resistida por el globo es necesario contar con válvulas de seguridad. En caso de que la presión del gas este por debajo de la adecuada deberá emplearse una bomba. Debido a que el material del globo debe ser resistente a los rayos UV, el clima y esfuerzos físicos, suele preferirse el empleo de plásticos reforzados especialmente estabilizados o caucho sintético así como el RMP (red mud plastic). Por el constante estrés físico al que se somete el globo su vida útil tiende a estar limitada a dos o tres años. La Figura II.42 muestra un esquema básico de las plantas tipo globo y en la Tabla II.27 se puede apreciar una comparativa entre las ventajas y desventajas de las plantas antes mencionadas.

Figura II.42: Planta de biogás tipo globo (autores)

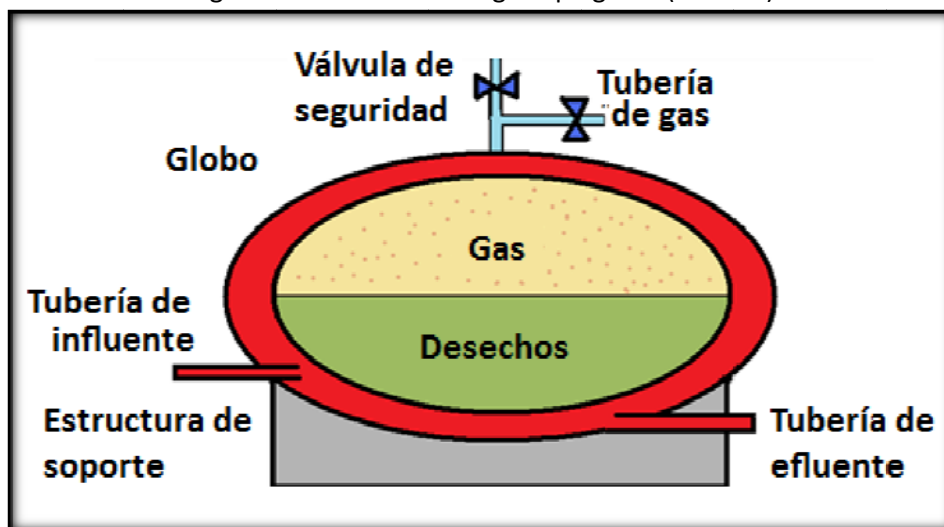


Tabla II.27: Ventajas y desventajas de las plantas de biogás tipo globo (ISATb, 2009)

Ventajas	Desventajas
Prefabricación estándar de bajo costo. Instalación ligera. Altas temperaturas dentro del reactor en climas cálidos. Limpieza, vaciado y mantenimiento sencillo. Posibilidad de empleo de substratos de lenta degradación	Recurrente necesidad de un sistema de bombeo. Limitada vida útil. Materiales de importación. Susceptibilidad ante el riesgo por daño físico. Técnicos de reparación raramente disponibles

#### II.4.5.5.4 PLANTA DE FOSO DE TIERRA

Similares en diseño a las plantas de domo fijo con la diferencia crucial de carecer de una robusta estructura de masonería intercambiándola por ligeras guías de cemento. Estas plantas solo son posibles en terrenos bastante sólidos (laterita). El almacén de gas suele construirse de algunas hojas de metal o plástico con un anillo base de masonería capaz de proporcionar estabilidad y anclaje. Se recomienda su instalación sólo cuando el suelo sobre el cual han de colocarse es impermeable al agua. La Tabla II.28 muestra sus principales ventajas y desventajas.

Tabla II.28: Ventajas y desventajas de las plantas de biogás de foso de tierra (ISATb, 2009).

Ventajas	Desventajas
Las plantas de biogás a escala comercial de más bajo costo (cerca del 20% de una de tambor flotante). Alto potencial de autoayuda y promoción	Vida útil demasiado corta Solo implementable en suelos impermeables y lo bastante sólidos

#### II.4.5.5.5 PLANTAS DE FERROCEMENTO

El ferrocemento es un material para la construcción, un material de hormigón de poco espesor, flexible, en el que cierto número de mallas de alambre de acero están distribuidas uniformemente sobre su sección transversal se utiliza un mortero muy rico en cemento lográndose una calidad mejorada con respecto al hormigón armado cuya resistencia está dada por la forma de las piezas.

La construcción de una planta de ferrocemento puede ser de auto-soporte o colocada dentro de un foso de tierra. El reactor suele ser de forma cilíndrica. Las plantas de pequeño volumen (hasta 6m<sup>3</sup>) pueden ser prefabricadas. Como en el caso de las plantas de domo fijo el almacén de gas requiere un cuidadoso sellado. En la Tabla II.29 se realiza una comparativa entre las ventajas y desventajas de este tipo de plantas.

Tabla II.29: Ventajas y desventajas de las plantas de ferrocemento (ISATb, 2009)

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de construcción, especialmente en comparación con la masonería de las plantas de domo fijo. Producción en masa posible. Baja demanda de marial	Bajo costo de construcción, especialmente en comparación con la masonería de las plantas de domo fijo. Producción en masa posible. Baja demanda de marial

### II.4.5.5.6 PLANTA EUROPEA

Las plantas europeas consisten de muchas etapas similares a las de otros tipos de plantas con la fundamental característica de contar con un alto grado incidencia tecnológica. Las plantas europeas suelen estar construidas sobre la tierra, sin embargo, existen caso de instalaciones subterráneas.

Las Figuras II.43 a II.45 son tres esquemas de construcción más comunes para las plantas de biogás europeas.

Figura II.43: Reactor de concreto con dos cámaras: Una con calefacción y otra sin ella a manera de almacén (TBW, 2001)

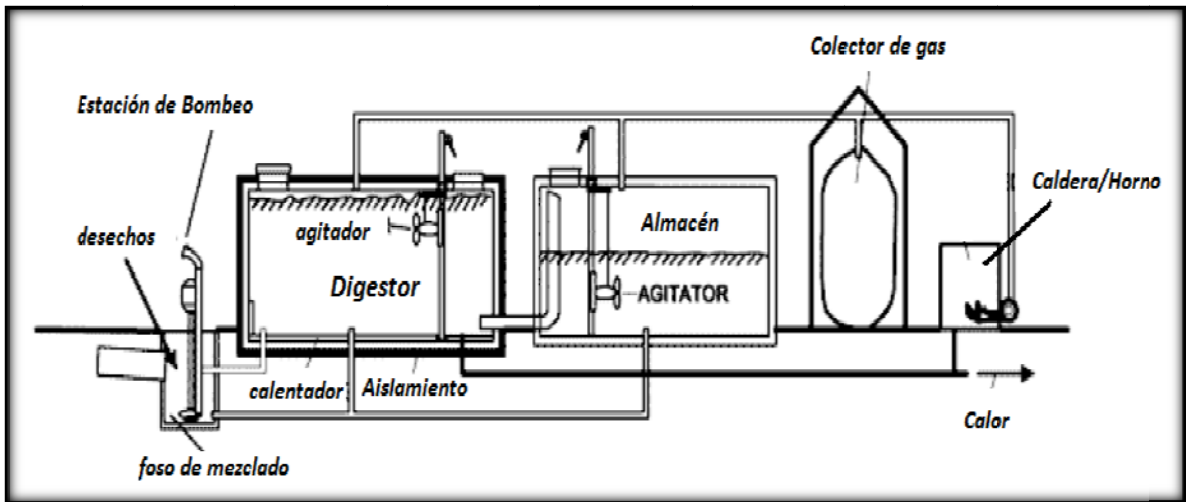


Figura II.44: Reactor de concreto con un almacenador plástico de gas integrado (TBW, 2001)

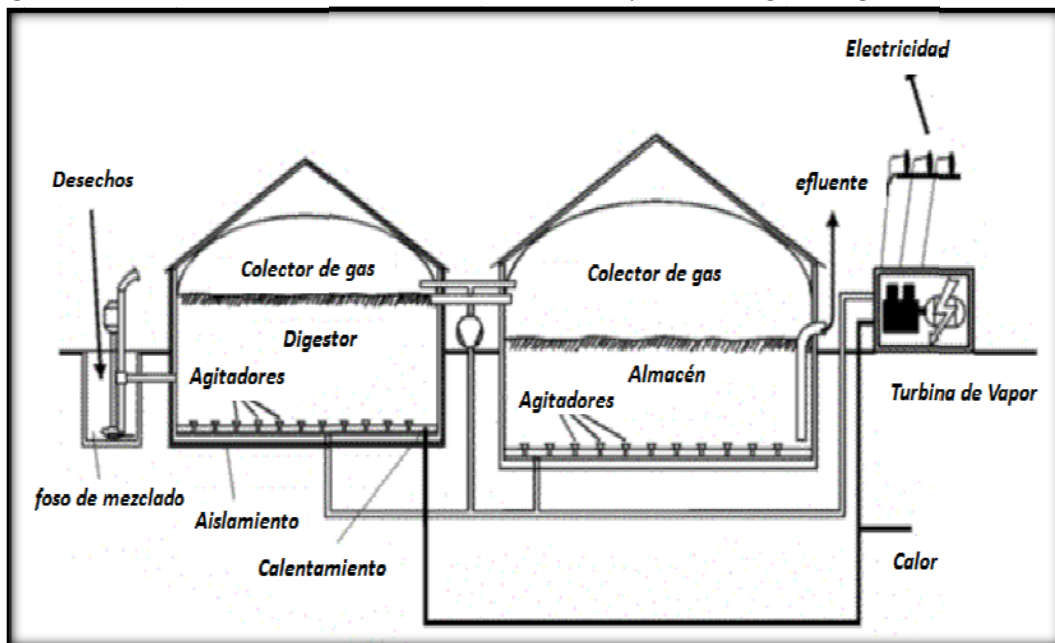
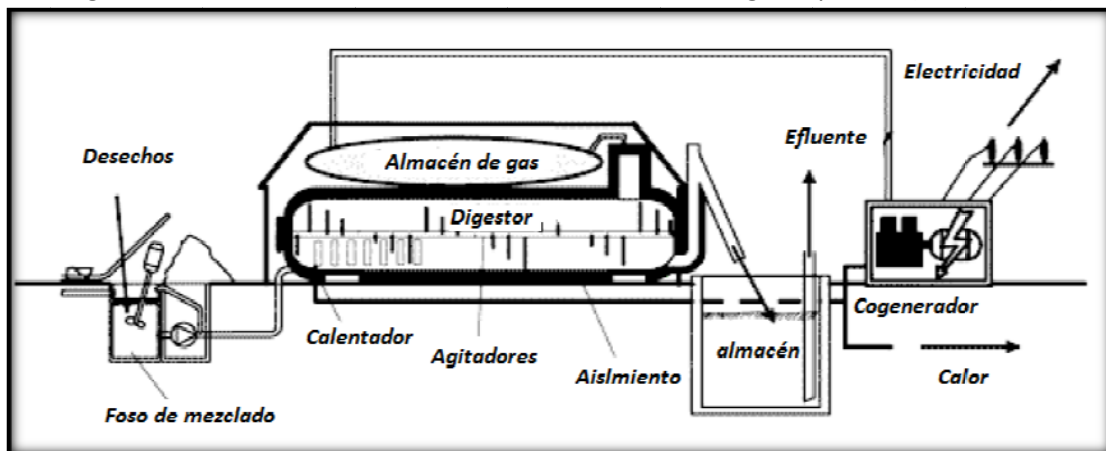




Figura II.45: Reactor de reactor de acero con almacén de gas separado (TBW, 2001)



**El foso de mezclado:** Varía en tamaño y forma según el sustrato a emplear. Está equipado con hélices para mezclar y en algunas ocasiones cortar el sustrato y muy comúnmente también una bomba para transportar el sustrato hasta el reactor. En ciertos casos suele estar equipado con sistema de pre-calentado a fin de evitar choques térmicos dentro del reactor.

**El reactor:** Suele estar construido de concreto o acero de alta calidad. A fin de facilitar el flujo del sustrato, los reactores suelen tener una forma alargada. Los grandes reactores son en su mayoría agitados mediante palas, rotores o reinyecciones de biogás. Los co-reactores tienen dos o más reactores interconectados sin perder individualidad. El almacén de gas puede estar integrado en el reactor a manera de globo o totalmente separado de éste, casos en los que el reactor es llenado en su totalidad.

Las plantas europeas suelen contar con un almacén de desechos para ser utilizados en el invierno. Normalmente los desechos en el almacén no son calentados ni mezclados hasta no se empleados como fertilizante en los campos (TBW, 2001).

**Elemento de aprovechamiento de gas:** Es en el 95% una unidad de termo-potencia capaz de suministrar energía eléctrica a toda una granja, electricidad y calefacción para la casa, invernaderos y otros usos. La unidad de termo-potencia presenta la cualidad de poder ser empleada con cualquier grado de mezcla entre combustibles fósiles y biogás. Lo cual implica que puede funcionar en tiempos de escasos de biogás o de sobre demanda energética (ej. inviernos extremos).

#### II.4.5.6 TUBERÍAS DE GAS, VÁLVULAS Y ACCESORIOS

Estudios de Sasse y col. (1991) demuestran que al menos 60% de las plantas de biogás no funcionales son atribuibles a defectos en las tuberías de gas. Es por esto que se debe tener extremo cuidado en el momento de su instalación. Por estandarización es recomendable seleccionar tuberías, válvulas y accesorios de un sólo tamaño.

Los requerimientos para las tuberías, válvulas y accesorios de biogás suelen ser casi idénticos a aquellos de cualquier otro tipo de gas. Sin embargo, el biogás presenta saturaciones del 100% de humedad y contienen sulfuro de hidrógeno. Por lo tanto no debe usarse ningún material que contenga materiales ferrosos, ya que estos serán destruidos por la corrosión en poco tiempo. El acero galvanizado estándar es ideal para el entubado del biogás. Igualmente existe la adecuada y barata opción de tuberías hechas de PVC o PE, así como el uso de tuberías flexibles resistentes a los rayos UV.

Se suele preferir las tuberías de acero galvanizado debido a que existen aditamentos y válvulas de todos los tamaños conocidos para éstas. Las medidas de ½" y ¾" suelen preferirse para plantas de tamaño pequeño a mediano y con tuberías de longitud no mayor a los 30m.

En cuestión de entubado de gas la elección del diámetro de tubería depende de la velocidad de flujo de gas deseada y la distancia de separación entre el reactor y el lugar de aprovechamiento del gas. Entre mayor sea la distancia y la velocidad de flujo, mayor será la pérdida de presión por fricción. Los dobleces y accesorios del conducto incrementan aún más la pérdida de presión. La Tabla 30 presenta los diámetros recomendados para ciertas distancias a fin de mantener las pérdidas de presión por debajo de 5 mBar.

Debe recordarse que las tuberías de PVC son susceptibles a los rayos UV y comparativamente frágiles, lo cual hace recomendable instalaciones subterráneas de las mismas. Tales instalaciones deben estar al menos 25cm bajo tierra (Ringkamp, 1989).

Tabla 30: Diámetros de tubería recomendados para algunas distancias para mantener las pérdidas de presión menores a 5 mBar (ISATb, 2009)

Longitud m	Acero galvanizado			Tubo de PVC		
	20	60	100	20	60	100
Velocidad de flujo m <sup>3</sup> /h						
0.1	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.2	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.3	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.4	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.5	½"	½"	¾"	½"	½"	½"
1.0	¾"	¾"	¾"	½"	¾"	¾"
1.5	¾"	¾"	1"	½"	¾"	¾"
2.0	¾"	1"	1"	¾"	¾"	1"

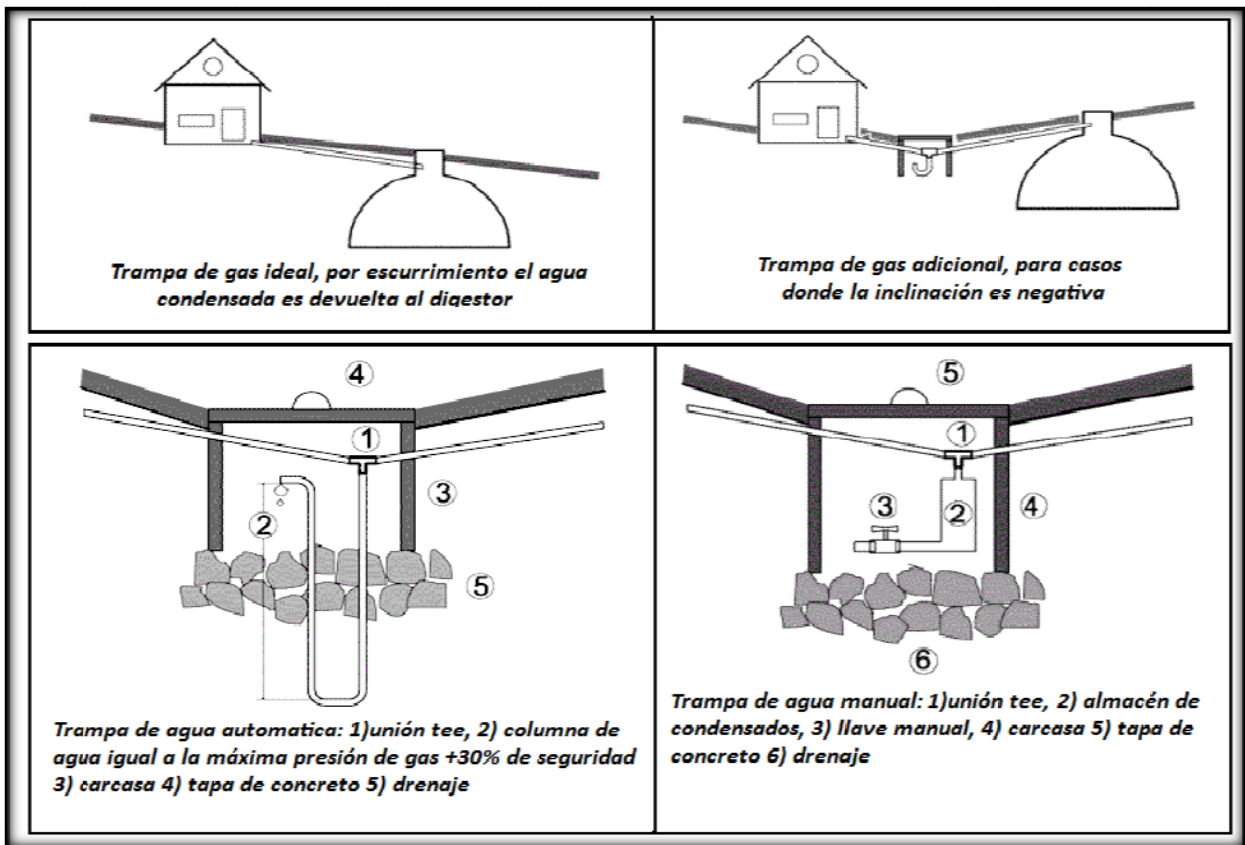
## VÁLVULAS

Hasta donde sea posible lo más recomendable es emplear válvulas de bola, preferentemente de bolo cromada. Las válvulas de compuerta empleadas en las tuberías de agua deben ser evitadas a todo costo.

## TRAMPA DE AGUA

Debido a la saturación por vapor de agua del biogás y a los cambios de temperatura, el efecto de condensación de agua en las tuberías de gas es inevitable. Siempre debe buscarse la manera de evitar bloqueos por agua en las tuberías agregando trampas de agua que bien pueden ser manuales o automáticas. La trampa de agua automática ideal consiste en mantener una inclinación en la tubería a fin de que toda el agua condensada regrese por escurrimiento al reactor. Cuando la inclinación no es posible se debe escoger entre alguna de las alternativas presentadas en la Figura II.46. Las trampas automáticas presentan la ventaja de ser a prueba de olvido de drenado. Sin embargo, si llegan a quedar totalmente secas pueden ocasionar severas pérdidas de gas. Por su parte las trampas manuales pueden llegar a desbordar debido a olvido de drenado ocasionando bloqueos en el flujo de gas.

Figura II.46: Tipos de trampas de agua (TBW, 2001)



### II.4.5. 7 SISTEMAS DE AGITACIÓN Y CALENTAMIENTO

#### SISTEMA DE AGITACIÓN

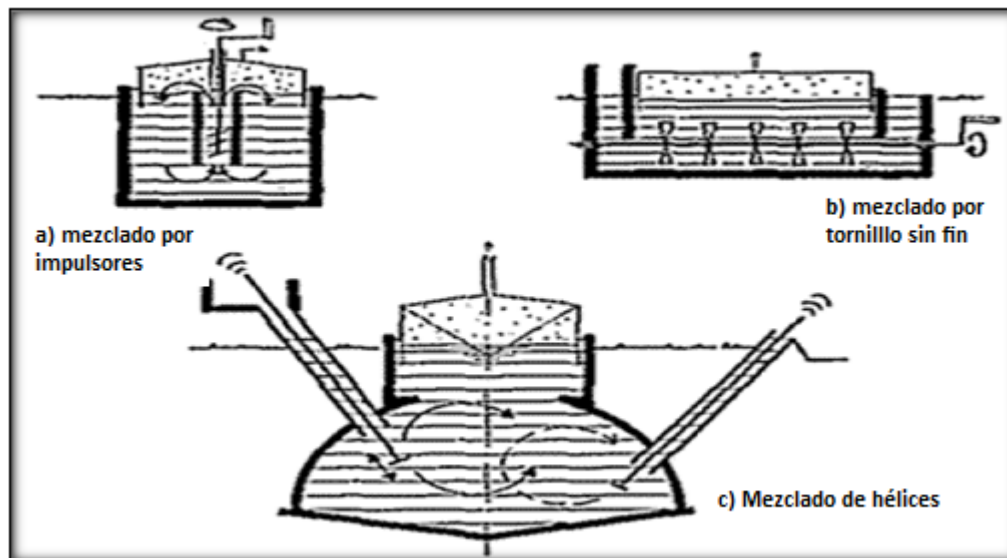
Pese a que como se ha mencionado, la agitación continua del reactor reduce considerablemente los tiempos de residencia hidráulicos. Si la agitación es demasiado rápida, las bacterias no tienen “tiempo de comer” ocasionando decrementos en la producción de gas. Idealmente se

recomiendan agitaciones vigorosas cada cuatro horas a fin de realizar un mezclado óptimo y destruir las membranas de escoria.

Existen tres tipos principales de mezclado (Figura II.47) cada uno recomendable para distintos tipos de planta.

