



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN

ANÁLISIS TECNICO ECONÓMICO  
ENTRE UN MOTOR A DIESEL  
MODIFICADO Y UNA MICROTURBINA  
DE GAS PARA UTILIZACIÓN DE  
BIOGÁS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
BUENDÍA ZÚÑIGA ANDRÉS JESÚS



FES Aragón

ASESOR:  
M. EN I. DAVID FRANCO MARTÍNEZ

MEXICO 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis padres, Ma. Del Carmen Zúñiga Chávez y  
Gumesindo Buendía Zabala*

*Les dedico este trabajo y les agradezco con todo mi cariño, por la comprensión y confianza siempre brindados para la realización de mi carrera profesional. Sabiendo que la única forma de agradecerles es no defraudarlos, quiero que sientan que el objetivo logrado también es suyo, y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su gran e incondicional apoyo.*

*Papá, Mamá; Muchas Gracias.*

*A mis hermanos, Ana Laura, Mauricio y Alejandro Buendía Zúñiga*

*Quienes me brindaron su apoyo, consejo y en los momentos más difíciles me alentaron a seguir adelante y de seguir preparándome para enfrentarme a la vida. Hoy se ven culminados todos esos esfuerzos y mis deseos, iniciándose así una nueva etapa en mi vida en la que siempre estarán presentes, pues sin sus sabios consejos nunca lo hubiera logrado.*

*A mi tía, Lilia Zúñiga Chávez*

*Por todo el apoyo moral que me brindaste en los momentos en los que creí que no había un final en el camino, siempre tuviste las palabras adecuadas para hacerme sentir mejor y seguir adelante a pesar de los obstáculos. Eres una parte muy importante en mi vida. Te agradezco de todo corazón y con un infinito cariño.*

*A mi novia y amiga, Jacqueline López Montoya*

*Porque desde que llegaste, la vida se ve de diferente manera, por tu apoyo incondicional, por tu agradable compañía y por todo el amor que me brindas. Eres una persona muy especial e importante y espero que siga así en el futuro. Te quiero mucho.*

*A todas las personas que de alguna manera, ya sea directa o indirectamente, influyeron para que este trabajo se concluyera. Gracias*

*Al M. en I. David Franco Martínez por haber confiado en mi persona, por su paciencia, por sus consejos, por su apoyo y por su colaboración y esfuerzo conjunto al aceptar dirigir este trabajo. Muchas Gracias.*

*A mis Síodos:*

*Ing. Moisés Cervantes Patiño*

*M. en C. Rodrigo Ocón Valdez*

*Ing. José Raymundo Reyna Orozco*

*Ing. Abel Verde Cruz*

*Por todas sus aportaciones a este trabajo. Muchas Gracias*

*A la Facultad de Estudios Superiores Aragón*

*Por toda la formación que recibí durante mi estancia en esta gran institución y a todos los maestros que contribuyeron a mi formación como profesionista. Gracias a todos.*

## **INDICE**

### **INDICE DE FIGURAS**

### **OBJETIVO**

### **INTRODUCCION**

## **CAPITULO 1.- CONCEPTOS GENERALES DE LA BIOMASA**

1.1 ¿Qué es la biomasa?	2
1.2 Factores que condicionan el uso de la biomasa	2
1.3 Tipos de biomasa	3
1.4 Ventajas e inconvenientes del uso de la biomasa	5
1.5 Procesos de conversión de la biomasa	7
1.6 Biomasa y economía	9
1.7 Interés medioambiental de la biomasa	10
1.8 Aplicaciones de la biomasa	10

## **CAPITULO 2.- CARACTERISTICAS DE UNA PLANTA DE BIOGAS Y CONCEPTOS GENERALES DEL BIOGAS**

2.1 Planta de biogás	15
2.2 ¿Qué es un biodigestor?	16
2.3 Clasificación de los biodigestores	17
2.4 Antecedentes del biogás	23
2.5 ¿Qué es el biogás?	24
2.6 Aplicaciones del biogás	26
2.7 Beneficios de la tecnología del biogás	27

### **CAPITULO 3.- EQUIPOS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA A TRAVES DE BIOGAS**

3.1 Turbina de gas	30
3.1.1 Características y Funcionamiento básico de una Turbina de Gas	31
3.1.2 Partes de una Turbina de Gas	32
3.1.3 Tipos de Turbinas de Gas	34
3.2 Ciclos termodinámicos de las turbinas	39
3.2.1 Ciclo Brayton	39
3.2.2 Ciclo Brayton regenerativo	43
3.2.3 Ciclo con Recalentamiento	43
3.3 Motor de Combustión interna	44
3.3.1 Motor Diesel	44
3.3.2 Ciclo de un Motor Diesel	47
3.4 Compresores	51
3.4.1 Tipos de Compresores	51
3.4.1.1 Compresor Alternativo o Reciprocante	52
3.4.1.2 Compresor Dinámico	53
3.4.1.3 Compresor de Tornillo	54

### **CAPITULO 4.- ANALISIS TECNICO-ECONOMICO**

4.1 Análisis Técnico	57
4.1.1 Compresor	57
4.1.2 Motor de combustión Interna	59
4.1.3 Compresor (Microturbina)	62
4.1.4 Microturbina	63
4.2 Análisis Económico	68

## INDICE DE FIGURAS

<b>CAPITULO 1.-</b>	<b>CONCEPTOS GENERALES DE LA BIOMASA</b>	
Figura 1.1.-	Generación de la Biomasa	3
Figura 1.2.-	Biomasa Natural	4
Figura 1.3.-	Biomasa Residual (húmeda)	4
Figura 1.4.-	Biomasa Residual (seca)	5
Figura 1.5.-	Procesos de Conversión de la Biomasa	9