- a) **El mezclado por impulsores:** Para plantas de aguas de drenaje
- b) **El mezclado de tornillo sin fin:** Para plantas de gran escala en las cuales se busca evitar el mezclado de fases de degradación
- c) **El mezclado de hélices o varas:** Suficientemente bueno para plantas de escala hogar

Figura II.47: Tipos de agitación de reactores (Oekotop, 2009)



### SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Como se mencionó anteriormente, la temperatura es uno de los agentes principales que influyen en el proceso de metanización. Si se aumenta la temperatura del sustrato antes de su entrada o durante su estancia en el reactor la eficiencia de este se verá aumentada. Si bien es cierto que en plantas de pequeña escala la implementación de este tipo de sistema adicionado suele resultar difícil debido a parámetros económicos, también es cierto que en algunas ocasiones el incremento en la inversión inicial es redituable.

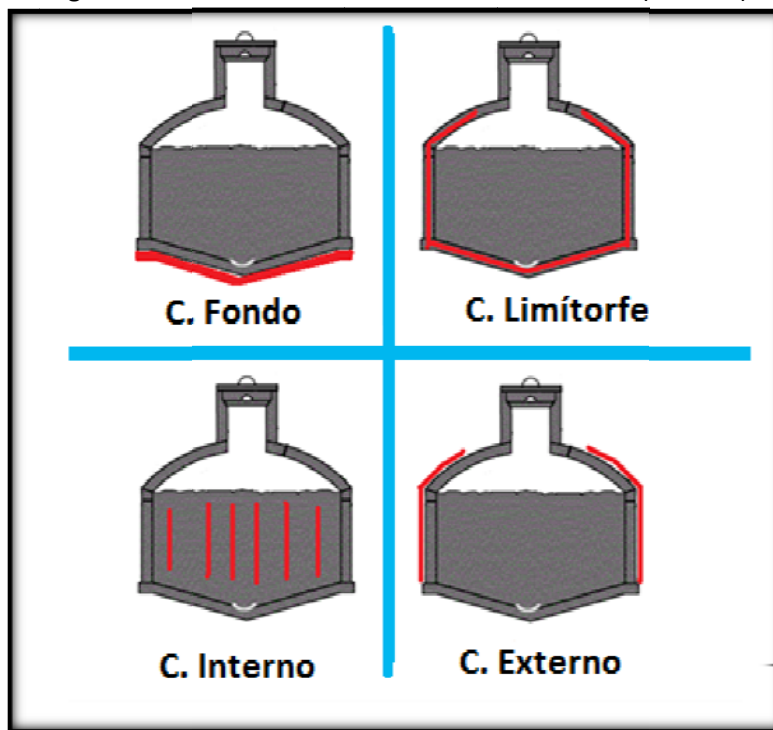
Existen principalmente dos formas de suministrar energía en forma de calor al sistema de degradación: a) Calentamiento directo y b) Calentamiento indirecto (ISATb, 2009)

- a) **El calentamiento directo:** Consiste en introducir agua o vapor de agua en el reactor. Presenta la gran desventaja de requerir un elaborado sistema de bombeo y destilación además de ocasionar sobrecalentamiento en ciertas zonas de reacción. Por otra la inyección de agua caliente ocasiona una mayor dilución del sustrato lo que incrementa el volumen del reactor

b) **El calentamiento indirecto:** Consiste en intercambiadores de calor, mayoritariamente a base de agua, capaces de suministrar energía térmica sin entrar en contacto directo con el sustrato. Según su colocación los intercambiadores de calor pueden ser (Figura II.47):

- i) **Calentamiento de fondo:** Actualmente en desuso debido a que la acumulación de sedimentos disminuía su eficiencia.
- ii) **Internos:** Excelentes, mientras sean capaces de soportar el estrés mecánico provocado por el sistema de mezclado
- iii) **Limítrofes:** Colocados sobre o dentro de las paredes del reactor, suelen ser inferiores a los internos debido a la pérdida de calor hacia el ambiente, sin embargo, presentan gran practicidad al no representar obstrucciones para el flujo del sustrato
- iv) **Externos:** Presentan la ventaja de facilidad en mantenimiento y limpieza.

Figura II.48: Sistemas de calentamiento indirectos (autores)



#### II.4.5.8 SISTEMA DE BOMBEO

Las bombas son una parte importante y en algunas ocasiones esencial de la mayoría de las plantas de biogás. Las bombas son necesarias para superar obstáculos de desnivel entre la planta el tanque de colecta de sustrato y el reactor, para apresurar o disminuir el ritmo de flujo en las tuberías del sustrato y en algunas ocasiones para mezclarlo dentro del reactor.

Las bombas son costosas, requieren una fuente de poder, y están sujetas a desgaste y daños por uso. Es por esto que siempre debe tratar de evitar su uso empleando el gradiente gravitacional y la dilución de sustratos. Existen dos posibles instalaciones de bombas (ISAtb, 2001):

- a) **Secas:** Donde la bomba es instalada dentro del sustrato en conjunción con un motor eléctrico. El motor eléctrico es sellado dentro de un carcasa a prueba de agua.
- b) **Húmedas:** Se conecta la bomba directamente en la tubería del sustrato donde entra en contacto con este último, el cual es acelerado al pasar a través de ésta.

### BOMBAS ROTATORIAS

Las bombas rotatorias operan con un rotor presionando el líquido contra las paredes externas de la sala del rotor. Debido a la geometría de la cámara el líquido es empujado hacia la salida de la tubería.

Las bombas rotatorias son bastantes comunes para sustratos a base de excrementos (ISAT, 2009). Son simples y robustas, empleadas en sustratos con contenido de sólidos menor a 8%. La cantidad de materia que pueden transportar varía entre los 2-6 m<sup>3</sup>/min, a potencias entre los 3 y 15kW. Las bombas rotatorias no suelen ser empleables como fuente de succión. Existe un tipo especial de bomba rotatoria, bomba cortadora, capaz de proporcionar la cualidad de trituración mediante sus aspas.

Tablall.31: Comparativa entre los tipos de bomba (ISATb,2009)

Tipo de bomba	Rotatorias	Cortadora	Espiral excéntrica	Pistón rotatorio
% de sólidos	<8%	<8%	<15%	<15%
C. de Energía	3-15kW	3-15kW	2-22kW	3-20Kw
Materia desplazada	2-6m <sup>3</sup> /min	2-6m <sup>3</sup> /min	0.3-3.5m <sup>3</sup> /min	0.5-4m <sup>3</sup> /min
Presión	0.8-3.5bar	0.8-3.5bar	<25bar	<10bar
Estructura del sustrato	Fibras medianas	Fibras largas	Fibras pequeñas	Fibras medianas
Tamaño máximo de elementos obstructivos	Aprox. 5cm	Dependiente del aspa	Aprox. 4cm	Aprox. 6cm
Succión	No	no	Si	Si
Idoneidad	Largas cantidades desplazadas, simple, robusta	Ideal para sustratos fibrosos	Ideal para altas presiones, pero susceptible a obstrucción	Presiones muy altas, mayor desgaste
Comparación de precios	Más barata que otras	Dependiente de aspas	Similar a la de pistón rotatorio	Similar a la de espiral excéntrica

### BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Las bombas de desplazamiento positivo son normalmente usadas para sustratos de alto contenido de sólidos. Son capaces de empujar y succionar al mismo tiempo. Su potencial de material bombeado es menos dependiente de la presión que el de las bombas rotatorias.

Presentan la característica de poder cambiar la dirección de flujo mediante un cambio en el sentido de su rotación.

Las bombas más empleadas en sistemas de biogás, bomba de espiral excéntrica y de bombeo de pistón rotario, son del tipo desplazamiento positivo. Las bombas de pistón rotatorio suelen ser superiores a la de espiral excéntrica debido a su mayor tolerancia ante elementos extraños y materiales fibrosos. La Tabla 31 muestra una comparativa entre los tipos de bombas antes mencionados.

#### **II.4.5.9 SUBPRODUCTOS (LODO DIGERIDO)**

Se define como lodo digerido, al material extraído de un reactor anaerobio cuando se ha llegado al final del tiempo de residencia hidráulica deseado. El lodo digerido suele clasificarse en lodo pasivo y lodo activo. El lodo pasivo es aquel en que los microorganismos han muerto debido a posteriores procesos térmicos o químicos. El lodo activo o activado es aquel en que los organismos originarios del substrato y el inóculo aún permanecen con vida. Los fertilizantes son un elemento de alta importancia, sobre todo en países en desarrollo donde los granjeros no cuentan con la economía necesaria para comprarlos.

Una de las principales cualidades de los sistemas de producción de biogás es el hecho de que el substrato que no fue transformado en biogás durante su estancia dentro del reactor conserva y en la mayoría de los casos enriquece sus propiedades fertilizantes. Pese a que hoy día existen substitutos inorgánicos para el contenido de nitrógeno, potasio y fósforo de los fertilizantes orgánicos, aún no existen substitutos para los contenidos de proteína, lignina, celulosa, etc. Todos ellos contribuyen a incrementar la higroscopicidad (capacidad de la materia para absorber humedad atmosférica) y permeabilidad del suelo lo cual previene la erosión e incrementa las condiciones benéficas para la agricultura (CWMI, 2009).

#### **BENEFICIOS APORTADOS POR LOS BIO-FERTILIZANTES**

Debido a la descomposición y disociación de materiales orgánicos, que tiene lugar dentro de un reactor anaerobio, el lodo de desecho constituye una masa de materiales listos para ser empleados por las plantas, al mismo tiempo que promueve la regeneración de microorganismos del suelo. Son tres los beneficios principales del empleo del lodo digerido como bio-fertilizante: a) Reducción de la erosión del suelo, b) Reducción de la desnitrificación del suelo, c) Incremento en la productividad de cultivos (ISATb, 2009).

##### **a) Reducción de la Erosión**

Gracias a su gran contenido de ácidos húmicos los materiales de desecho del biorreactor contribuyen a una rápida humificación del suelo lo cual disminuye la erosión del suelo. Su alto contenido de bloques de construcción orgánica (lignina y celulosa principalmente) incrementan en gran medida la formación de humus estables. El humus estable producido gracias al lodo digerido alcanza el doble de aquel que puede ser producido mediante la descomposición aerobia de excremento bovino. Estudios de diversas universidades de la India (ICAR, 2008) muestran que

incluso las lombrices de tierra son más activas cuando el suelo es fertilizado con este tipo de desecho.

**b) Reducción en la desnitrificación del suelo**

El alto contenido de amonio del bio-fertilizante resultado del proceso de degradación anaerobia ayuda a reducir el ritmo de desnitrificación del suelo más rápidamente que otros fertilizantes de alto contenido de nitratos y nitritos solubles en agua (composta, excrementos). Es un hecho que el amonio es un nutriente más fácilmente empleable por las plantas que los nitritos y nitratos. La eficiencia de nitrógeno del bio-fertilizante es comparable a aquella de fertilizantes químicos de alta calidad. Con el beneficio añadido de la contribución de biomasa, lo cual incrementa la porosidad y estabilidad del suelo, dos aspectos muy importantes para las evaluaciones de calidad del mismo.

**c) Incremento en la productividad de cultivos**

Es de conocimiento general el hecho del incremento de productividad en cultivos que han sido fertilizados con el bio-fertilizante proveniente de plantas de biogás. La mayoría de los vegetales tales como las papas, el ajo, tomates, zanahorias, calabazas, etc. Y muchos tipos de frutas, cañas de azúcar y arroz son favorablemente afectados por el uso del bio-fertilizante. Debido a que el potencial del bio-fertilizante no solo depende del tipo específico de planta, sino también del clima y tipo de suelo, es imposible ofrecer una comparativa económica entre los fertilizantes químicos y los biofertilizantes.

#### **II.4.6 SISTEMAS COMERCIALES DE BIOGÁS CON APROVECHAMIENTO DE COMPOSTA ADJUNTO**

Pese a que diversos estudios sobre la recuperación de metano de RSU han sido llevados a cabo en Estados Unidos, Europa del oeste ha continuado como el líder en nuevas soluciones para el manejo de RSU. Tanto Alemania como Francia tienen varias plantas de aprovechamiento de RSU y bio-fertilizantes a gran escala. Hoy existen cerca de 124 plantas anaerobias a gran escala en Europa construidas por cerca de 27 proveedores (De Baere, 2005). Tan solo tres han construido 15 plantas basadas en un mismo concepto: DrAnCo, Valorga y Kompogas.

Dos sistemas comerciales, DrAnCo y Valorga, han estado en operación a gran escala en Europa desde finales de 1980s. El sistema Kompogas ha sido aplicado desde 1990. Estos tres sistemas emplean tecnologías de degradación alta en sólidos operando a concentraciones de ST entre 20-35%, lo cual permite producciones de metano por encima de los sistemas bajo en sólidos de tratamiento de aguas residuales y materiales orgánicos en estado natural. Estos tres sistemas son los únicos sobre los cuales se tiene datos y seguimiento de más de 15 años.

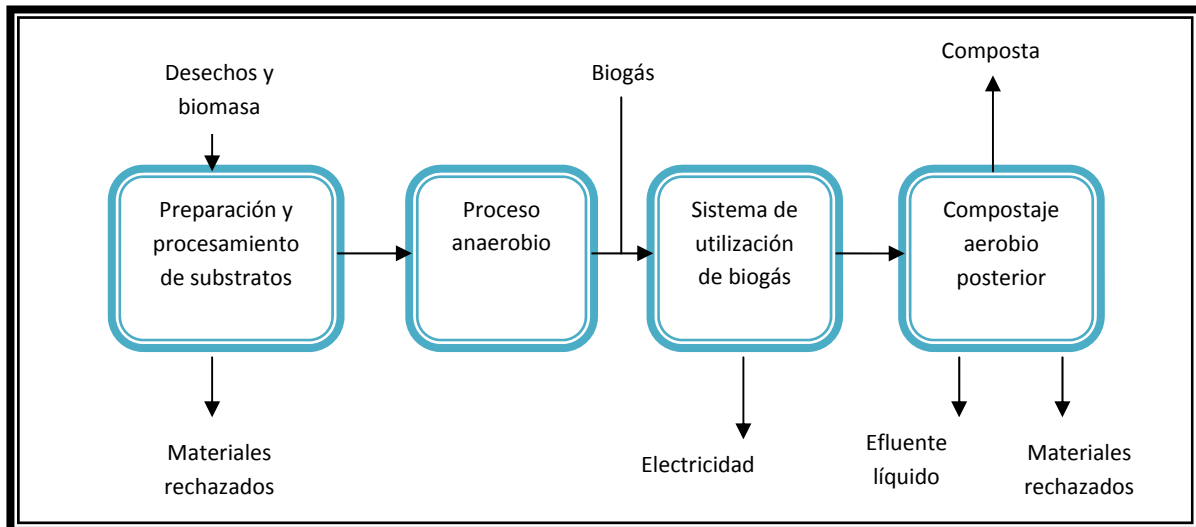
##### **II.4.6.1 SISTEMA DRANCO**

El sistema DrAnCo (**D**ry **A**naerobic **C**omposting por sus siglas en inglés) o sistema de compostaje anaerobio (Figura II.49) fue desarrollado en Ghent, Bélgica para el tratamiento alto en sólidos de combustible derivado de desechos (RDF por sus siglas en inglés). El RDF se prepara mediante el mezclado de todo tipo de desechos urbanos. El Sistema DrAnCo es capaz de remover la mayoría



de los metales, vidrios, plásticos, piedras, papel reciclable y otros materiales inorgánicos(De Bare y col., 1985).

Figura II.49: Diagrama de flujo esquemático del proceso DrAnCo (De Bare y col., 1985)



El tratamiento anaerobio tiene lugar en un fermentador vertical (Figura II.37) por un periodo de 12 a 18 días, seguido por fermentado posterior con tiempos de retención de 2 a 3 días. Por lo tanto, el tiempo de tratamiento promedio está entre los 14 a 20 días. El influente es mezclado con el efluente y el sobrenadante reciclado del mismo reactor, y posteriormente bombeado en la parte superior del reactor con concentraciones de sólidos de 35-40%. Los sólidos se mueven hacia abajo en forma de reactor de flujo concatenado, sin emplear mezclado mecánico. El reactor opera en modo mesofílico (35°C) con una reducción de sólidos volátiles cercana a 55%. Hasta la fecha, existen 9 plantas operando en Europa cada una con capacidades entre los 10,000 y 50,000 toneladas métricas de RSU al año.

Los sólidos son secados desde un 30% hasta 70% usando un filtro de prensa o secados aún más para su venta como fertilizante. Las principales ventajas del sistema DrAnCo son:

- No se requiere agua o excrementos líquidos adicionales
- Alto ritmo de carga y producción de biogás
- Reactores de poco volumen
- Ausencia de incrustación y sedimentación
- Ausencia de formación de espumas
- Destrucción de organismos patógenos
- Ausencia de sistemas de mezclado mecánico

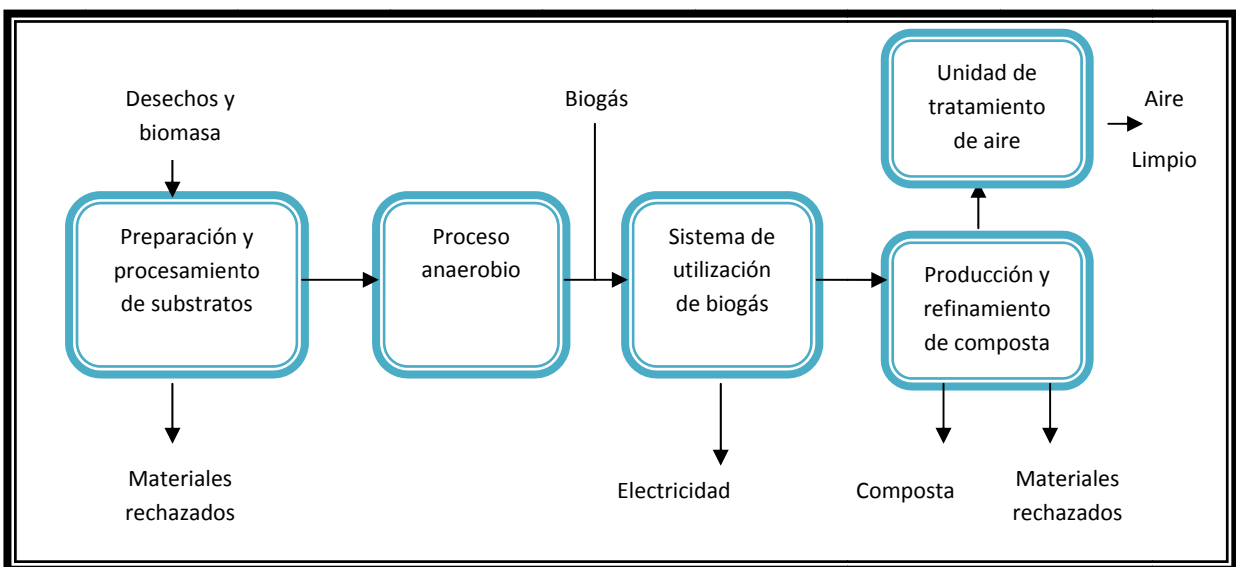
#### II.4.6.2 SISTEMA VALORGA

La compañía francesa Valorga, fue la primera en usar la tecnología anaerobia para el tratamiento de RSU (Valorga, 1985). La totalidad del sistema Valorga (Figura II.50) puede dividirse en cinco subunidades: a) Preparación, b) Metanización, c) Tratamiento de biogás, d) Combustión de los

desechos combustibles y e) Refinamiento. El reactor Valorga se distingue por su diseño único y opera con concentraciones de sólidos de 35% a temperaturas mesofílicas (35°C) con tiempos de retención de 15 días. La capacidad típica de un reactor Valorga es de 500m<sup>3</sup>, y puede tratar entre 20 y 28 toneladas de RDF al día. La remoción de SV está cerca del 50% con producciones de gas cercanas a los 140m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de sustrato.

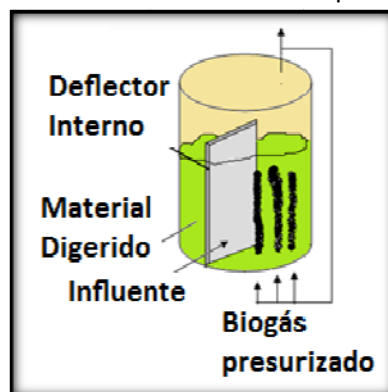
El sistema Valorga cuenta con dos características únicas: 1) Su forma de alimentación y 2) Su mecanismo de mezclado (Figura II.51). Una bomba de pistón es empleada para introducir el sustrato al sistema, proveyendo al reactor con alimentación continua. Un sistema de control de aislamiento por válvulas inyecta suficiente presión para transferir el sustrato al interior del reactor; al mismo tiempo una cantidad igual es extraída del reactor. El mezclado tiene lugar gracias a la inyección programada de biogás presurizado en diferentes secciones del sistema.

Figura II.50: Diagrama de flujo esquemático del proceso Valorga (Valorga, 1985)



La planta más antigua con el sistema Valorga ha estado operando en Francia desde 1987. Tres plantas con capacidades por encima de 200,000 toneladas métricas han sido implementadas en ciudades españolas desde 1999.

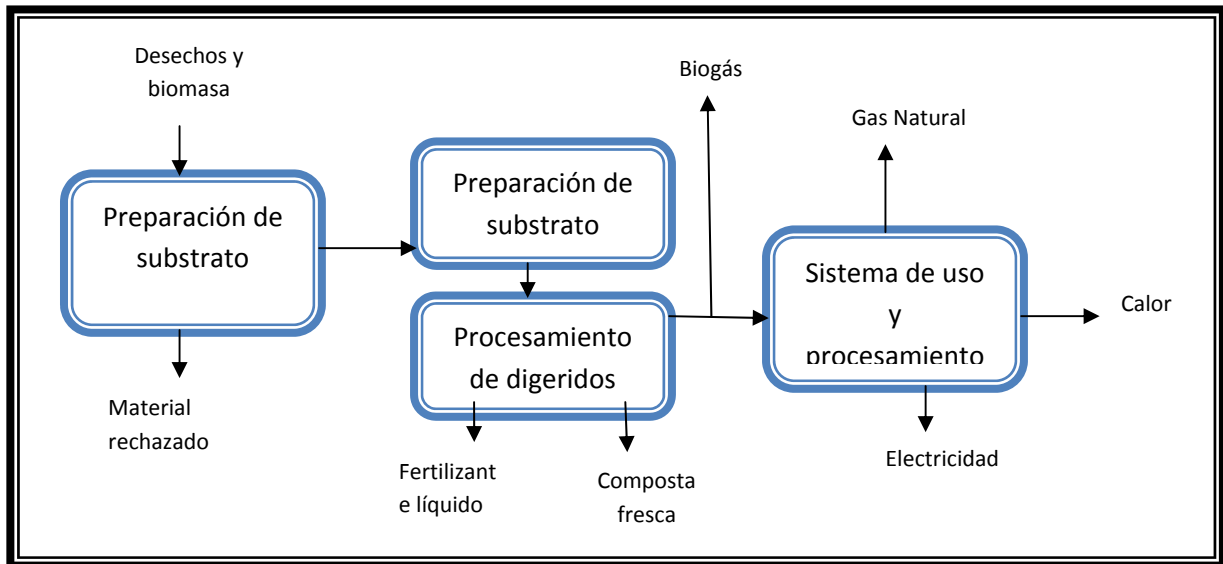
Figura II.51: Reactor anaerobio tipo Valorga



### II.4.6.3 SISTEMA KOMPOGAS

La tecnología Kompogas fue desarrollada en Suiza y está generalmente compuesta de cuatro etapas principales (Figura II.52): 1) Preparación de sustratos, 2) Proceso de degradación, 3) procesamiento y utilización de biogás, 4) Procesamiento de digeridos y producción de composta. La mayoría de las plantas Kompogas funcionan con desechos biodegradables de cocina y desechos industriales combinados con desperdicios de áreas verdes. En la preparación del sustrato éste se mezcla con una porción de los lodos digeridos. La característica más sobresaliente del sistema Kompogas es el hecho que uno de sus productos finales es un sustituto para el gas natural.

Figura II.52: Sistema Kompogas (Goswami y Kreith, 2008)



El sistema kompogas consiste de un reactor horizontal, cilíndrico de flujo concatenado que opera en rango termofílico con un contenido de sólidos cercano al 20%. A pesar de algunas excepciones todos los reactores Kompogas están hechos de acero.

En el presente existen 22 plantas Kompogas a gran escala instaladas en Europa y otros. Nueve de ellas en Suiza y las trece restantes en Japón, Alemania, Dinamarca y España.

### II.4.7 SUBSTRATOS A DIGERIR

El sustrato 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 sustrato puede y debería ser calculada mediante el empleo de al menos dos métodos paralelos:

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

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.

Otro de los aspectos a considerar es el contenido de humedad y sólidos volátiles del substrato a tratar. De la cantidad de humedad presente en el substrato dependerá si es necesario o no agregar agua para su disolución, lo cual tendrá repercusiones en el tamaño del reactor. La importancia de conocer su contenido de sólidos volátiles radica en que es un porcentaje de estos el que será convertido en biogás.

Si bien lo mejor es realizar los estudios de potencial de producción de biogás (reactor a una carga, estudio de lignina y de quimostato) 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 II.32 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 II.33 por su parte muestra la composición de la “basura estándar” producida en el D.F.

Tabla II.32: Cantidad y composición anual de excremento producido por diversos animales de granja (Gtz, 2001)

	Peso total	Sólidos Totales		Sólidos Volátiles	
	kg/año	kg/año	%	kg/año	%
<b>Vaca</b>	16,100	1850	11.6	1400	8.7
<b>Cerdo</b>	13,500	1130	8.4	900	6.7
<b>Pollo (excreta fresca)</b>	18,250	4020	22.0	3170	17.4
<b>Pollo (excreta seca)</b>	4,230	3390	80	2560	60

Tablall.33: Composición de los RSU en el D.F. (CINAM, 2007)

Componentes de los RSU	% RSU	% Humedad	% Sólidos	%Ceniza
<b>Alimentos y otros residuos orgánicos</b>	41.84	66	34	13.3
<b>Plásticos</b>	10.02	29	71	7.8
<b>Textiles</b>	2.58	33	67	4
<b>Papel y Cartón</b>	25.51	47	53	5.6
<b>Piel y hule</b>	0.11	11	89	25.8
<b>Madera</b>	1.27	35	65	5.2
<b>Metales</b>	4.29	6	94	94
<b>Vidrio</b>	7.23	3	97	97
<b>Inertes (mat. construcción, similares y otros)</b>	5.44	10	90	90
<b>Finos</b>	1.71	32	68	45.6
<b>Promedios</b>	100	46.7	53.4	10.2

#### II.4.8 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

El tamaño de un reactor 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 en 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):

$$VD = (Sd)(TR)m^3 = (m^3/dia)(días) \quad (II-5)$$

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 1 a 2 K 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 considerado debe ser de al menos 40 días. La experiencia práctica muestra tiempos de retención de 60 a 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 gas, hasta en un 40% (ISAT, Gtz). 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 %:

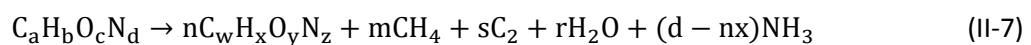
$$S_d = \text{biomasa (B)} + \text{agua(H}_2\text{O)} \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad (\text{II-6})$$

En la mayoría de los casos suele emplearse relaciones biomasa-agua (B: H<sub>2</sub>O) 1:3 ó 1:2.

#### II.4.9 ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

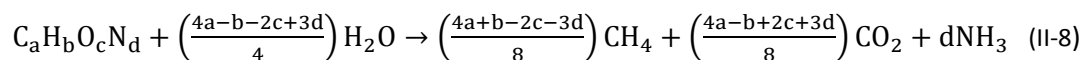
La degradación anaerobia cumple con la ecuación de ceder de energía (ecuación II-1) básica para sustratos a base de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, alcoholes, ácidos orgánicos, metilaminas y otros compuestos derivados de proteínas.

Para propósitos prácticos, la conversión de la fracción orgánica de los RSU (FO/RSU) en metano, dióxido de carbono y amoníaco puede representarse mediante (Tchobangolus y col., 1993):



Donde:  $s = a - nw - m$ ;  $r = c - ny - 2s$

Los términos  $C_a H_b O_c N_d$  y  $C_w H_x O_y N_z$  se usan para representar en base molar, la composición del material orgánico presente antes y después de la reacción, respectivamente. Si se asume que la FO/RSU es estabilizada completamente, la reacción se define como:



La ecuación II-8 puede emplearse entonces para calcular el volumen teórico de biogás a obtener y la composición del mismo.

El primer paso a seguir es el cálculo del contenido de sólidos volátiles biodegradables (SVB) en la FO/RSU a fin de conocer la materia degradable en el reactor:

$$SVB[\text{up}] = \left( \frac{FO}{RSU} \right) (\text{peso RSU}) (1 - FH_2O) (SV) (FSVB) \quad (\text{II-9})$$

Donde:  $FH_2O$  = humedad;  $FSVB$  = fracción de sólidos volátiles biodegradables;  $FSV$  = fracción de sólidos volátiles;  $up$  = unidades de peso.

Posteriormente se debe considerar que tan solo cerca del 90% de SVB podrá ser convertido en gas, debido a la composición del material de las paredes celulares.

$$SVB_g = (SVB)(0.90)$$

Una vez realizado lo anterior debe emplearse la ecuación II-7 a fin de tener la capacidad de calcular el peso molecular de cada uno de los componentes de la misma ecuación.

Para determinar el peso del metano y dióxido de carbono derivado del paso anterior, se tienen las ecuaciones II-10 y II-11 respectivamente.

$$\text{Peso del metano} = (SVB_g) \frac{\text{Peso molecular } CH_4}{\text{Peso molecular de la MO original}} \quad (\text{II-10})$$

$$\text{Peso dióxido de carbono} = (\text{SVB}_g) \frac{\text{peso molecular CO}_2}{\text{peso molecular de la MO original}} \quad (\text{II-11})$$

El siguiente paso es convertir el peso del metano y dióxido de carbono a volumen mediante el empleo de sus densidades (0.0717 y 0.1979 g/L) en las ecuaciones II-12 y II-13.

$$\text{Volumen de metano} = \frac{\text{peso del metano}}{\text{densidad del metano}} \quad (\text{II-12})$$

$$\text{Volumen de dióxido de carbono} = \frac{\text{peso del dióxido de carbono}}{\text{densidad del dióxido de carbono}} \quad (\text{II-13})$$

Una vez obtenido el volumen de metano y dióxido de carbono, se debe obtener el porcentaje de cada uno en la mezcla:

$$\% \text{ metano} = \frac{\text{volumen de metano}}{(\text{volumen de metano} + \text{volumen de dióxido de carbono})} \quad (\text{II-14})$$

$$\% \text{ dióxido de carbono} = \frac{\text{volumen de dióxido de carbono}}{(\text{volumen de dióxido de carbono} + \text{volumen de metano})} \quad (\text{II-15})$$

El último paso del procedimiento es determinar la cantidad de gas generada por unidad de masa seca de los SVB transformables a gas, es decir, biogás/unidad de peso de SVB mediante la ecuación II-16:

$$\frac{\text{biogás}}{\text{peso de SVB}} = \frac{(\text{volumen de metano} + \text{volumen de dióxido de carbono})}{\text{SVB}} \quad (\text{II-16})$$

Si bien el método anterior es bastante ilustrativo cuando se pretende considerar el potencial de producción de biogás de cierto sustrato, presenta la gran desventaja de necesitar la composición química de los RSU o de la fracción orgánica de los mismos, lo cual representa un enorme reto debido a su naturaleza heterogénea. Diversos estudios han sido realizados sin arrojar resultados contundentes, lo cual ha obligado a emplear aproximaciones siendo la más común, la composición promedio de un material orgánico dada por:  $C_{60}H_{95}O_{38}N$ . Otro de los problemas del método anterior, es el hecho de que solo es capaz de mostrar cuanto gas se puede obtener de una muestra cuando esta haya sido completamente estabilizada, situación que en la práctica suele ser extravagante ya que tal meta implicaría un incremento considerable en el volumen del reactor a fin de que este pueda contener los sustratos durante un mayor periodo de tiempo.

Es por esto que, siempre se recomienda realizar estudios batch (por ser el reactor más básico) pues permiten realizar estimaciones más útiles en la práctica, proporcionando datos de gran importancia en el diseño de una planta de biogás como lo son: El tiempo de residencia hidráulico óptimo, la relación agua-sustrato más adecuada y la producción específica de biogás para el sustrato bajo cierta temperatura de operación.

#### II.4.10 DIMENSIONAMIENTO DEL ALMACÉN DE BIOGÁS

Una de las partes más importantes de una planta de biogás es su almacenamiento de gas. Lo más recomendable es que el almacén de gas esté integrado al reactor. Un almacenador externo suele

resultar costoso debido al empleo una mayor cantidad de materiales y espacio así como de medidas de seguridad más demandantes (ISATb, 2009).

El volumen de almacenamiento de biogás ( $V_{ag}$ ) depende de la relación existente entre el ritmo de producción de biogás y el ritmo de su consumo. El almacén de biogás debe estar diseñado para:

- a) Poseer el volumen ( $V_{ag_1}$ ) necesario para cubrir el tiempo ( $t_{c_{max}}$ ) de consumo pico ( $C_{max}$ ):

$$V_{ag_1} = (t_{c_{max}})(C_{max}) \quad (II-17)$$

Donde:

$V_{ag_1}$  = volumen para satisfacer la demanda pico [ $m^3$ ].

$t_{c_{max}}$  = tiempo de duración de la demanda pico [ $h$ ].

$C_{max}$  = ritmo de consumo máximo [ $\frac{m^3}{h}$ ]

- b) Poseer el volumen necesario ( $V_{ag_2}$ ) para almacenar el biogás producido durante el más largo periodo ( $t_{c_{min}}$ ) de cero consumo a cierto ritmo de su producción ( $P_g$ ):

$$V_{ag_2} = (t_{c_{min}})(P_g) \quad (II-18)$$

Donde:

$V_{ag_2}$  = volumen para el máximo acumulado por falta de consumo [ $m^3$ ].

$t_{c_{min}}$  = tiempo de duración de la demanda mínima [ $h$ ].

$P_g$  = ritmo de producción de gas máximo [ $\frac{m^3}{h}$ ]

El máximo valor de  $V_{ag_x}$  ( $V_{ag_1}$  ó  $V_{ag_2}$ ) determina el tamaño del almacenador. Además se debe agregar un margen de seguridad de 10-20%:

$$V_{ag} = [1.15(\pm 0.5)](V_{ag_x}) \quad (II-19)$$

#### II.4.1.1 PRE-TRATAMIENTO DE BIOGÁS

En algunas ocasiones el biogás debe ser tratado y acondicionado antes de su empleo. Las metas más comunes de estos acondicionamientos son remover del gas en bruto: a) La humedad, b) El sulfuro de hidrógeno o c) El dióxido de carbono.

##### a) Remoción de la humedad:

Se realiza usualmente con el empleo de tuberías subterráneas que favorezcan la condensación, y en algunas ocasiones mediante el zigzagado de las mismas.

##### b) Remoción de sulfuro de hidrógeno

Al combinarse con agua condensada el sulfuro de hidrógeno forma ácidos corrosivos. Ésto ocasiona que el proceso de remoción de sulfuro de hidrógeno sea de vital importancia en aplicaciones que involucren motores o turbinas. El proceso de remoción es necesario cuando la



cantidad de  $H_2S$  supere el 2%, siendo que en la gran mayoría de los casos el contenido de  $H_2S$  no supera el 1% este proceso puede ser minimizado a remociones parciales.

Uno de los métodos más simples y de bajo costo consiste en hacer circular el biogás a través de un recipiente lleno de virutas de algún material ferroso a fin de que funcionen como “esponjas de corrosión”. Por supuesto que siempre se tendrá la opción de emplear únicamente materiales inoxidables, sin embargo el alto costo de los mismos suele resultar prohibitivo.

### c) Remoción de $CO_2$

La remoción de  $CO_2$  suele resultar costosa y complicada. Pese a que sustancias tales como la “leche de cal” y la sosa son capaces de absorber cierta cantidad de  $CO_2$ , su constante empleo ocasiona una gran cantidad de residuos no aprovechables que deben ser cuidadosamente desechados. En plantas de gran escala, la única opción considerable son las membranas de filtrado y aún éstas solo son recomendables cuando se desee ahorrar espacio de almacenamiento en cilindros.

## II.5 GENERACIÓN ELÉCTRICA

### II.5.1 CICLOS TERMODINÁMICOS

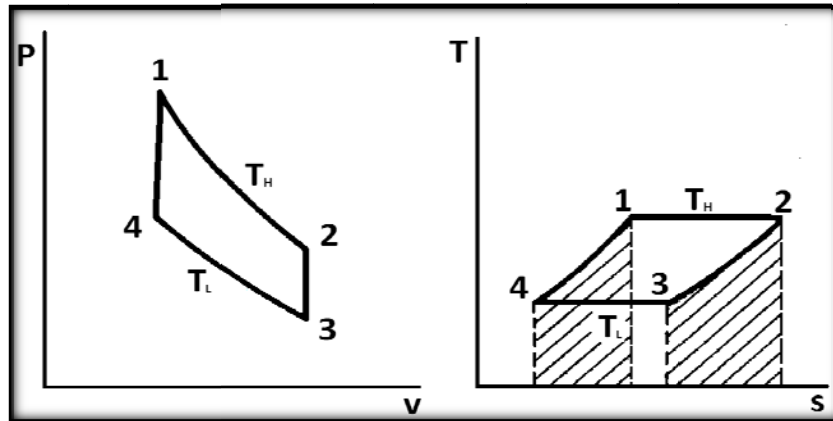
#### II. 5.1.1 CICLO STIRLING

El ciclo propuesto por Robert Stirling (1790-1878), se compone de dos procesos isotérmicos reversibles y dos procesos reversibles a volumen constante. La Figura II.53 representa los diagramas PV y TS del ciclo.

Desde el estado inicial 1, el gas se expande isotérmicamente hasta el estado 2, suministrando el calor reversiblemente de una fuente a temperatura de una fuente caliente  $T_H$ . Del estado 2 al 3 se extrae calor a volumen constante hasta que la temperatura del fluido llegue a una temperatura menor  $T_L$ . Luego se disminuye isotérmicamente el volumen hasta que alcance su valor original, extrayendo reversiblemente el calor que se proporciona a una segunda fuente a  $T_L$ . Finalmente se suministra calor a volumen constante del estado a 4 al estado 1. El ciclo trabajaría entre dos fuentes a temperaturas fijas si las cantidades de los procesos 2-3 y 4-1 se mantuvieran dentro del sistema. El balance de energía al sistema cerrado para estos procesos muestra que las cantidades son de la misma magnitud, lo que está indicado por las áreas sombreadas bajo las curvas de los procesos 4-1 y 2-3 en el diagrama TS. Lo que se necesita es una manera de almacenar el calor suministrado por el proceso 2-3 y luego proporcionar esta misma energía al medio de trabajo durante el proceso 4-1. Esta necesidad de almacenar energía en el sistema requiere el uso de un regenerador. Por lo tanto, el único efecto calorífico externo al sistema durante cada ciclo Stirling es el intercambio de calor entre dos fuentes fijas a temperatura fija. En consecuencia, la eficiencia térmica del ciclo será igual a la del ciclo de Carnot ecuación II.20 (Balzhiser y Samuels, 1977).

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (\text{II-20})$$

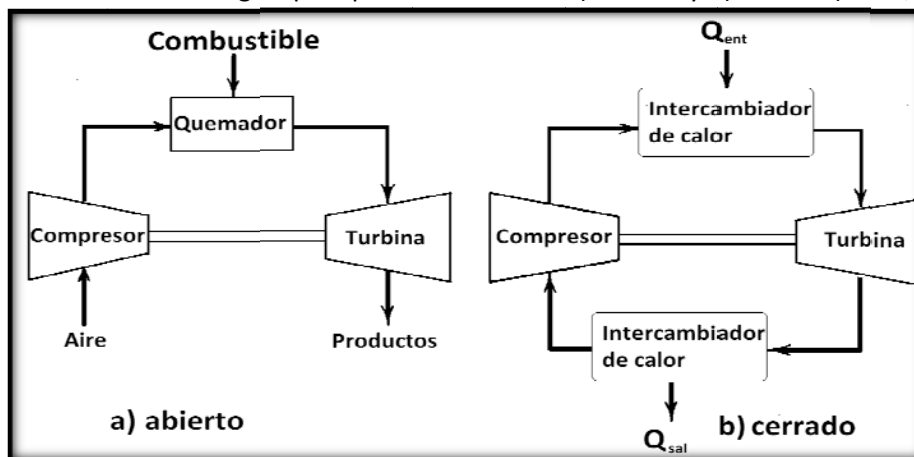
Figura II.53: Diagramas PV y TS del ciclo Stirling (Wark, 1984)



### II.5.1.2 CICLO BRAYTON

En un ciclo simple productor de trabajo de y una turbina de gas se usa distinta maquinaria para los diversos procesos del ciclo. Inicialmente, el aire se comprime adiabáticamente en un compresor rotatorio axial o centrífugo. Al final de este proceso, el aire entra a una cámara de combustión en la que el combustible se inyecta y se quema a presión constante. Los productos de la combustión se expanden después al pasar por una turbina, hasta que llegan a la presión de los alrededores. Un ciclo compuesto de estos tres pasos recibe el nombre de ciclo abierto. Los ciclos de las turbinas de gas reales son ciclos abiertos, porque continuamente se debe alimentar aire nuevo al compresor. Si se desea examinar un ciclo cerrado, los productos de la combustión que se han expandido al pasar por un intercambiador de calor, en el que se desecha calor del gas hasta que alcanza la temperatura inicial. En la Figura II.54 a) y b) se muestra el ciclo abierto y cerrado de las turbinas de gas (Holman, 1980).

Figura II.54: Turbinas de gas que operan con el ciclo a) abierto y b) cerrado (Wark, 1984)



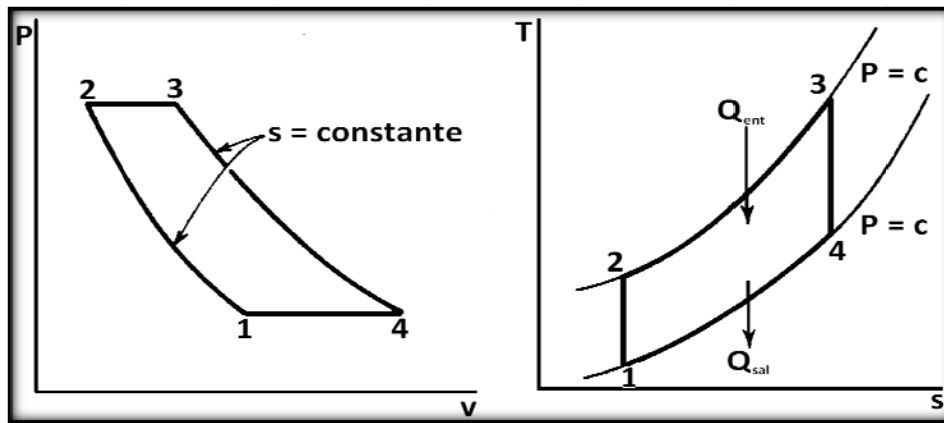
Un ciclo con turbinas de gas con aire normal de compresión y de expansión isoentrópicas se llama ciclo Brayton. En él se tiene que sustituir el proceso real de la combustión por un proceso de suministro de calor.

En el ciclo Brayton los procesos de compresión y expansión son isoentrópicos y los de suministro y extracción de calor ocurren a presión constante. La Figura II.55 muestra los diagramas Pv y TS de este ciclo idealizado (Burghardt, 1982).

La eficiencia térmica del ciclo idealizado de Brayton en ausencia de cambios apreciables en la energía cinética está dada por:

$$\eta_{t, \text{Brayton}} = 1 - \frac{q_{\text{sal}}}{q_{\text{ent}}} = 1 - \frac{h_{4s} - h_1}{h_3 - h_{2s}} \quad (\text{II-21})$$

Figura II.55. Diagramas característicos Pv y TS del ciclo Bryton con aire normal (Wark, 1984)



Para un ciclo Brayton con aire normal frío con valores de los calores específicos constantes está dada por:

$$\eta_{t, \text{Brayton}} = 1 - \frac{T_{4s} - T_1}{T_3 - T_{2s}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (\text{II.22})$$

Donde

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

Por lo tanto, la eficiencia térmica de un ciclo Brayton con aire normal es fundamentalmente función de las presiones.

### II.5.1.3 CICLO COMBINADO

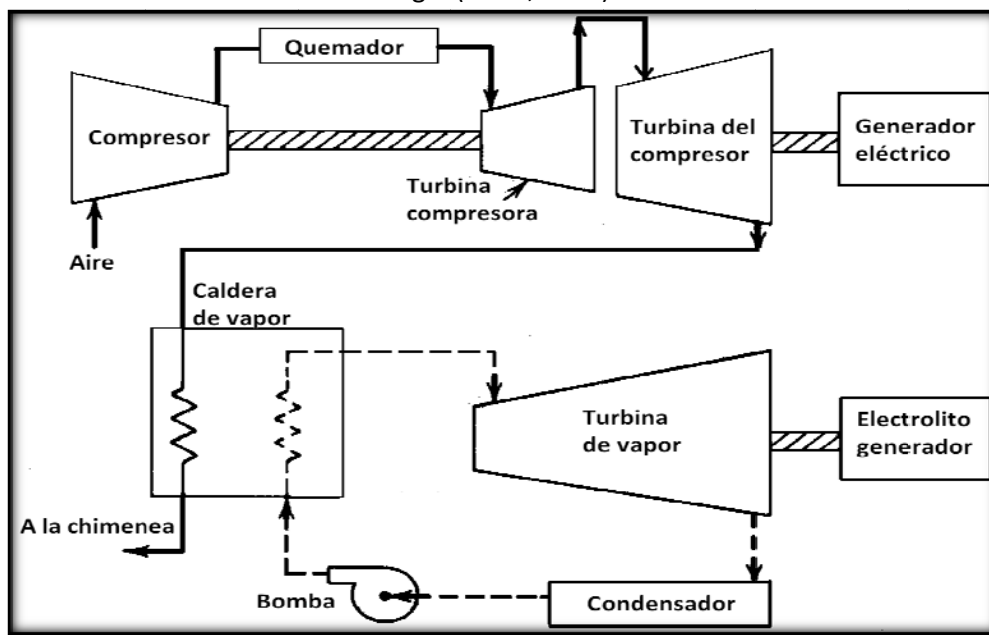
Un ciclo generador de potencia combinado se basa en la conexión o acoplamiento de dos ciclos de potencia distinto. De tal manera, que el calor disipado por un ciclo se use parcial o totalmente como la fuente de calor de otro ciclo.

En un ciclo de turbina de gas, la corriente de escape que sale de la turbina es relativamente caliente, para aprovechar esta energía de alta temperatura es por medio de la regeneración. Una parte de la energía se regresa al aire al pasar del escape del compresor a la entrada de la cámara de combustión (Obert, 1977).

En la Figura II.56 se muestra otra alternativa de aprovechamiento del vapor. En lugar de la regeneración, la corriente de escape de la turbina se usa como la fuente de energía en la caldera de un ciclo común de potencia de vapor de agua. El ciclo de vapor de agua empleará calentadores del agua de alimentación. La energía del escape caliente de la turbina de gas se necesita principalmente en la ebullición y el sobrecalentamiento del vapor de agua.

El perfeccionamiento práctico del ciclo con turbina de gas y vapor de agua combinado se retrasó hasta que la tecnología proporcionó los medios para construir plantas de potencia con turbinas de gas que operan con relaciones de presiones relativamente altas y con temperaturas a la entrada de la turbina superiores a los 1350°K.

Figura II.56: Esquema de un ciclo combinado formado por un ciclo Rankine básico con vapor de agua(Wark, 1984)

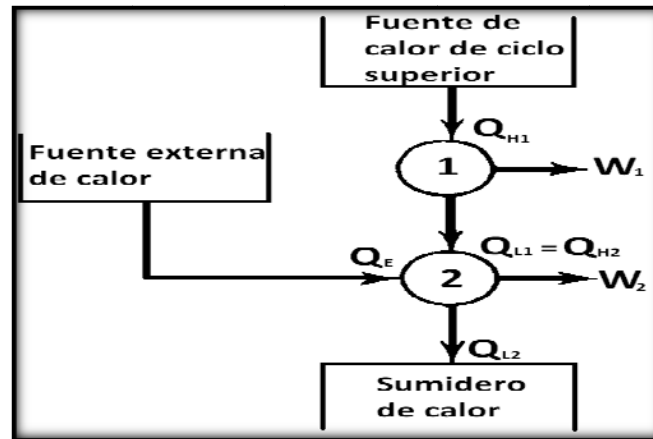


La eficiencia térmica total o neta  $\eta_0$  de un ciclo combinado y el cociente de las salidas de trabajo de los ciclos puede determinarse en función de las eficiencias térmicas individuales de los ciclos separados. En la Figura II.57 se muestra un esquema simple que muestra los intercambios de calor y de trabajo para el ciclo combinado,  $Q_H$  y  $Q_L$  representan el calor proporcionado y el calor disipado respectivamente. La máquina térmica 1 representa, un ciclo de turbina de gas. El calor  $Q_{L1}$  que se elimina en este ciclo se usa como calor suministrado a la máquina térmica 2. Para hacer la deducción más general, se muestra una fuente de calor adicional  $Q_E$  que suministra calor a la máquina 2. Los gases que salen del ciclo de turbina de gas podrían pasar por un posquemador antes de entrar al intercambiador de calor o a la caldera-sobrecalentador del vapor de agua. En el posquemador se quema combustible y se eleva la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas. Otra posibilidad es suministrar calor al vapor de agua después de salir del intercambiador de calor y antes de que entre a la turbina. Este suministro de calor aumenta el grado de sobrecalentamiento de vapor antes de entrar a la turbina (Gaggioli, 1963)

Las eficiencias térmicas de los ciclos individuales se definen como el trabajo entregado dividido por el calor recibido:

$$\eta_1 = \frac{W_1}{Q_{H1}} = 1 - \frac{Q_{L1}}{Q_{H1}} \text{ y } \eta_2 = \frac{W_2}{Q_{H2}+Q_E} = \frac{W_2}{Q_{L1}+Q_E} \quad (\text{II-23})$$

Figura II.57: Esquema que muestra los intercambios de calor y trabajo en un ciclo combinado con una posible fuente externa de calor (Wark, 1984)



En la ecuación II.23 para  $\eta_2$  requiere que todo el calor eliminado de la máquina 1 aparezca como calor proporcionado a la máquina 2. Pero en la práctica esto es falso, porque es imposible que el intercambiador de calor pueda extraer todo el calor de desecho de la corriente de escape de la turbina de gas. De las ecuaciones de eficiencia, se debe indicar qué porcentaje del total de calor suministrado a la máquina 2 proviene de una fuente externa (Reynolds, 1968; Perkins, 1977). Esto hace definir un parámetro  $\sigma$  tal que:

$$\sigma = \frac{\text{calor proporcionado externamente a la máquina 2}}{\text{calor intercambiado internamente entre los ciclos}} = \frac{Q_E}{Q_{H2}} = \frac{Q_E}{Q_{L1}} \quad (\text{II-24})$$

De las ecuaciones anteriores se puede predecir la eficiencia térmica neta del ciclo combinado y la razón de los trabajos:

$$\eta_0 = \frac{\text{salida neta de trabajo}}{\text{calor proporcionado}} = \frac{W_1+W_2}{Q_{H1}+Q_E} \quad (\text{II-25})$$

Y la razón  $\beta$  del trabajo de la máquina térmica 2 al trabajo de la máquina térmica 1 es:

$$\beta = \frac{W_2}{W_1} \quad (\text{II-26})$$

#### II.5.1.4 CICLO DE CARNOT

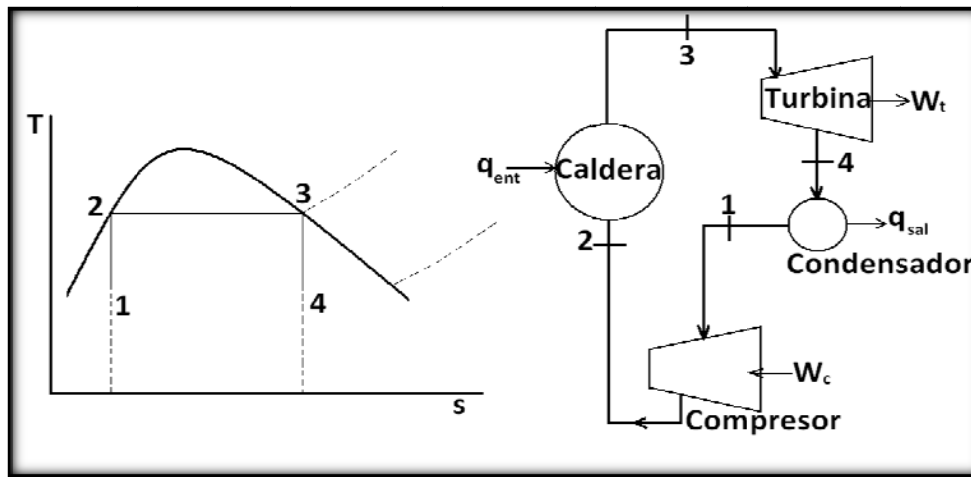
El ciclo de Carnot está compuesto de dos procesos isotérmicos reversibles y dos procesos adiabáticos reversibles. Si el fluido de trabajo aparece en las fases líquida y de vapor durante partes del ciclo los diagramas TS son como los de la Figura II.58 a) y b) muestra un esquema del equipo necesario para este ciclo.

Si el fluido de trabajo es agua, entonces en el estado 1 se comprime isoentrópicamente vapor húmedo hasta el líquido saturado del estado 2. A esta presión, se suministra energía a presión constante hasta que el agua se evapora completamente al vapor saturado del estado 3. Luego se permite que el vapor se expanda isoentrópicamente en una turbina hasta el estado 4. Entonces el vapor húmedo que sale de la turbina de vapor se condensa parcialmente a presión constante hasta regresar al estado 1. La eficiencia térmica del ciclo es la máxima para cualquier máquina que opere entre las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Y está dada por  $(T_2 - T_1)/T_2$ .

#### Desventajas

El ciclo de Carnot no es de uso práctico con fluidos que sufren cambios de fase, debido a que es difícil comprimir isoentrópicamente una mezcla de dos fases, como lo requiere el proceso 1-2, el procesos de condensación 4-1 debería controlarse en forma precisa y alcanzar la calidad deseada del estado 1, y que en la eficiencia de un ciclo de Carnot influye la temperatura  $T_2$  a la cual se le entrega energía. Para el vapor la energía crítica es de sólo 705°F. Por esta razón si se quiere que el ciclo funcione dentro de la región húmeda, la máxima temperatura posible he de ser severamente limitada (Reynolds, 1968).

Figura II.58: Diagrama TS y esquema del equipo de ciclo generador de potencia de Carnot con vapor a) y b) (Wark, 1984)



#### II.5.1.5 CICLO RANKINE

El ciclo Rankine es una modificación del ciclo de Carnot, es decir, en lugar de que se condense hasta el vapor de baja calidad, el proceso de condensación se puede realizar de tal manera que el vapor húmedo que sale de la turbina se condensa a líquido saturado a la presión de la salida de la turbina. El proceso de compresión lo efectúa una bomba para líquido, que comprime isoentrópicamente al líquido que sale del condensador hasta que alcanza la presión deseada en el proceso de suministro de calor (Huang, 1976). El ciclo básico se muestra en la Figura II.59. El ciclo motriz con vapor de Rankine sencillo consiste en:

1. Compresión isoentrópica en una bomba

2. Suministro de calor a presión constante en una caldera
3. Expansión isoentrópica en una turbina
4. Extracción de calor a presión constante en un condensador

El calor suministrado en el proceso 2-3 puede provenir de la combustión de combustible. Si se pueden despreciar los cambios en la energía cinética y potencial, el calor transferido al fluido en la caldera está representado en el diagrama TS por el área limitada por los estados 2-2'-3-b-a-2. El área limitada por los estados 1-4-b-a-1 representa el extraído del fluido en el condensador. El trabajo neto está representado por la diferencia de las áreas para el calor entrada y el desechado, es decir, el área 1-2-2'-3-4-1. La eficiencia térmica del ciclo está definida como  $W_{\text{neto}}/Q_{\text{ent}}$  (Reynolds, 1968)

Las expresiones del trabajo y el calor en el ciclo ideal se encuentran al aplicar la ecuación de energía de régimen permanente a cada parte del equipo individualmente. Despreciando los cambios en la energía cinética y potencial, la ecuación se puede escribir como  $q + w = h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}}$ . El trabajo de la bomba isoentrópica está dada por:

$$w_{\text{ent,bomba}} = h_2 - h_1 \quad (\text{II-27})$$

También se puede calcular a partir de la ecuación relativa del trabajo mecánico de régimen permanente:

$$w = \int v \, dP \quad (\text{II-28})$$

El cambio de volumen específico del agua líquida, desde el estado de saturación hasta las presiones en el estado de líquido comprimido que se encuentra en las plantas motrices de vapor de ahí que el fluido presente en la bomba pueda ser considerado incompresible. En consecuencia el trabajo en la bomba se determina por medio de la relación:

$$w_{\text{ent,bomba}} = v_f(P_2 - P_1)s_1 = s_2 \quad (\text{II-29})$$

Donde  $v_f$  es el volumen específico del líquido saturado en el estado 1.

La entrada de calor, la salida de trabajo isoentrópico de la turbina y el calor eliminado en el condensador, todos referidos a la unidad de masa, son:

$$q_{\text{ent,caldera}} = h_3 - h_2 \quad P_3 = P_2 \quad (\text{II-30})$$

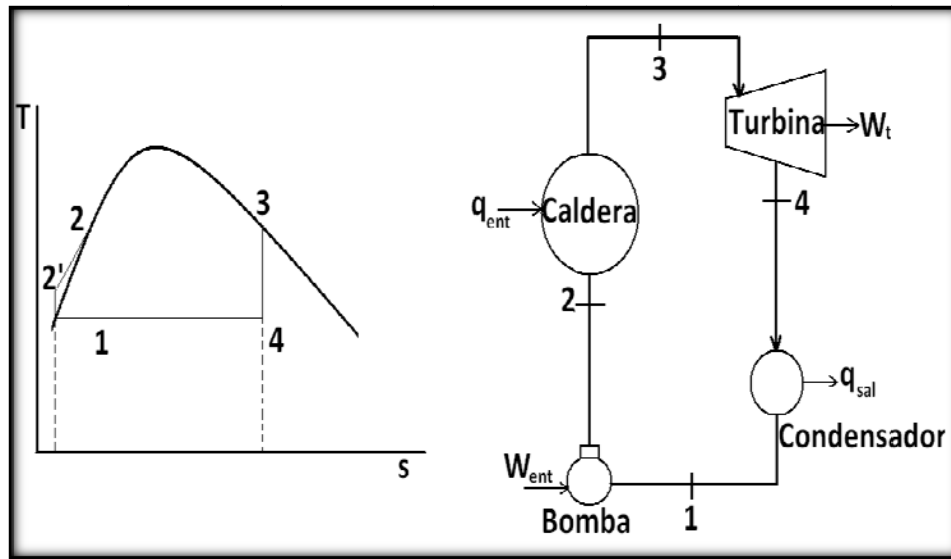
$$q_{\text{sal,turbina}} = h_3 - h_4 \quad s_3 = s_4 \quad (\text{II-31})$$

$$q_{\text{sal,condensador}} = h_4 - h_1 \quad P_4 = P_1 \quad (\text{II-32})$$

La eficiencia térmica de un ciclo Rankine ideal se puede escribirse como:

$$\eta_t = \frac{w_T - w_B}{q_{\text{ent}}} = \frac{(h_3 - h_4) - v_{f,1}(P_2 - P_1)}{h_3 - h_2} \quad (\text{II-33})$$

Figura II.59. Esquema del diagrama TS de una planta de potencia sencilla de vapor de agua que trabaja con el ciclo Rankine (Wark, 1984)



Procesos del diagrama TS del ciclo Rankine:

Proceso 1-2': Compresión isentrópica de la bomba. Es este proceso aumenta la presión del fluido mediante una bomba o compresor, al que se le aporta trabajo.

Proceso 2'-3: Transmisión del calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera.

Proceso 3-4: Expansión isentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador.

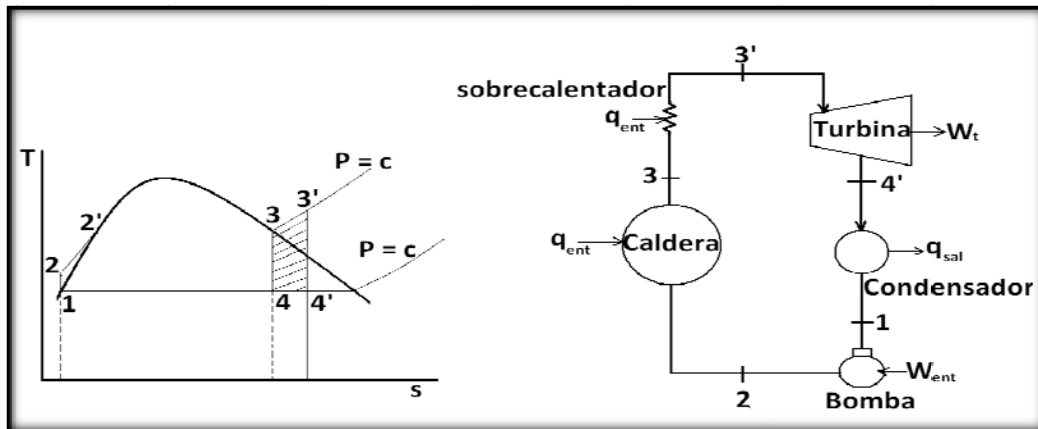
Proceso 4-1: Transmisión de calor desde el fluido de trabajo al refrigerante a presión constante en el condensador hasta el líquido saturado.

Para mejorar la eficiencia del ciclo Rankine se puede elevar la temperatura del fluido que entra a la turbina y eliminar la humedad, mediante la inserción de un sobrecalentador en el ciclo simple de Rankine. El proceso de sobrecalentamiento produce una mayor temperatura a la entrada de la turbina sin que aumente la presión máxima del ciclo. Después que el vapor saturado sale de la caldera, el fluido pasa por otra sección de suministro de calor, en la cual la temperatura aumenta a presión constante. El vapor sale del sobrecalentador a temperatura que está restringida sólo por aspectos metalúrgicos, entre 540 a 600°C (Huang, 1976)

La Figura II.60 muestra el diagrama TS y el equipo de un ciclo Rankine con sobrecalentamiento. El área sombreada del diagrama TS representa la salida adicional de trabajo neto, y el área bajo la curva 3-3' representa el calor adicional entregado en la sección del sobrecalentador.



Figura II.60. Diagrama TS y esquema del ciclo del equipo para un ciclo Rankine con sobrecalentamiento (Wark, 1984)



### II.5.1.5.1 CICLO CON RECALENTAMIENTO

En el ciclo con recalentamiento no se deja que el vapor se expanda completamente en un solo paso hasta la presión del condensador. Después de una expansión parcial, el vapor es extraído de la turbina y se recalienta a presión constante, en seguida, se regresa a la turbina para una expansión adicional hasta la presión de escape. Se puede considerar que la turbina consiste de dos etapas, una de alta y otra de baja presión (Burghardt, 1982).

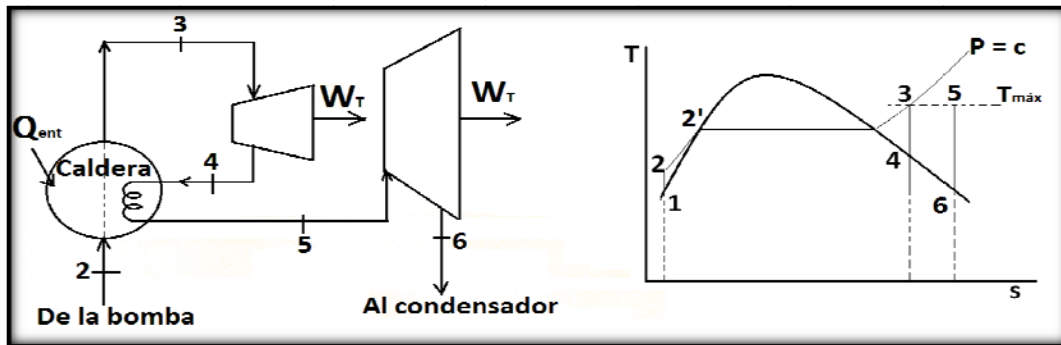
En la Figura II.61 se muestra el ciclo con recalentamiento en un diagrama TS y un esquema del equipo. Generalmente la posición del estado 4 después de la primera etapa de expansión es cercana a la línea de saturación. Tras el recalentamiento hasta el estado 5, la temperatura es igual o ligeramente menor que la temperatura a la entrada de la primera etapa de la turbina.

Al seleccionar la trayectoria 4-5 del recalentamiento se debe tener cuidado porque puede ocurrir que la temperatura promedio del proceso de recalentamiento sea menor que la temperatura promedio del proceso 2-3 del suministro de calor (Balzhiser y Samuels, 1977).

El recalentamiento no necesariamente aumenta la eficiencia térmica del ciclo Rankine básico. El uso correcto del recalentamiento eliminará la inconveniencia del elevado contenido de humedad en el escape de la turbina. Existe una presión de recalentamiento que maximizará la eficiencia térmica para los valores dados de  $P_3$ ,  $T_3$ ,  $T_5$  y  $P_6$  de la Figura 45. Con los valores convencionales de estos parámetros, la eficiencia máxima del ciclo ideal con recalentamiento suele ocurrir cuando el cociente  $P_4/P_3$  está en la región de 0.15 a 0.35. Para calcular la eficiencia térmica de un ciclo con recalentamiento, se debe tomar en cuenta la salida del trabajo de las dos etapas de la turbina, así como las dos entradas de calor a la sección de la caldera- sobrecalentador y recalentamiento. Por lo tanto la ecuación se puede escribir como:

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) - w_B}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)} \quad (\text{II-34})$$

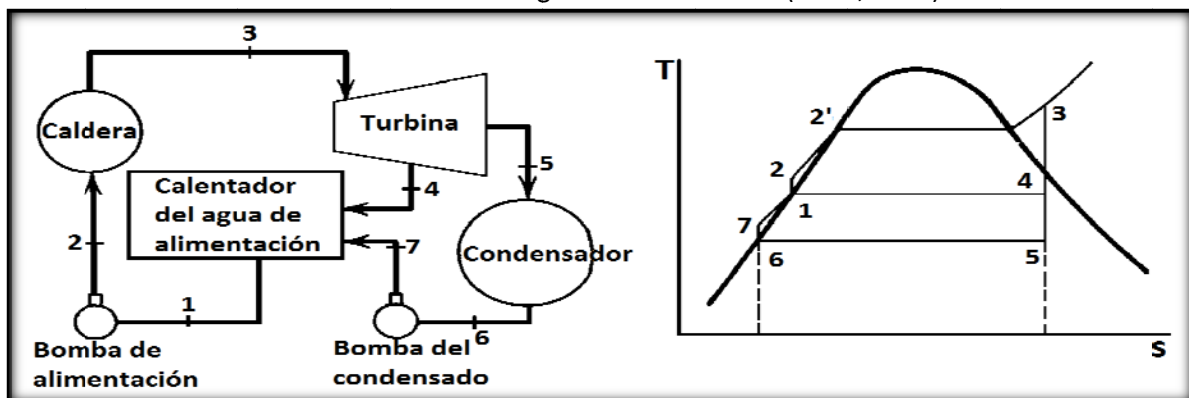
Figura II.61: Esquema del equipo y diagrama TS de un ciclo ideal con vapor y con recalentamiento (Wark, 1984)



### II.5.1.5.2 CICLO REGENERATIVO

El ciclo de potencia de vapor con regeneración ideal como se muestra en la Figura II.62, se realiza de la siguiente manera: Parte del vapor sobrecalentado que entra a la turbina en el estado 3 se extrae de la turbina en el estado 4, que es un estado intermedio en el proceso de expansión de la turbina. El vapor extraído se conduce a un intercambiador de calor que recibe el nombre de calentador del agua de alimentación. La porción del vapor que no se extrajo se expande completamente hasta la presión del condensador en el estado 5 y se condensa a líquido saturado en el estado 6. En seguida una bomba aumenta isoentrópicamente la presión del líquido que sale del condensador hasta la misma presión del vapor previamente extraído. Luego, el líquido comprimido del estado 7 entra al calentador de agua de alimentación, en donde se mezcla directamente con la corriente que se extrajo de la turbina. Por este proceso de mezclado directo, el calentador de agua de alimentación se llama un calentador de tipo abierto o de conducto directo. En la situación ideal, los flujos de las dos corrientes que entran al calentador se ajustan de manera que el estado de la mezcla que sale de él sea un líquido saturado a la presión del calentador del estado 1. Una segunda bomba aumenta isoentrópicamente la presión del líquido hasta el estado 2, que corresponde a la presión del generador de vapor (Gaggioli, 1963).

Figura II.62: Esquema del equipo y diagrama TS de un ciclo ideal con vapor regenerativo con un calentador abierto del agua de alimentación (Wark, 1984)



---

## II.5.2. TIPOS DE PLANTAS DE POTENCIA

### II.5.2.1 PLANTAS TERMOELÉCTRICAS CONVENCIONALES

Una planta termoeléctrica convencional es aquella que aprovecha la energía calorífica contenida en el vapor, que producido por una caldera pone en movimiento una máquina de vapor (turbina) para a su vez hacer girar un alternador y producir energía eléctrica (Figura II.63).

En una planta termoeléctrica convencional la transformación del calor en electricidad, se efectúa en forma escalonada, para ello es necesario el empleo de tres elementos principales y el correspondiente equipo auxiliar (Elonka y Robinson, 1981). Los elementos principales son:

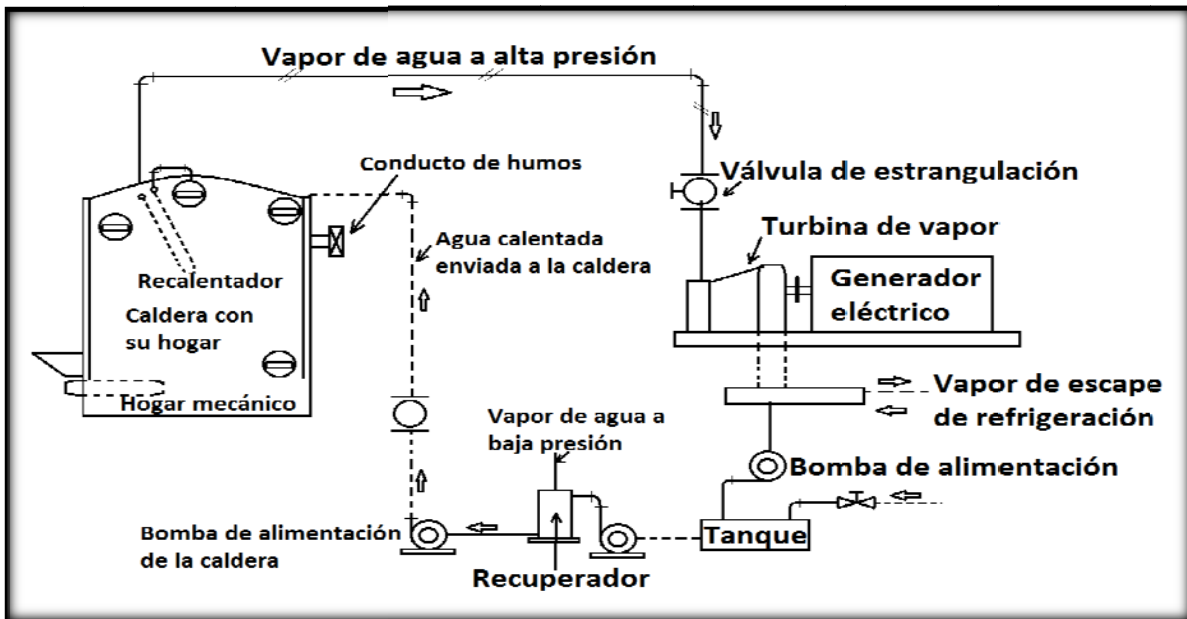
- a) Generador de vapor o caldera
- b) Turbina de vapor
- c) Generador de corriente alterna

En la operación de una planta termoeléctrica convencional se consideran cuatro pasos fundamentales para aprovechar el calor y llegar a la producción de electricidad. El primer paso consiste en realizar la combustión del combustible que puede ser carbón, petróleo crudo o gas natural. Para poder realizar la combustión se necesita una cierta cantidad de oxígeno (comburente) que se toma del aire. El aire, es impulsado por un ventilador llamado tiro forzado, a un ducto que lo conduce hasta los quemadores en donde el aire y el combustible se mezclan y esta mezcla es la que arde. En este paso ha ocurrido un cambio, la energía química contenida en el combustible en forma de energía potencial se ha convertido en energía calorífica. El segundo paso se realiza en la caldera y consiste en el calentamiento de agua hasta convertirla en vapor. El calor desprendido es absorbido por el agua y en virtud de ese calentamiento va elevando su temperatura hasta llegar a evaporarse. El tercer paso se realiza en la turbina al girar la parte móvil del rotor por acción o efecto del vapor procedente de la caldera. El vapor conducido por tuberías, es admitido al interior de la turbina en donde su energía calorífica se convierte en energía mecánica al hacer girar el rotor. El cuarto paso se realiza en el generador y consiste en hacer girar un imán dentro de un campo magnético. El giro del rotor de la turbina hace girar a su vez el rotor del generador y se produce la electricidad. Aquí la energía mecánica se convierte a energía eléctrica. Finalmente la energía eléctrica producida es conducida por medio de cables a una subestación donde es elevado su voltaje para poder transportarla a grandes distancias (Gaffert, 1954).

#### Partes de una planta termoeléctrica convencional

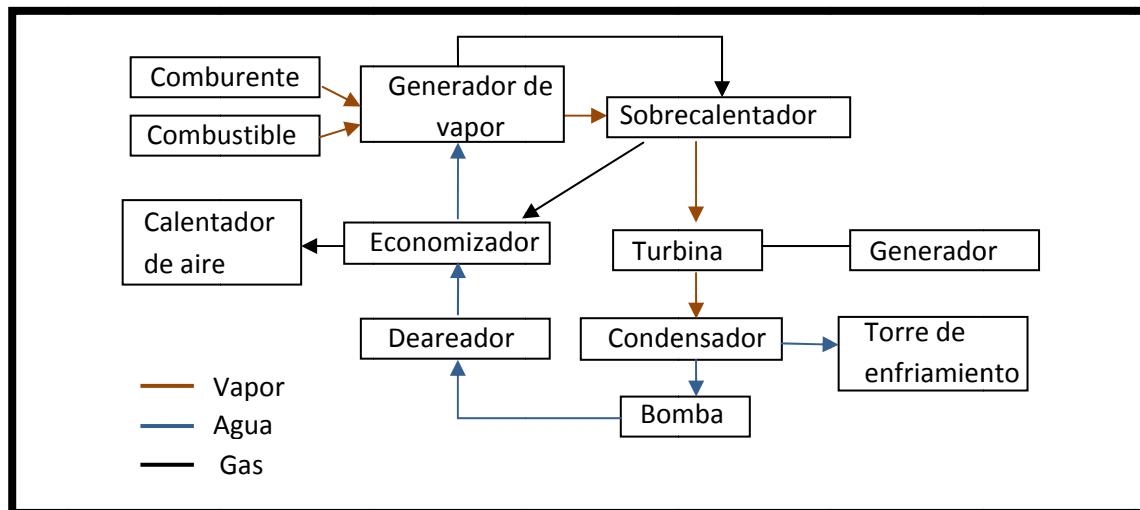
- a) Generador de vapor o caldera
- b) Sobrecalentadores.
- c) Economizadores.
- d) Calentador de aire o precalentador.
- e) Turbina de vapor.
- f) Condensador.

Figura II.63: Esquema de una central térmica con condensador (González, 1974)



Las plantas termoeléctricas convierten el calor en trabajo y posteriormente en energía eléctrica a través de un ciclo de conversión de energía descrito en la Figura II.64.

Figura II.64: Representación esquemática de aprovechamiento de una termoeléctrica convencional (González. 1974)



### II.5.2.2 PLANTAS GEOTÉRMICAS

Una planta geotérmica es aquella que utiliza vapor natural del subsuelo, para alimentar las turbinas de vapor que mueven a los generadores eléctricos. En esta forma, a través de miles de años se va acumulando el calor de las rocas y en los estratos porosos creándose un flujo de calor desde el interior de la corteza terrestre al exterior. Las investigaciones sobre el origen geotérmico

coinciden en el desprendimiento del vapor de enormes depósitos de agua confinada a temperaturas muy elevadas que yacen en la profundidad de la tierra.

Se puede suponer que el vapor se acumula, conducido a través de conductos tales como fracturas o trampas naturales, en las que adquiere presión y de las cuales una parte emigra buscando zonas de debilidad aprovechando fracturas y fallas no selladas de la roca, hacia la superficie, donde se manifiesta en formas naturales, la trampa debe ser de un material suficientemente permeable para permitir el almacenamiento de vapor, superyaciendo a esa formación debe existir un material lo suficientemente impermeable para que no escape el vapor y pueda adquirir presión.

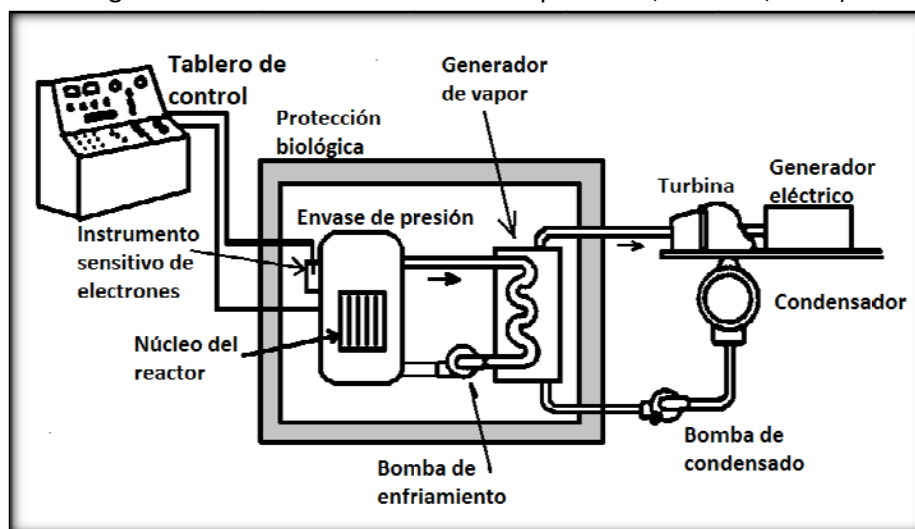
### Características termodinámicas del fluido geotérmico

En los campos geotérmicos es necesario determinar la energía que se obtiene en cada pozo midiendo su entalpía y su flujo, para obtener curvas de variación de potencial obtenible por pozo. Se puede también medir la presión para obtener curvas de potencia contra presión, que son indispensables para poder determinar la presión óptima de aprovechamiento. En el caso de tener vapor saturado o con un ligero sobrecalentamiento la medición de la entalpía y del flujo, se realiza instalando un orificio, relacionando la caída de presión con el flujo, y midiendo la entalpía con el grado de sobrecalentamiento de flujo total después de la expansión adiabática. La potencia obtenible en el pozo para cada presión será el producto de la entalpía por el flujo total afectado por la eficiencia del aprovechamiento (Luca, 1995).

### II.5.2.3 PLANTAS NUCLEARES

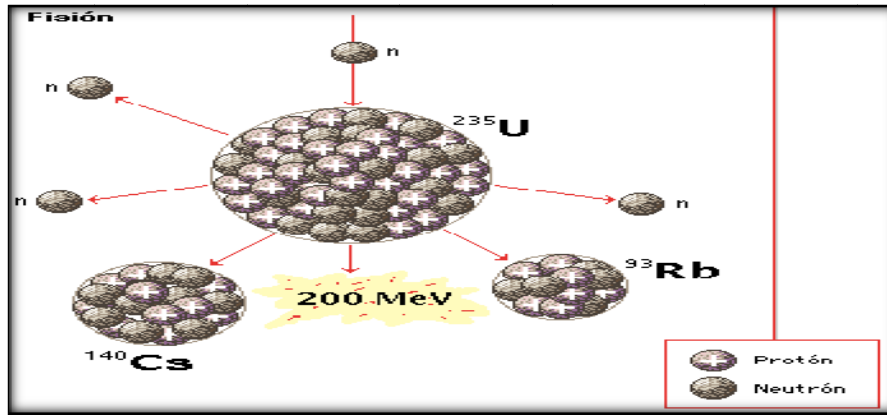
Una planta de reactor nuclear es aquella que aprovecha el fenómeno de la reacción nuclear de fisión para generar calor, el cual es aprovechado en la producción de vapor y con éste, siguiendo un proceso similar al de las termoeléctricas convencionales, producir energía eléctrica. Figura II.65.

Figura II.65: Sistema de un reactor de potencia (González, 1974)



El reactor nuclear es un aparato o equipo que se utiliza para iniciar, mantener y controlar fisión en cadena, desprendiendo el calor gradualmente y no en forma explosiva como se muestra en la Figura II.66 (Pickard, 1957).

Figura II.66: Reacción en cadena Fisión (Pickard, 1957).



#### II.5.2.4 PLANTA DE COMBUSTIÓN INTERNA

Una planta de combustión interna ésta formada por:

- Motor de combustión interna, su función es convertir la energía química de un combustible en energía mecánica para poder impulsar un generador.
- Servicios auxiliares del motor como lubricación, alimentación de combustible, enfriamiento, escape, etc.
- Generador es un convertidor de energía mecánica en energía eléctrica.

Las plantas de combustión interna tienen aplicaciones como unidad generadora, llevando la carga total, unidad estacionaria de reserva para cubrir demandas máximas y como unidad estacionaria para casos de emergencia (Keenan, 1946).

#### El motor de combustión interna

Es una máquina que transforma en su interior energía química de un combustible a energía térmica, entregándola al exterior como energía mecánica. Su funcionamiento consiste en hacer que una mezcla combustible-comburente contenida en un recipiente cerrado se inflame aumentando su temperatura y su presión sobre las paredes del recipiente, empujando una parte del recipiente con relación al resto provocando su desplazamiento venciendo una resistencia.

En general los elementos necesarios para el funcionamiento del motor de combustión interna son:

##### a) Elemento comburente (aire)

Siendo el aire el elemento comburente más abundante en la naturaleza, está formado por una mezcla de gases, siendo el oxígeno el más importante para la combustión. Se podría utilizar oxígeno puro o mezclado con otros gases pero es más costoso. (Se requieren 15 kg de aire por cada kilogramo de gasolina)

**b) Elemento combustible**

Los combustibles más usados son productos derivados del petróleo, que es uno de los más poderosos energéticos.

**c) Medio de ignición por combustible**

Por medio de chispa eléctrica, que se emplea en los motores ciclo Otto-gasolina. Consiste en hacer saltar una chispa eléctrica dentro de la cámara de combustión en el momento apropiado.

**d) Ignición por compresión**

Se emplea en los motores ciclo Diesel. Se comprime la mezcla combustible-comburente para que se eleve su temperatura hasta-autoencenderse (Skrotzki y Bernhardt, 1972).

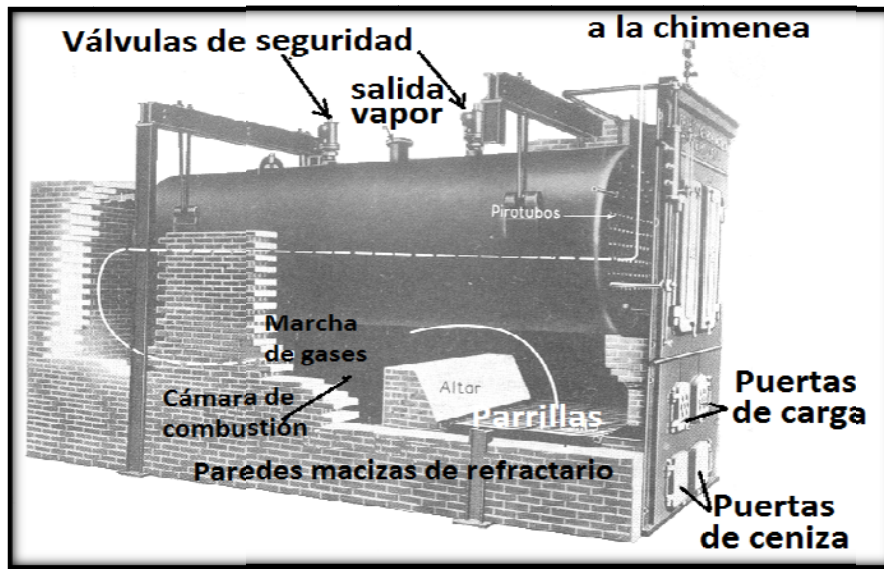
**II.5.3 COMPONENTES DE LAS PLANTAS DE POTENCIA****II.5.3.1 CALDERA**

Las calderas de vapor se clasifican atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua, en acuotubulares y pirotubulares; por la posición de los tubos en verticales, horizontales e inclinados; por la forma de los tubos, de tubos rectos y de tubos curvados; y por la naturaleza del servicio que prestan, en fijas, portátiles, locomóviles y marinas. La elección de una caldera para un servicio determinado depende del combustible de que se disponga, tipo de servicio, capacidad de producción de vapor requerida, duración probable de la instalación y de otros factores de carácter económico.

**Calderas pirotubulares:** En éstas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales se hayan rodeados de agua. Generalmente tienen un hogar integral (denominado caja de fuego) limitado por superficies enfriadas por agua. Las calderas pirotubulares horizontales con hogar integral se utilizan en instalaciones de calefacción a baja presión, y algunos tipos más grandes para producir vapor a presión relativamente baja destinado a calefacción y a producción de energía.

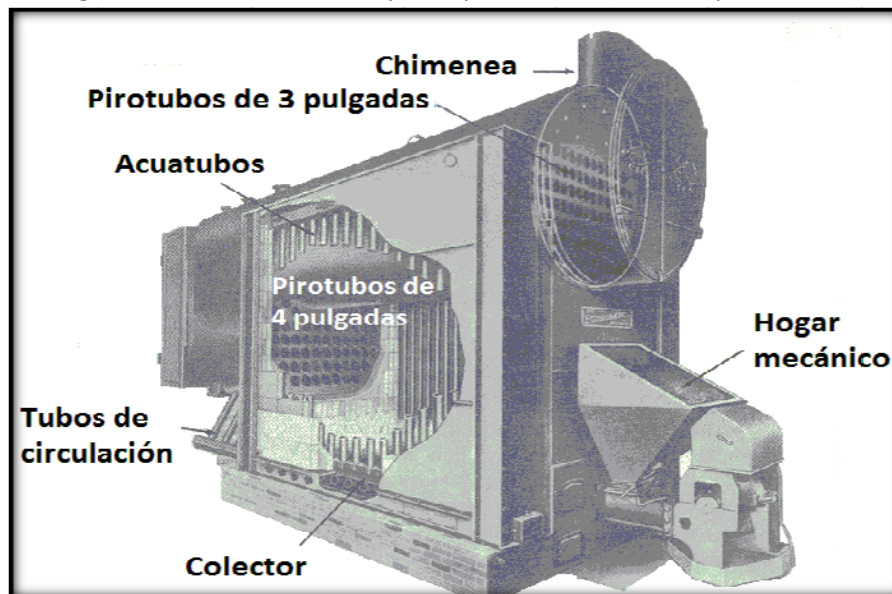
La caldera fija con tubos de retorno horizontales (HRT) que se muestra en la Figura II.67 que es un tipo de caldera pirotubular que consiste en una combinación de parrilla, altar de refractario, puertas de carga y cenicero, cenicero y cámara de combustión. Las superficies interiores de las paredes del hogar están revestidas de refractario. El cuerpo de la caldera se haya suspendido de vigas de hierro mediante tirantes. Los gases calientes pasan por encima del altar y lamen todo el fondo de la caldera volviendo a la parte frontal de la misma por el interior de los tubos. Finalmente del extremo frontal de éstos, los productos de la combustión pasan a la chimenea. El diámetro de los tubos puede ser 3, 3 ½ y 4 pulgadas según sea el combustible empleado. Los diámetros del cilindro o cuerpo de estas calderas están comprendidos entre 91 y 213 centímetros; la longitud de los tubos correspondientes entre 3 y 6 metros; las presiones relativas del vapor llegan hasta 12 kg/cm<sup>2</sup>.

Figura II.67: Caldera Erie con tubos de retorno horizontales (HRT) (Severns y col., 1961)



**Calderas acuotubulares:** Por el interior de los tubos pasa agua o vapor, y los gases calientes se hallan en contacto con la superficie externa de aquellos, en contraste con el tipo piro tubular. Estas calderas son empleadas casi exclusivamente cuando interesa obtener altas presiones y rendimientos debido a que los esfuerzos desarrollados en los tubos por las altas presiones son de tracción en vez de compresión, como ocurre en los piro tubos. La limpieza de las calderas se lleva a cabo fácilmente por que las escamas incrustaciones se quitan con facilidad usando dispositivos como agua o aire. Los objetivos al construir una caldera cualquiera son: Costo reducido, forma simple de los tubos, compacidad, accesibilidad, transmisión eficiente del calor, buena circulación y elevada capacidad de producción de vapor (Severns y col., 1961).

Figura II.68: Caldera Erie City acuopiro tubular (Severns y col., 1961)

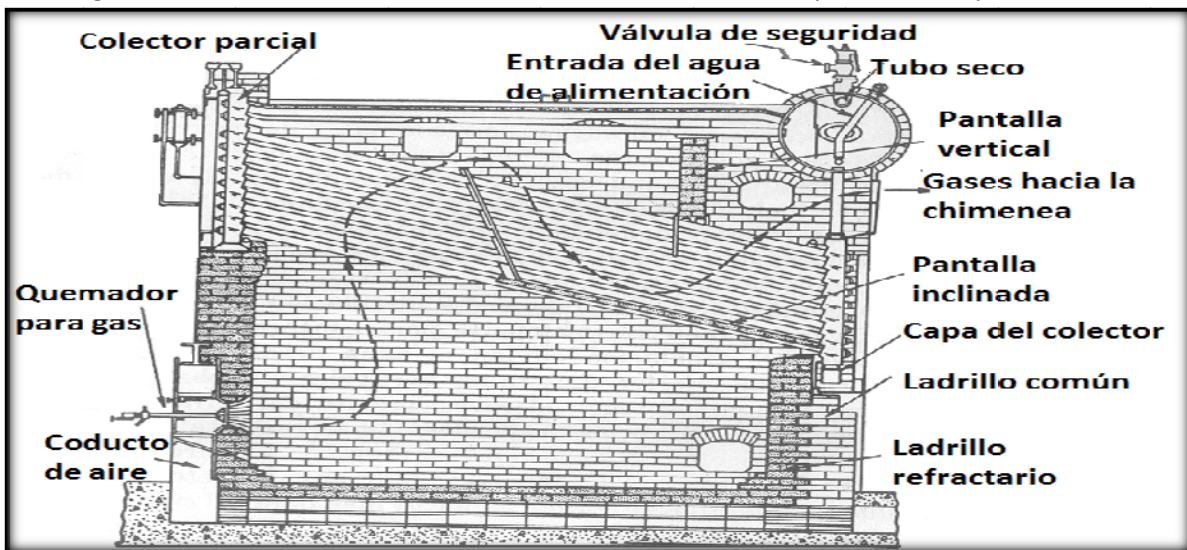




La Figura II.68 es un ejemplo de una caldera acuopiro-tubular. Este tipo de caldera puede quemar gasolina, gas o carbón. El hogar mecánico del tipo de alimentación por la parte inferior constituye una instalación típica. Las puertas frontales y posteriores dan acceso a los tubos. Los acuotubos laterales están unidos por colectores horizontales que a su vez van unidos a la cámara de agua del cuerpo cilíndrico de la caldera. La circulación es excelente debido a que el agua y vapor suben verticalmente por el interior de los tubos. Los tubos denominados de circulación envían el agua desde la parte posterior de la caldera al colector inferior. Los tubos verticales absorben el calor irradiado y al mismo tiempo protegen el revestimiento del refractario.

**Calderas de tubos rectos inclinados:** Ésta es una variante de la caldera acuotubular con tubos rectos. Aparece representada en la Figura II.69. El cuerpo cilíndrico único va colocado a lo largo y formando ángulo recto con los tubos. El agua de alimentación, que entra por la parte más baja del cilindro, desciende por la parte interior de los colectores posteriores y sube por los tubos inclinados en donde se forma el vapor. La mezcla de vapor y agua asciende rápidamente por los colectores frontales induciendo una circulación hacia el cuerpo cilíndrico de la caldera en donde tiene lugar la separación entre el vapor y el agua (Severns y col., 1961.).

Figura II.69. Caldera de tubos rectos con cilindro transversal B y W (Severns y col., 1961)



Los acuotubos son de cuatro pulgadas, están inclinados formando un ángulo de 22 grados. Las calderas de tubos rectos tienen la ventaja de que todos los tubos principales son iguales y solamente se necesitan pocas formas especiales. Tienen el inconveniente de que los tubos rectos terminan en colectores cuyas paredes deben estar a escuadra con la línea central de los tubos.

**Caldera de vapor con circulación forzada:** Cuando en una caldera se reemplaza la circulación por gravedad por circulación forzada, el diámetro de los tubos puede reducirse, y el circuito de los tubos puede alargarse, y disminuir el espesor de sus paredes para una presión dada. Los tubos pueden disponerse a modo de serpentín continuo formando el revestimiento del hogar, de esta manera se mejora la transmisión del calor, el espacio requerido se reduce al mínimo y los cuerpos

cilíndricos se encuentran suprimidos. Las calderas de circulación favorecida emplean una bomba para favorecer la circulación del agua o vapor.

### Capacidad de producción de vapor de las calderas

La producción de un generador de vapor se da frecuentemente en kilogramos de vapor por hora. La capacidad de una caldera de vapor se expresa en forma de calor transmitido por las superficies de caldeo en Kcal/h. El proceso de transmisión de calor en un generador de vapor es un flujo constante, en el cual el calor transmitido es igual a la variación de entalpía del fluido. Entonces la producción de la caldera medida por el calor absorbido por el agua y vapor en kilocalorías es:

$$Q = m_s(h - h_f) \quad (\text{II-35})$$

Donde

Q = producción de la caldera, en Kcal/h

$m_s$  = peso del vapor producido por la caldera (o bien recalentado), en Kg/h

$h$  = entalpía de 1 kg de vapor a la presión y título o temperatura observados, en Kcal/h

$h_f$  = entalpía de líquido de 1 kg de agua de alimentación en las condiciones en que dicha agua llega a la caldera, en Kcal/Kg

Si el peso  $m_s$  es la cantidad máxima que la caldera puede producir por hora a la temperatura especificada. Pero si  $m_s$  representa el peso de vapor que la caldera puede producir con más eficiencia, la producción se denomina capacidad normal.

La potencia en HP de caldera, como fue establecida en 1889 por la ASME, estaba basada en una máquina de vapor que empleaba 30 lb<sub>vapor</sub>/HP h a presión relativa de 4.9 Kg/cm<sup>2</sup> y con el agua de alimentación de la caldera a 38.5°C. Esto corresponde a la vaporización de 15.66 kg<sub>agua</sub>/h a 100°C en vapor seco a 100°C a la presión atmosférica normal y requiere una entalpia de vaporización de 543.4 Kcal (Severns y col., 1961).

$$\text{HP de caldera} = \frac{m_s(h-h_f)}{543.4 \times 15.66} \quad (\text{II-36})$$

El factor de vaporización es la relación entre el calor absorbido por 1 kg de agua de alimentación en las condiciones principales de la caldera y el absorbido por 1 Kg de agua a 100° al vaporizarla a 100°C:

$$\text{Factor de vaporización} = \frac{h-h_f}{543.4} \quad (\text{II.37})$$

Vaporización equivalente se define como los kg<sub>agua</sub>/ha 100°C, que se vaporizarían a 100°C si se hubiese absorbido la misma cantidad de energía que en las condiciones observadas en la caldera:

$$\text{vaporización equivalente} = \frac{m_s(h-h_f)}{543.4} \quad (\text{II-38})$$

El rendimiento global de una caldera de vapor en condiciones de funcionamiento cualquiera es la relación entre el calor transmitido y la energía suministrada en forma de combustible, es decir,

$$e_b = \frac{m_s(h-h_f)}{m_f \times F} \times 100 \quad (\text{II-39})$$

Donde

$e_b$ : Rendimiento del generador de vapor, en % incluyendo caldera, hogar, camisas de agua, calentador del aire y economizador.

$m_f$ : Peso total de combustible quemado por hora, en kg;  $m^3$  por hora si es combustible gaseoso.

F: Potencia calorífica superior del combustible quemado, en kcal por kg; kcal por  $m^3$  si es combustible gaseoso.

### II.5.3.2 QUEMADOR

Los quemadores de fuel atomizan el combustible y lo mezclan con el aire suministrado para la combustión completa con un exceso mínimo de aire. La atomización puede llevarse a cabo con aire, gas o vapor de agua a presiones relativas desde 1.75 a 7  $kg/cm^2$  o por medios mecánicos.

La atomización mecánica se efectúa comprimiendo el fuel con bomba de pistón, o por dispersión de fuerza centrífuga, lanzando el fuel sobre una rueda giratoria.

En el quemador de cañón el fuel entra en el quemador a una presión relativa de 14 a 17.5  $kg/cm^2$ , y una tubería de retorno devuelve el exceso de combustible al depósito del calentador. Tubos coaxiales conducen el fuel a un punto próximo al extremo de la boquilla, entrando en el hogar parte del fuel, y el restante vuelve por uno de los tubos coaxiales al colector de retorno. Uniendo todas las tuberías de retorno a un colector común equipado con válvula de control, la presión del retorno puede controlar simultáneamente el consumo de todos los quemadores (Severns y col., 1961).

Los quemadores para gases están construidos para trabajar a baja presión (0.009 a 0.28  $kg/cm^2$ , presión relativa) y para utilizar gases y canalizaciones de transporte en donde la presión relativa está comprendida entre 2.1 y 3.5  $kg/cm^2$ .

### II.5.3.3 TURBINA DE VAPOR

Las partes de la turbina de vapor son:

**Rotor:** Es el elemento principal de movimiento de una turbina. Consiste en un eje en el que se montan las ruedas que llevan las paletas. Es escalonado o cónico para aumentar de diámetro hacia el extremo de baja presión.

**Cubierta:** Es el principal elemento estacionario, también llamada cilindro. Rodea al rotor y contiene en el interior a las toberas, paletas y diagramas que pueden ser necesarios para controlar la trayectoria y estado físico del vapor en expansión. Los cojinetes, aparatos auxiliares y las tuberías de vapor están unidos a la cubierta o forman parte integral de ella. También tienen la

forma necesaria para hacer la armazón principal y soporte de la turbina. Cuando se hace recorrer al vapor dos o más cilindros, se llama turbina combinada.

**Cojinetes:** Los cojinetes principales de una turbina de un solo cilindro son en número de dos, colocados por el lado de afuera del prensa-estopas. La mayor parte de los muñones giran en cojinetes sencillos de Babbit. Algunas turbinas pequeñas tienen una aceitera de anillo con sus depósitos de aceite, otros usan los sistemas de las grandes turbinas de usar sistemas lubricadores de presión. El empuje lo soportan cojinetes especiales (planos o de bola). Cuando se producen grandes empujes extremos, se neutralizan principalmente por medio de placas de equilibrio empujadas por el vapor que van en el rotor.

**Empaques de la flecha:** En los lugares en que la flecha sale de la cubierta se necesita poner un dispositivo que impida la salida del vapor a alta presión y la entrada de aire en el extremo que está al vacío. En las turbinas pequeñas que operan sin condensación, esto se evita por medio de empaques en forma de anillos. Las empaquetaduras laberínticas con escapes para el vapor en extremos de alta presión y cierres de vapor o de agua en el extremo del condensador, son los que se emplean en todas las turbinas grandes.

**Control de vapor:** La cantidad de vapor que entra en una turbina estacionaria se regula generalmente de manera de que produzca una velocidad giratoria constante en presencia de una potencia de demanda variable. El control se hace variando la cantidad y presión del vapor que circula por la turbina, si el control de cantidad puede emplearse solo mejor, pero la turbina tiene toberas de tamaño fijo, el método más práctico de variar la cantidad es por control de la presión. En una instalación típica, la tubería de vapor que va a la turbina de vapor contiene una o más válvulas de compuerta para poder aislar la turbina de la tubería maestra de vapor. Estas válvulas están completamente abiertas cuando se prepara la máquina para arrancarla. En seguida está la válvula de entrada a la turbina, ésta se usa para regular la velocidad de arranque de la turbina. Cuando la turbina se ha calentado y ha alcanzado su velocidad, esta válvula se deja completamente abierta (Severns y col., 1961).

**Sistemas de lubricación:** Se necesita aceite para la lubricación de los cojinetes, una bomba de aceite integral movida por la flecha principal da presión al aceite que se usa en los relevadores y para los cilindros que operan la válvula del regulador. En este sistema se incluye un depósito de aceite, un filtro de aceite y un enfriador de aceite, algunas veces se usa una bomba movida por separado de emergencia, porque si falla el abastecimiento principal de aceite en una turbina grande, los cojinetes se destruirían antes de que el rotor se parara.

**Potencia nominal:** Las turbinas para propulsión mecánica se marcan en HP; las unidades turbogeneradoras en kilowatts. No existe ninguna potencia interna comparable a los HP indicados en las máquinas, aunque el producto del par motriz por la velocidad del motor es la potencia interna. La potencia nominal es la capacidad de potencia declarada que se espera que sea la carga máxima.

La capacidad de una turbina es el rendimiento máximo continuo, operando con las condiciones especificadas del vapor a la entrada y en el escape, con extracción completa en todos los puntos de extracción. La diferencia entre la capacidad y la capacidad nominal se considera que es una capacidad de sobrecarga. La eficiencia máxima generalmente ocurre cerca del punto nominal, porque los métodos para lograr la máxima capacidad se oponen con el flujo aerodinámico del vapor en la turbina.

Una costumbre común ha sido designar una turbina por su capacidad de 125 % de su potencia nominal, y ponerle un generador que absorba la potencia nominal con un factor de potencia de 0.8. Elevando el factor de potencia a la unidad, el generador absorberá la capacidad completa de la turbina.

Los generadores enfriados por hidrógeno indican que los factores de potencia medios de operación son de aproximadamente 0.85 y que las capacidades de los generadores pueden elevarse en las emergencias, aumentando la presión de los gases enfriadores.

**Eficiencia térmica:** Como es un motor térmico, su eficiencia será la energía útil en forma de trabajo, como potencia en la flecha, considerada como porcentaje de la energía térmica aplicada. La determinación de estas cantidades puede hacerse tomando como vas un kg de vapor de los que pasan por la turbina, en cal/h o en cantidades por kWh de rendimiento que da el generador.

Se introduce por la válvula de entrada de la turbina de vapor a presión elevada. Este se transforma en la energía del par motor en la flecha, vapor de escape, vapor de extracción, rozamientos mecánicos y radiación. El vapor extraído se utiliza totalmente; también, parte del calor del escape se recupera como calor líquido en el agua de alimentación. En consecuencia, la energía térmica que se debe cargar a la turbina es algo menor que la entalpía completa del vapor que entra (Severns y col., 1961).

La turbina sin extracción puede considerarse como una máquina de vapor de expansión completa. Como la turbina es aparato que consume una corriente constante no existe el ciclo en el que se pudiera comparar el de la máquina de vapor de movimiento recíproco. Cuando la turbina se considera como parte del ciclo de vapor de la planta de potencia, forma parte del ciclo total del fluido.

La eficiencia total de una turbina de vapor es  $W/JQ$ , en donde  $W$  es el trabajo producido en la flecha en kgm y  $Q$  las calorías de energía térmica consumidas.

Consumo de vapor es un término para pruebas de comparación, se aplica esencialmente a las turbinas sin extracción. Es de poco valor para comparar el rendimiento de las turbinas de ciclo regenerativo. Consumo de calor significa en una turbina regenerativa o de extracción lo que el consumo de vapor en una turbina de expansión completa. El consumo de calor representa las calorías gastadas por la turbina por unidad de rendimiento útil, es decir, por HPh o por kWh. Los consumos de calor de las unidades turbogeneradoras se expresan en cal/kWh disponibles en las terminales del generador. El consumo de calor en la turbina es:

$$HR_t = \frac{H_T + Q_R - (H_F - H_C) - H_E}{\text{Rendimiento en HP o kW}} \quad (\text{II-40})$$

Donde

$H_T$ : contenido de calor en el vapor suministrado en la válvula de entrada del lado de la caldera y la coladera en cal/h.

$Q_R$ : Calor que añade al vapor en recalentamiento, igual al aumento en contenido de calor del punto en que el vapor sale de la turbina para recalentarse hasta el punto en que el vapor recalentado vuelve a entrar en la cubierta de la turbina en cal/h.

$H_F$ : Contenido de calor del agua de alimentación al salir del calentador de mayor temperatura en cal/h

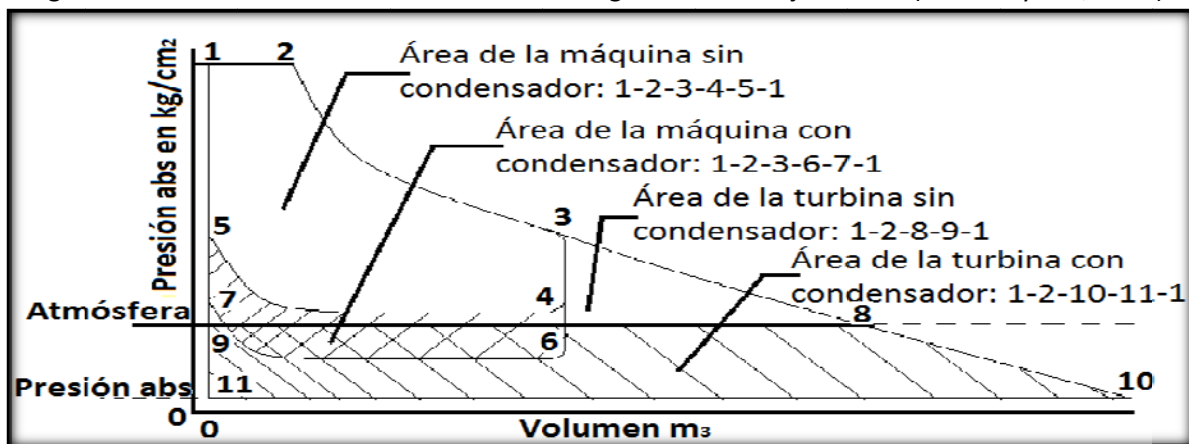
$H_C$ : Contenido de calor del agua condensada a la temperatura que prevalece en el depósito de agua condensada del condensador durante la prueba en cal/h

$H_E$ : Contenido de calor del agua a la temperatura del punto de ebullición que corresponde a la presión absoluta que prevalece en la platina del tubo de escape de la turbina en cal/h. (Severns y col., 1961).

#### II.5.3.4 CONDENSADOR

Los condensadores de vapor son aparatos en los cuales se condensa el vapor de escape procedente de máquinas y turbinas, y de donde el aire y otros gases no condensables son evacuados en forma continua. Hay dos ventajas al usar condensadores en las máquinas de vapor y turbinas de vapor: 1) Disminución de la presión de escape y aumento de energía utilizable, y 2) Recuperación del condensado para utilizarlo como agua de alimentación para las calderas. La condensación del vapor de agua en un recinto cerrado produce vacío parcial, debido a la gran disminución de volumen experimentada por el vapor a baja presión.

Figura II.70. Efecto del condensador sobre un diagrama de trabajo teórico (Severns y col., 1961)



En la Figura II.70 se muestra el aumento de trabajo que es posible efectuar mediante el empleo de condensadores. Las turbinas de vapor de agua son capaces de expansionar el vapor hasta las mínimas presiones de escape alcanzables, debido a que son máquinas de flujo constante y pueden

tener grandes aberturas de escape a cuyo través de descarga el vapor ya utilizado. En cambio, las máquinas de vapor son máquinas de flujo intermitente que tienen que obligar a pasar el vapor expansionado a través de válvulas de escape relativamente pequeña.

### Tipos de condensadores

- a) **Condensadores de superficie:** Proporcionan una baja presión de escape y al mismo tiempo permite recuperar el condensado. Consiste en un cilindro de hierro colado, o de chapa de hierro, con tapa porta tubos en cada extremo, las cuales unen entre sí una multitud de tubos que forman la superficie de enfriamiento. El vapor de escape entra en el condensador por un orificio situado en la parte superior de la envolvente, y el agua de recuperación pasa por el interior de los tubos (Severns y col., 1961).
- b) **Condensadores de chorro:** Proporcionan baja presión de escape, debido a que el condensado se mezcla con el agua de refrigeración. Pueden ser de nivel bajo o barométricos son similares en la forma en la cual el vapor de escape y el agua de refrigeración se ponen en contacto, la diferencia estriba en el método de evacuar el agua y el condensado. Los condensadores de chorro en los cuales el agua de refrigeración, el condensado y los gases no condensables son evacuados por medio de una sola bomba, se denominan condensadores de chorro, de vacío reducido y de nivel bajo, debido a la limitada capacidad de aire de la bomba.

### Calor absorbido por un condensador

El tamaño del condensador y equipo anexo depende de la entalpía total del vapor entrante, y de la cantidad y temperatura del agua de refrigeración. Cuando el condensador va directamente acoplado a un grupo generador-máquina, o generador-turbina, de vapor, sin recalentamiento o extracción, la entalpía suministrada al condensador es la suministrada a la máquina motriz, cuyo escape va al condensado, menos la convertida en trabajo y la consumida en pérdidas del generador, rozamientos, convección, radiación y otras pérdidas no determinables fácilmente. Por lo que se puede escribir la siguiente ecuación:

$$h_x = h_t - \frac{860K}{e_m m_s} \quad (II-41)$$

Donde

$h_x$ : Entalpía del vapor en el escape, kcal/kg

$h_t$ : Entalpía del vapor en la estrangulación, kcal/kg

860: Equivalente de 1kW-hora, kcal/kW – h

K: Carga de la máquina motriz, kW

$m_s$ : Vapor suministrado a la máquina motriz, kg/h

$e_m$ : Rendimiento eléctrico y mecánico combinado de la máquina motriz, expresado en fracción decimal incluyendo todos los rozamientos, pérdidas eléctricas, resistencia exterior del aire, convección y radiación.

### **II.5.3.5 SOBRECALENTADORES**

Los sobrecalentadores también llamados recalentadores, son simples intercambiadores de calor, destinados a comunicar energía adicional al vapor además de la que posee en el estado de saturación a una presión dada. Esto se logra por medio del calor absorbido por radiación del quemador o por el calor de los gases de combustión para sobrecalentar el vapor a un nivel predeterminado. El sobrecalentamiento elimina la humedad del vapor y aumenta la eficiencia de la máquina de vapor reduciendo pérdidas iniciales por condensación (Gaffert, 1954).

Los sobrecalentadores se clasifican en tres tipos: de radiación, de convección o combinados, este último es mejor para mantener constante la temperatura de vapor. En un sobrecalentador de metal los tubos trabajan a una temperatura alta debido a la transmisión del calor que hay en los gases de combustión al metal del tubo y de éste al vapor. Por esto, las primeras secciones se disponen a contra corriente, mientras que en los pasos secundarios la circulación en paralelo ayuda a reducir el esfuerzo térmico de la pared del tubo. Por ésta razón el metal del tubo debe tener una resistencia alta a las temperaturas altas y una gran resistencia a la oxidación.

### **II.5.3.6 ECONOMIZADORES**

Los gases de combustión que salen de las superficies calentadas por convección llevando todavía una cantidad considerable de energía térmica a una temperatura alta. Parte de esta energía se puede recobren unidades llamadas economizadores. Ésto se traduce en un aumento en la eficiencia del generador de vapor, ya que ésta se eleva alrededor de 1% por cada 10°F de elevación de temperatura del agua de alimentación.

Los economizadores son unidades que están formados por grupos de tubos de acero construidos para resistir altas presiones que están integradas al cuerpo del generador de vapor. Los economizadores usan tubos de diámetro pequeño con paredes delgadas formando grupos compactos. El funcionamiento de los economizadores inicia cuando los gases de la combustión calientes pasan sobre la superficie de los tubos, entregando su calor al agua de alimentación que circula por el interior de los tubos. En el economizador el agua de alimentación entra a un tambor principal y fluye a través de sus tubos para después pasar por un segundo tambor, y de ahí descarga ya caliente al sistema de circulación de la caldera. En casi todos los diseños el agua circula de atrás hacia adelante en contracorriente con la trayectoria de los gases e intercambiando de esta manera el calor de los gases (Elonka y Robinson, 1981).

### **II.5.3.7 CALENTADOR DE AIRE O PRECALENTADOR**

Los calentadores de aires son unidades que se usan para calentar el aire necesario para la combustión, aprovechando el calor de los gases producto de la combustión, después que han pasado por el economizador. La temperatura del agua de alimentación señala el límite al cual pueden enfriarse los gases provenientes de la combustión. Los gases que salen del economizador todavía salen calientes, para recuperar este calor y elevar la eficiencia del ciclo se usa el calentador de aire. Este aparato entrega el calor de los gases al aire necesario para la combustión.



La energía recuperada regresa, con el aire al horno y reduce la cantidad de calor que debe liberar el combustible para mantener a una temperatura dada, ahorrando combustible. Con esto disminuyen las pérdidas que escapan por la chimenea y hay una capacidad alta de vaporización.

### Tipos de calentadores de aire

- a) **Calentador de aire tipo plano:** Está formado por pasos angostos alternados para el paso del aire y de los gases calientes. Tienen placas desviadoras que guían la dirección del aire para hacer un mejor uso de la superficie transmisora de calor (González, 1974)
- b) **Calentador de aire tipo tubular:** Está formado por varias hileras de tubos, el aire circula sobre el exterior de los tubos y los gases a través del interior. En algunos casos las hileras de tubos tienen forma de S para mejorar la distribución del aire.
- c) **Calentador de aire tipo regenerativo:** Está formado por un rotor construido por elementos corrugados entre los que hay pasos angostos. Este rotor gira, pasando a través del cañón de salida del gas y después a la zona de entrada de aire. El gas al circular por los pasos calienta al rotor, el cual ya caliente, gira a la zona de entrada del aire, para calentar a éste al circular por los mismos pasos del rotor. De ésta manera el rotor transmite el calor del gas al aire.

Los precalentadores tienen un gran peligro que es la corrosión, pero ésta se puede evitar limitando el enfriamiento del gas a una temperatura superior al punto en donde se convierte en rocío, con esto se evita la formación de humedad que la combinarse con el dióxido de azufre del gas formarían un ácido que atacaría las partes metálicas de la unidad.

### II.5.3.8 DEAREADORES

Los equipos que operan y conducen condensado, agua de alimentación o vapor, son muy vulnerables a los efectos de la corrosión debido a la acción de los gases disueltos, tales como oxígeno, bióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. El oxígeno disuelto causa corrosiones y picaduras en los metales ferrosos. El bióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno atacan tanto los metales ferrosos como los no ferrosos, disminuyendo el pH de la solución. El agua en contacto con el aire disuelve el oxígeno y la solubilidad es mayor cuanto más baja es la temperatura de ebullición. Por otra parte cuanto mayor es la presión mayor es la solubilidad.

El método más usado es la deareación, para eliminar los gases disueltos, y el aparato que se usa se llama deareador. El deareador no solo cumple con la misión de eliminar el oxígeno y otros gases sino que presenta además la ventaja de sustituir al convencional tanque de alimentación. El proceso de deareación es el siguiente, un gas cualquiera. Es soluble en el agua en proporción a sus propias presiones. En una atmósfera cualquiera, la presión total es igual a la suma de las presiones parciales de los gases presentes. Cuando el agua se calienta hasta el punto de ebullición, la presión del vapor de agua será igual a la presión total de la atmósfera que presiona sobre el agua y en consecuencia la solubilidad de los gases se vuelve cero (Gaffert, 1954).

### II.5.3.9 TORRES DE ENFRIAMIENTO

En las torres de enfriamiento se emplean varios mecanismos de refrigeración pero el más importante es el que emplea evaporación del agua para enfriar el resto, la evaporación de un kilogramo de agua substra aproximadamente 580 calorías.

#### **Tipos de sistemas de enfriamiento por evaporación**

**Estanque de enfriamiento:** Es el más simple de los métodos para enfriar agua por evaporación, pero el menos eficiente, su principal ventaja estriba en poder construirse fácil y económicamente levantando un dique de tierra, pero tiene la desventaja de requerir una superficie grande que, a igualdad de carga térmica, puede ser 20 veces mayor que la de un estanque con aspersores ó 500 a 1,000 veces la de una torre con tiro mecánico.

**Estanque con aspersores:** Es uno al que se le ha colocado a un metro y medio sobre la superficie del agua de un sistema de toberas o aspersores cuyo objetivo es producir una especie de lluvia que aumenta notablemente la superficie de contacto entre el agua y el aire.

**Torres de ventilación por viento:** Son aquellas en las que la circulación del aire depende del viento, el flujo del viento es cruzado con respecto al flujo de agua. Hay dos modalidades para este tipo de torres:

- a) Sin relleno dispersor o llenas de agua de lluvia, es ésta la dispersión para aumentar la superficie de contacto entre el agua y el aire se logra únicamente a base de toberas, colocadas en la parte superior de la torre.
- b) Con relleno dispersor, este tipo contienen en su interior una serie de elementos generalmente madera, que dispersan el agua al ir cayendo y aumentan el tiempo de contacto entre el aire y el agua.

**Torres de tiro natural:** Son torres en la que el flujo de aire es conducido por una chimenea de grandes dimensiones colocadas arriba del relleno de la torre, el tiro resulta de varios efectos combinados siendo el principal la diferencia de densidades entre el aire saturado de humedad saliendo de la torre y el aire entrando a la torre, debido a que mientras más humedad tiene el aire, menor es su densidad.

**Torres de tiro mecánico:** Son aquellas que utilizan ventiladores para mover el aire a través de la torre, esto da al diseñador un control absoluto sobre la cantidad de aire.

**Torres de tiro forzado:** Las torres de tiro forzado tienen uno o varios ventiladores localizados a la entrada del aire, que lo impulsan a través de la misma.

**Las torre de tiro inducido:** Tienen los ventiladores colocados a la salida del aire de la torre, pueden ser de contra flujo son aquellas que el flujo de aire es vertical, o de flujo cruzado el aire viaja en forma horizontal (Skrozki y Bernhardt, 1972).

### II.5.3.10 BOMBAS

En las plantas de generación es indispensable el empleo de un determinado número de bombas para mover de un punto a otro los líquidos que se manejan.

El número de bombas, su capacidad, su ubicación, etcétera, varía en cada planta. Las clases de bombas son las siguientes:

- a) **Recíprocas:** Son las bombas en las cuales un émbolo es el órgano móvil que imprime energía o movimiento al líquido. Estas bombas comprenden dos partes principales. Una llamada extremo del líquido que es por donde pasa el líquido bombeado y otra llamada extremos de potencia. Cuando la bomba es accionada por vapor, el extremo de potencia recibe el nombre de extremo de vapor. Pueden ser de simple o de doble efecto de uno o de dos émbolos y horizontales o verticales (Luca, 1995).
- b) **Centrífugas:** Las bombas de esta clase utilizan la acción de la fuerza centrífuga para imprimir energía al bombear el líquido. Pueden ser del tipo voluta que pueden ser uno o varios pasos horizontales o verticales. De tipo difusor encuentran muchas aplicaciones como bombas de varios pasos para alta presión. Y las de tipo axial o de flujo mixto son muy convenientes para bajas presiones y gran capacidad.
- c) **Rotatorias:** Las bombas rotatorias o de desplazamiento positivo, basan su operación en el hecho de que dos tornillos, dos engranes, dos lóbulos girando, atrapan el líquido en el lado de succión y lo impulsan al lado de descarga. Estas bombas están destinadas a manejar líquidos viscosos como, petróleo crudo, aceite, etc.

### II.5.4 SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIOGÁS

#### II.5.4.1 SISTEMAS CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON BIOGÁS

Los motores de combustión interna (CI) se construyen aplicando una variedad de ciclos termodinámicos. Los tipos pueden variar entre sí en sus características, como flexibilidad, combustible usado, factibilidad para el arranque, peso, costo, etc., pero todos tienen muchos detalles en común como: El uso de un pistón y un cilindro para crear una cámara de volumen variable en la que se pueda llevar a cabo el ciclo. Existen investigaciones en las que modifican motores de combustión interna para la utilización de biogás como combustible.

Las pruebas que se realizaron se llevaron a cabo en Bogotá donde las condiciones atmosféricas son presión de 0.73 atm, a 2,600 msnm, 18 °C y 60% de HR (humedad relativa) en promedio.

#### Alimentación de biogás

Las partes que fueron montadas y que componen el sistema de alimentación de biogás al motor son: Cilindro, regulador de alta presión, regulador de baja presión, válvula de bola, válvula anti-retorno, contador, acumulador y surtidor en el carburador.

Las mezclas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> fueron adquiridas en cilindros a alta presión (5,000 kPa). Sin embargo el suministro de gas al motor se debe hacer a presión atmosférica para evitar un efecto de sobrealimentación. Por lo anterior, se corre con el riesgo de congelamiento del CO<sub>2</sub> debido a la reducción drástica de presión. Para evitar este efecto, se instalan dos reguladores de presión sobre la línea de alimentación de gas: El primero, de alta presión, que reduce hasta 75 psi (517 kPa); y el segundo, de baja presión, que opera hasta 3 psi (20.68 kPa), que es la necesaria para vencer la válvula anti-retorno. Esta válvula se instala como implemento de seguridad para evitar, en el caso de inicio de combustión en la línea de suministro de gas, que la llama avance en dirección al cilindro. Una válvula de bola se instala para realizar fácilmente el corte o suministro del flujo de gas que llega al contador y que luego, a la misma presión atmosférica, se almacena en el acumulador. En el contador se mide el consumo de gas en litros. El acumulador se adiciona al sistema de alimentación de gas para que el motor aspire el gas necesario para su funcionamiento sin llegar a generar sobrealimentación en la mezcla. El dosificador de gas llega al carburador por medio de una tobera que mezcla el gas del cilindro con el aire que viene del tanque. Esta tobera que mezcla el combustible con el aire se denomina mezclador.

El dosificador se elabora de manera similar al surtidor que porta el carburador para el funcionamiento con gasolina, pero con unas características que permitan la mayor aproximación posible a la relación aire-combustible estequiométrica para cada mezcla de gas utilizada (Mantilla y col., 2008)

### **Encendido**

Los principales componentes del sistema de encendido son: Batería, interruptor, bobina, distribuidor, platinos y bujía. El sistema de encendido original no permite adelantar el ángulo de salto de la chispa debido a su naturaleza magnética. Por ésta, razón se implementa un sistema eléctrico de distribuidor junto con una batería y una bobina. Para controlar el encendido eléctrico se adiciona un interruptor entre la batería y la bobina. El montaje del distribuidor en el banco de pruebas permite su giro para el adelanto y el atraso de la chispa. Además se construyen un par de poleas dentadas con relación 2 a 1, una de ellas en el distribuidor y la otra en el cigüeñal del motor, con el fin de transmitir el movimiento correctamente (Mantilla y col., 2008)

### **Combustible empleado**

Un digester puede producir biogás con diferentes proporciones en el contenido de metano y CO<sub>2</sub>; el porcentaje de metano está entre 40% y 70%, dependiendo del material orgánico con el que se alimenta el digester. Porcentajes aún mayores de metano, hasta 95%, pueden lograrse eliminando el CO<sub>2</sub> para de esta forma mejorar el poder calorífico del biogás. Dado que esta variación en el porcentaje de metano implica el manejo de diferentes variables que no son del alcance de este trabajo, se puede optar por adquirir mezclas patronadas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> que simulen tres diferentes combinaciones de gases obtenidos en un digester (Mantilla y col., 2008)

Las propiedades de los gases empleados frente a la gasolina varían considerablemente desde el punto de vista del montaje, especialmente en que el gas es incoloro y sin olor, por lo que la instalación de mangueras y reguladores debe ser estricta. Así mismo, el gas es totalmente seco y

no presenta las características de refrigeración y lubricación que sí tiene la gasolina, con lo que el motor presenta condiciones diferentes de funcionamiento. Como se muestra en la Tabla II.34.

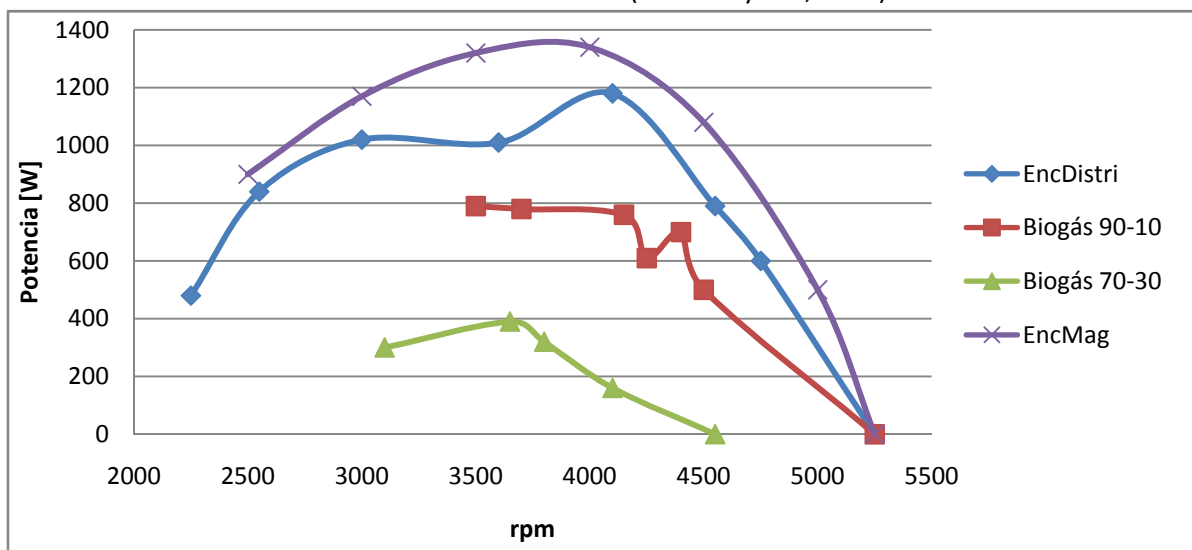
Tabla II.34: Densidades de las mezclas y poder calorífico inferior (Mantilla y col., 2008)

Combustible	Densidad a 15.6°C kg/m <sup>3</sup>	PCI(kJ/kg)
Gasolina	739.000	46,522.5
90% metano 10% CO <sub>2</sub>	0.800	38,258.81
70% metano 30% CO <sub>2</sub>	1.037	22,927.41
50% metano 50% CO <sub>2</sub>	1.275	13,319.73

El posible riesgo de tener mezclas con CO<sub>2</sub> a altas presiones y requerirlas posteriormente a condiciones atmosféricas para el funcionamiento del motor, es el congelamiento del CO<sub>2</sub> al expandirse antes de entrar a la cámara de combustión, lo que obliga a utilizar un calentador en los puntos donde se realice esta expansión.

Inicialmente se pueden realizar pruebas sin hacer cambios al encendido magnético del motor. Obtuvieron una potencia máxima de 1.8 HP (1.34 kW) a 4,000 rpm. Posteriormente instalaron un distribuidor que permite la modificación del ángulo de salto de la chispa. Esta modificación (montaje de un distribuidor y una correa para la transmisión del movimiento) implica la disminución de la potencia máxima hasta 1.6 HP (1.19 kW). Tal como se muestra en la Figura II. 71 en la curva identificada como "EncDistri". Esta última curva es la que tomaron como línea base para las comparaciones cuando el motor utiliza las mezclas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.

Figura II.71: Potencia contra velocidad de giro del motor encendido con distribuidor para diversos combustibles considerados (Mantilla y col., 2008)



La reducción de la potencia, respecto al funcionamiento con gasolina, al emplear mezclas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, es evidente al analizar la Figura II.71 y la Tabla II.35. Se puede observar además que el intervalo de velocidades de funcionamiento del motor al aplicar la carga es menor al que se obtiene con gasolina, debido a que las mezclas de gas no tienen el suficiente poder calorífico para

trabajar altas cargas a bajas velocidades de giro del motor. Por otro lado, se observa también que la curva de funcionamiento se desplaza hacia menores velocidades de giro a medida que aumenta la cantidad de CO<sub>2</sub> en la mezcla, ya que se necesita más tiempo para encender el combustible, y a altas velocidades de giro no se cuenta con ese tiempo a pesar de hacer un ajuste importante en el ángulo de salto de la chispa.

Tabla II.35. Resultados obtenidos para potencia empleando diferentes combustibles  
(Mantilla y col., 2008)

Combustible	Potencia máxima (HP(kW) a rpm)	Mínima rpm con carga	Máxima rpm con carga cero	Ángulo de chispa (grados)	Diferencia porcentual de la potencia con gasolina
Gasolina	1.58(1.18)a4110	2200	5300	35	--
90% de CH <sub>4</sub>	1.04(0.8)a3500	3500	5300	46.5	32%
70% de CH <sub>4</sub>	0.54(0.40)a3660	3100	4600	55	66%
50% de CH <sub>4</sub>	0.06(0.045)a2900	2300	3000	58	96%

En el funcionamiento con la mezcla 50% de CH<sub>4</sub> y 50% de CO<sub>2</sub> el arranque en frío del motor no es difícil, contrario a lo que se piensa. La máxima velocidad de giro que se consigue es de 3,100 rpm para varios ángulos de salto de chispa. Al intentar frenar el motor su velocidad de giro cae rápidamente hasta llegar a apagarse, es decir, no tiene un funcionamiento estable bajo carga. La lectura de carga apenas fue la mínima que se puede observar en la escala del equipo empleado.

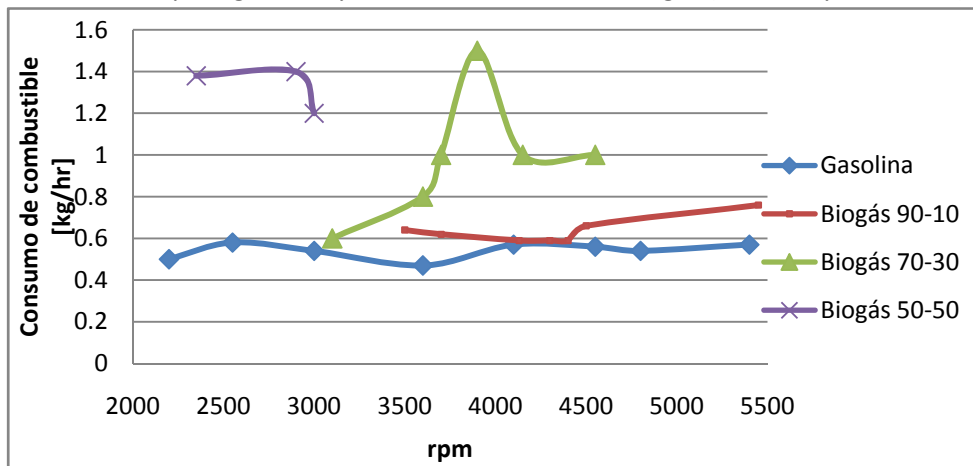
Cabe notar que los datos obtenidos reportados para la prueba de potencia fueron ajustados utilizando una corrección por condiciones atmosféricas tal como lo recomienda SAE (Society of Automotive Engineers) en su norma SAE J1349. Los resultados para pruebas hechas a presiones atmosféricas diferentes a la estándar deben ajustarse a ésta, en donde se ha convenido que el aire seco a 15.6 °C (60 °F) y 76 cm de Hg. (29.92 in Hg) represente las condiciones a nivel del mar o estándar.

Al realizar la corrección puede decirse que la potencia producida por el motor de cuatro tiempos queda dependiendo de las condiciones atmosféricas requeridas para que el motor funcione, si el motor trabaja en una región con presión barométrica baja habrá una reducción de la potencia producida, y análogamente, si la temperatura del aire que entra en el motor es elevada la potencia producida será menor (Obert, 2000).

### Consumo de combustible

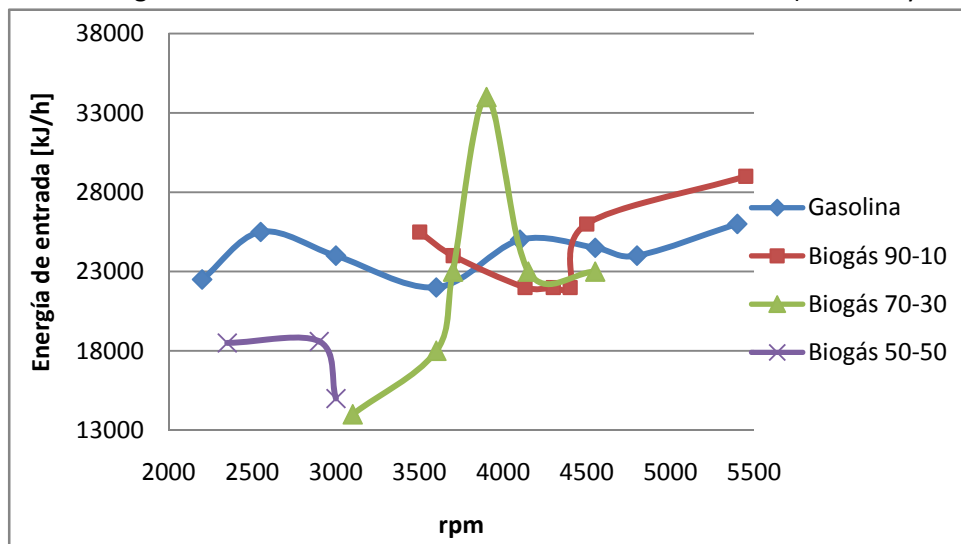
En la Figura II.72 puede notarse que el consumo en masa para las mezclas de gas es ligeramente mayor que el de gasolina para todo el rango de revoluciones de funcionamiento del motor. Dado que la gasolina se encuentra en estado líquido y las mezclas en estado gaseoso, estas últimas requieren altas presiones para poder almacenar el combustible necesario que permita tener la misma autonomía que con la gasolina. Otra razón tiene que ver con que el poder calorífico inferior de las mezclas de gases es progresivamente menor que el de la gasolina, a medida que el CH<sub>4</sub> en la mezcla disminuye.

Figura II.72. Consumo de combustible frente a revoluciones para el motor encendido con distribuidor para gasolina y las diferentes mezclas de gas (Mantilla y col., 2008)



Si bien la Figura II.72 muestra las diferencias en cuanto a consumo másico, se debe tener en cuenta que se están comparando combustibles con densidades muy diferentes. Para realizar un contraste más real se requiere analizar los datos de la Figura II.71 la cual, contiene la energía dentro del combustible que entra al motor. En esta figura se aprecia que, a pesar de que el consumo másico de combustible es mucho mayor para las mezclas de gas, comparado con gasolina, la energía de entrada apenas sobrepasa en algunos puntos a la energía de entrada de la gasolina. Durante el desarrollo del presente trabajo, el gas se introdujo al motor a presión atmosférica, lo que indica que para las condiciones de carga y velocidad del motor los datos reportados en la Figura II.73 son los máximos disponibles, pero la energía de entrada es menor que para la gasolina. Entonces puede pensarse que una alimentación de gas combustible a presiones mayores que la atmosférica trae como consecuencia el igualar la energía de entrada al motor con respecto a la gasolina. De esta forma sería factible aumentar la salida de potencia y de torque.

Figura II.73: Energía de entrada al motor de los diferentes combustibles (Mantilla y col., 2008)



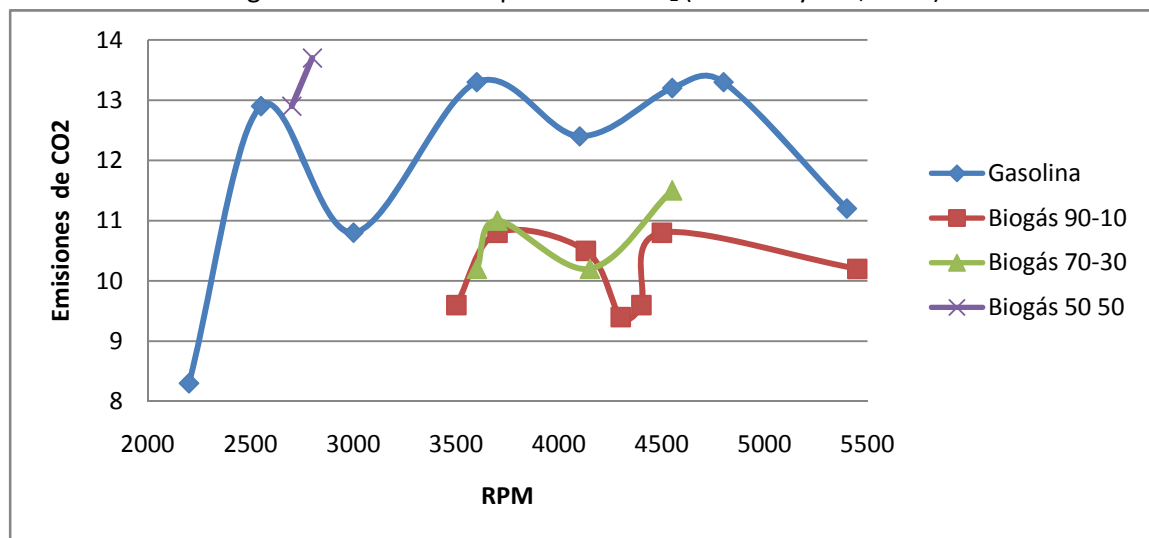
En la Tabla II.36 se muestra la cantidad de carbono del combustible que se convierte en hidrocarburos HC, CO y CO<sub>2</sub>, a medida que aumenta el contenido de CO<sub>2</sub> en las mezclas, más carbono se convierte en CO<sub>2</sub> y la potencia de salida disminuye.

Tabla II.36. Relación entre producción de emisiones a partir del carbono en el combustible (Mantilla y col., 2008)

Combustible	Masa promedio en combustible kg	% del carbono en el combustible que se convierte en CO	% del carbono en el combustible que se convierte en CO <sub>2</sub>	% del carbono en el combustible que se convierte en HC	Potencia de salida promedio W
Gasolina	0.44	0.19	0.81	0.004	736-37
90% de CH <sub>4</sub> 10% de CO <sub>2</sub>	0.39	0.09	0.91	0.002	685.87
70% de CH <sub>4</sub> 30% de CO <sub>2</sub>	0.55	0.01	0.98	0.001	293.44
50% de CH <sub>4</sub> 50% de CO <sub>2</sub>	1.04	0.005	0.99	0.0016	37.24

Como se observa en Figura II.74 y en la Tabla II.36, la emisión de CO<sub>2</sub> específica aumenta para estos combustibles, por lo tanto más carbonos del combustible se queman completamente. Ahora bien: definitivamente contribuye a la mayor emisión de CO<sub>2</sub> el hecho de que el combustible gaseoso tenga dentro de sus componentes esta especie. Sin embargo, se puede afirmar que la combustión es mejor, ya que la proporción de CO<sub>2</sub> en el escape está en mayor proporción que la cantidad de CO<sub>2</sub> en el combustible original.

Figura II.74: Emisión específica de CO<sub>2</sub> (Mantilla y col., 2008)



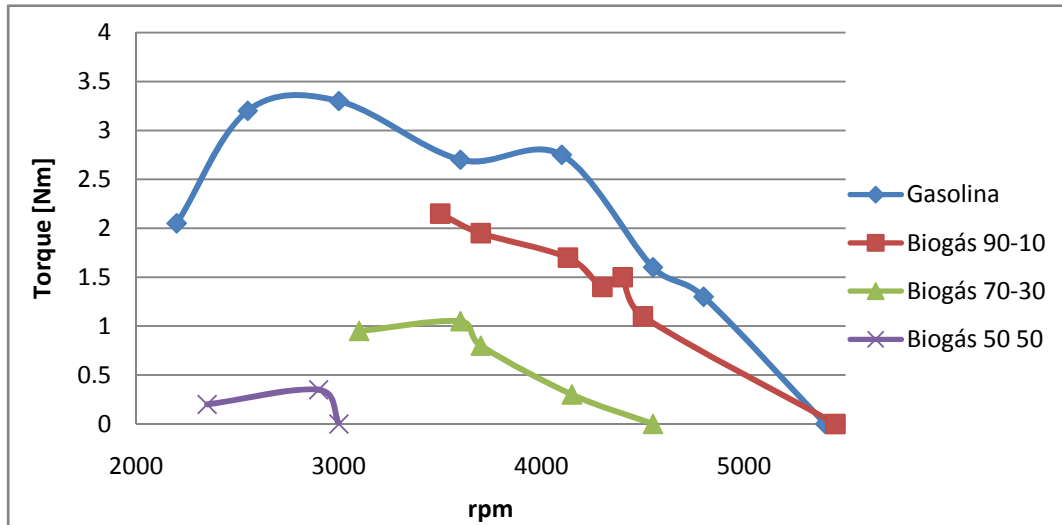
### Torque

En Figura II.75 se observa el comportamiento del torque para las diferentes mezclas de gases. El porcentaje de pérdida de torque respecto al funcionamiento con gasolina es 34% para la mezcla 90% de CH<sub>4</sub> y 10% de CO<sub>2</sub>, y del 68% para la mezcla 70% de CH<sub>4</sub> y 30% de CO<sub>2</sub>. La disminución del



torque está ligada a la reducción de CH<sub>4</sub> en la mezcla, similar a lo que sucede con la potencia. La tendencia, como es de esperar, es la de aumentar este valor a medida que disminuye el CH<sub>4</sub> en la mezcla porque el tiempo necesario para iniciar la combustión debe ser mayor.

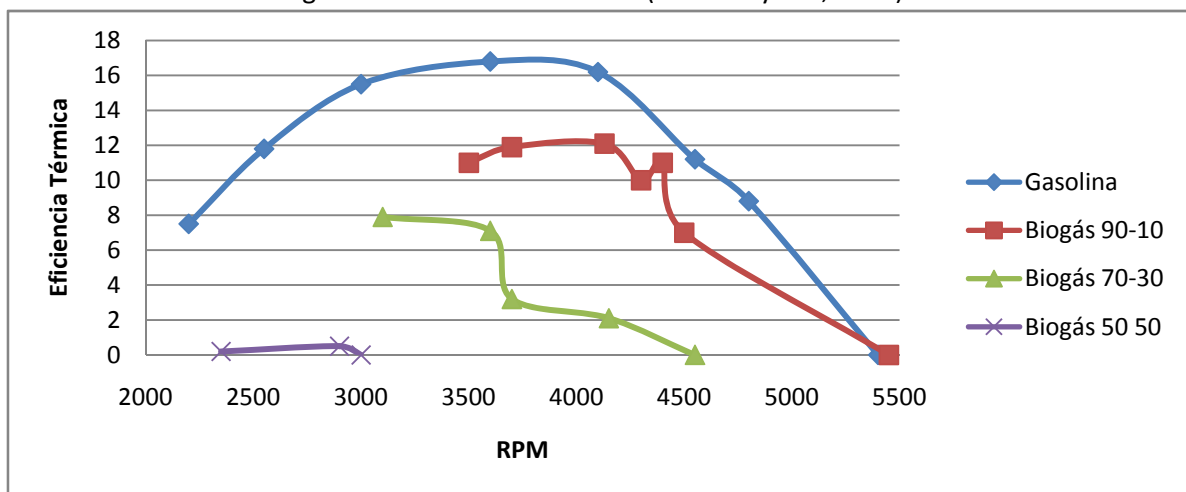
Figura II.75: Torque contra velocidad de giro del motor encendido con distribuidor (Mantilla y col., 2008)



**Eficiencia térmica**

La eficiencia térmica, mostrada en la Figura II.76, relaciona la energía de salida del motor (en forma de potencia) con la energía de entrada al motor (Figura 6). La eficiencia térmica en general es menor para los combustibles gaseosos por efecto directo de la disminución de potencia.

Figura II.76. Eficiencia térmica (Mantilla y col., 2008)



**II.5.4.2 SISTEMA CON TURBINA DE GAS**

Las microturbinas a gas constituyen un tipo de turbinas que han pasado de la etapa de prototipo experimental a convertirse en una alternativa factible para la generación eléctrica a pequeña

escala. Estas microturbinas pueden suministrar energía eléctrica de forma local desde unos pocos kW hasta algunos centenares de kW, con conexión en paralelo a la red o en sistema aislado, como una fuente independiente de energía.

### **Características de las microturbinas a biogás**

El término de microturbinas describe a un sistema de dimensiones relativamente pequeñas, son unidades compactas compuestas por un compresor, cámara de combustión, turbina y un generador eléctrico. Son sistemas generadores de energía eléctrica, con pequeñas cámaras de combustión, también se puede aprovechar los gases de escape para la producción de aire caliente (cogeneración) (UMSS, 2004). Las características de las microturbinas a biogás son:

- El rango de generación es de 15 a 250 kW
- Mantenimiento: Mínimo. Como ejemplo se puede mencionar que la mayoría de las turbinas tienen más de 20,000 horas de operación y el único mantenimiento ha consistido en cambios de filtros de aire
- Más pequeñas y compactas
- Más ligeras
- Tienen muy buena eficiencia incluso a cargas parciales
- Operan sin vibración, debido al flujo continuo de combustible y aire
- Generan menos ruido
- No requieren tratamiento de los gases de escape, por tener bajas emisiones
- Tiempo de operación: 40,000 – 75,000 horas
- Combustibles posibles a utilizar: Gas natural, GLP, diesel, etanol, biogás, gasolina

#### **II.5.4.3 SISTEMA CON TURBINA DE VAPOR**

El biogás como combustible que utiliza la microturbina, previamente, se debe acondicionar este gas en la unidad de tratamiento de gas, específica para la microturbina, donde se realizan los siguientes procesos:

- Limpieza de compuestos de siloxane y ácido sulfhídrico
- Elevación de la presión a la de trabajo para la microturbina
- Refrigeración para el secado de gas
- En el interior de la microturbina se produce la combustión del biogás, que se convierte en energía eléctrica en los alternadores. En el recuperador de calor se produce un aprovechamiento del calor de los gases de escape de la microturbina, mediante un intercambiador

La unidad de tratamiento de gas, la microturbina, el recuperador de calor y los equipos auxiliares necesarios para su funcionamiento (compresores, filtro de carbón activo y refrigerador) que, con la excepción del refrigerador, no son los mismos que los de la planta del BNCC, se instalaron en la parte superior de los contenedores metálicos de la planta. Esta solución comportó la necesidad de

construir una estructura metálica auxiliar para soportar el peso de todos los equipos necesarios (CITACC, 2010).

### **Características técnicas y de funcionamiento de la turbina**

La microturbina genera energía a partir del flujo de gas caliente procedente de la combustión del gas en el aire comprimido entrante, arriba hay un compresor acoplado mecánicamente a la turbina, donde está la cámara de combustión. La energía se produce cuando el aire comprimido se mezcla con el combustible y se enciende en la cámara de combustión. Los gases resultantes se dirigen directamente a las aspas, haciendo girar el eje de la turbina, y mecánicamente, ejerciendo fuerza sobre el compresor. Al final, los gases pasan a través de una pipeta, que acelera los gases de la combustión al volver a una presión atmosférica, y produciendo más empuje. La energía se extrae a partir de un eje de fuerza, aire comprimido, empuje y de sus combinaciones. Se utiliza en aviones, trenes, barcos, generadores eléctricos, etc.

Las turbinas de gases industriales tienen gran variedad de dimensiones, desde un contenedor móvil hasta una gran planta de sistemas complejos. Son especialmente eficientes, por encima del 60%, cuando el calor de la salida de escape se aplica a un intercambiador de calor para calentar el vapor de entrada de la turbina de vapor, creando un ciclo combinado. También se puede hacer la configuración de cogeneración focalizando la chimenea para calentar agua o una cámara. Además, mediante una nevera de absorción se consigue frío para refrigerar. La configuración de cogeneración puede superar el 90% de eficiencia energética. Las turbinas de vapor más grandes, utilizadas para la generación eléctrica, operan a 3,000 rpm para encajar con la frecuencia de la red y disponer de una mínima caja de cambios. Al igual que los motores, la turbina requiere una estructura de cierre específica.

Las microturbinas son ampliamente utilizadas para la generación distribuida, y en aplicaciones que requieren calor y electricidad simultáneamente. Abarcan desde unidades pequeñas como la palma de la mano, que producen menos de un kW, a unidades o comerciales, que producen centenares de kW. Parte de su éxito se debe a las aplicaciones electrónicas, que permiten una operación telemática y su acoplamiento a la red eléctrica. La tecnología conmutada de electrónica de potencia elimina la necesidad de que el generador esté sincronizado con la red eléctrica. Esto permite que el generador esté integrado con la turbina y, además, sirva como motor de puesta en marcha (CITACC, 2010).

### **Ventajas de las microturbinas**

Los sistemas con microturbinas tienen muchas ventajas respecto a los motogeneradores recíprocos, con mayor densidad de potencia respecto a su medida comparada, y emisiones extremadamente bajas de gases de combustión a la atmósfera, y también una única parte móvil. Estos sistemas se diseñan con cojinetes concéntricos que pierden el contacto cuando el eje gira a gran velocidad, evitando el uso de lubricante típico para cojinetes de rodamiento, ya que no se produce rodamiento. Para este sistema tampoco se precisa presurización externa, puesto que el

cojinete se genera automáticamente por hidrodinámica del flujo de aire cuando se crea la alta presión. La refrigeración de la microturbina no precisa lubricante ni ningún otro material peligroso.

Las microturbinas también tienen la ventaja de disponer de la mayor parte de calor, a temperatura bastante alta, en la chimenea, mientras que el calor en un motogenerador se pierde, en parte, entre la chimenea y el sistema de refrigeración. Los motogeneradores son más rápidos para responder a los cambios de potencia de salida a causa de la irregularidad de la demanda, y son eléctricamente más eficientes, aunque la eficiencia de las microturbinas se esté incrementando. Éstas también pierden eficiencia a niveles de baja potencia respecto a los motogeneradores. Las microturbinas aceptan, además de la mayor parte de combustibles comerciales, los combustibles de origen renovable como el gas de vertedero, y los de digestión anaeróbica o de plantas depuradoras de aguas residuales.

Los diseños de microturbinas suelen consistir en un compresor y una turbina radial de simple etapa y un recuperador, difícil de diseñar y fabricar, porque trabaja a alta presión y temperatura diferencial. El calor de las chimeneas puede servir para calentar agua, procesos de secado o para neveras de absorción, que crean frío para el aire acondicionado a partir de la energía del calor. La eficiencia típica de la microturbina se sitúa entre el 5 y el 35%, aunque cuando se trabaja en un sistema de cogeneración con calor y electricidad, las eficiencias se incrementan por encima del 80% (CITIB, 2010).

#### **II.5.4.4 SISTEMA CON CELDA DE HIDRÓGENO**

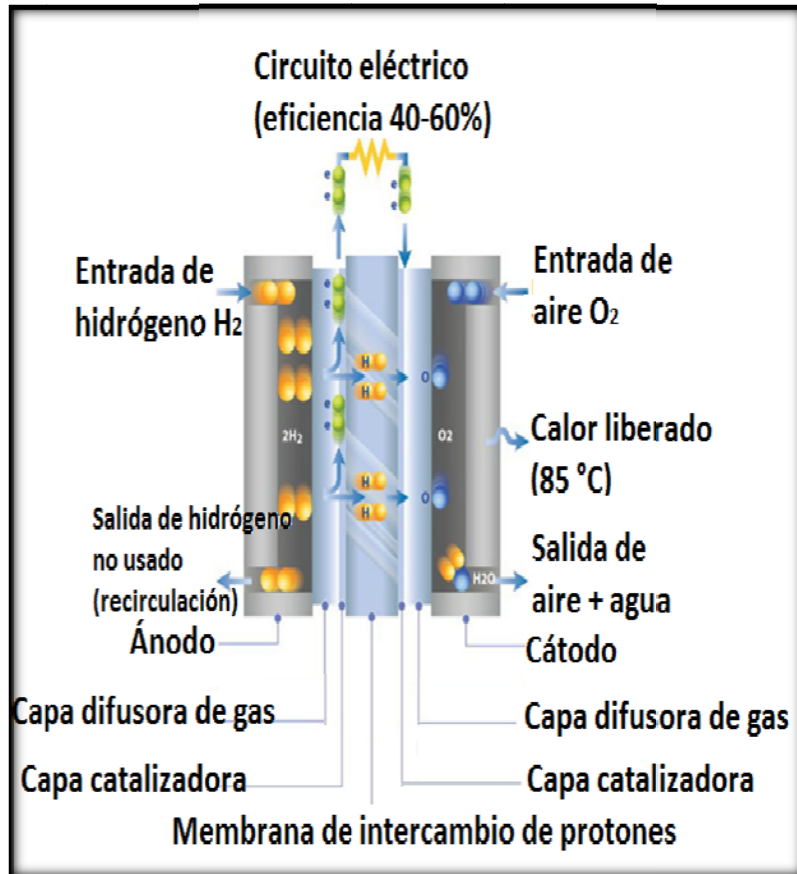
En 1839, William Robert Grove descubrió las celdas de hidrógeno gracias a los estudios sobre la electrólisis del agua que realizaba. Grove decía que era posible reversar el proceso, haciendo reaccionar el hidrógeno con el oxígeno para generar energía. El término celda de combustible fue introducido en 1889 por Ludwing Mond y Charles Langer, quienes construyeron la primera celda utilizando aire y gas de carbón industrial.

El primer éxito del uso de las celdas de combustible ocurrió en 1932 cuando el ingeniero Francis Bacon cambió el platino que era un catalizador costoso y que fue usado por Mond y Langer por un electrolito alcalino, menos corrosivo y costoso que fueron los electrodos de níquel y utilizó una celda de hidrógeno y oxígeno. Pero no fue hasta 1959 cuando Bacon y sus colaboradores pudieron demostrar un sistema de cinco kilovatios capaz de dar energía a un equipo de soldadura. En los últimos años de la década de 1950, la NASA comenzó con la búsqueda de un generador compacto para producir energía en sus naves espaciales (Espinel y Giraldo, 2007).

Las celdas de combustible operan gracias a la combinación electroquímica del hidrógeno y el oxígeno para producir energía. El hidrógeno es el combustible esencial para el funcionamiento de las celdas y puede ser suministrado en su forma puro o puede extraerse de otras sustancias tales como el gas natural, el biogás o el metano entre otros. El oxígeno que se requiere se puede obtener directamente del aire o puede suministrarse en su forma pura. Las celdas se componen de dos electrodos separados por un electrolito, las moléculas de oxígeno que entran a la celda se oxidan por catálisis en el ánodo, los protones resultantes pasan a través del electrolito mientras

los electrones pasan a través del circuito de corriente continua. El circuito se completa en el cátodo cuando las moléculas de oxígeno son reducidas por los electrones, los iones de hidrógeno después se combinan con las moléculas de oxígeno y se produce agua. Colocando una carga entre los dos electrodos se puede producir electricidad. Figura II.77 (Spiegel y col., 1997)

Figura II.77. Proceso electroquímico del hidrógeno (Spiegel y col., 1997).



Un ejemplo de celda de combustible de hidrógeno es la FC Navantia MTU HM-300 que tiene las siguientes características (GEA, 2006):

- Potencia eléctrica: 250kW
- Potencia térmica: 170kW
- Temperatura del agua:  $95\text{ }^\circ\text{C}$
- Rendimiento eléctrico antes de acondicionar: 54%
- Rendimiento eléctrico después de acondicionar a 400V 3F: 47%
- Rendimiento térmico: 28%
- Rendimiento global: 82%

**Esta página se dejó en blanco intencionalmente**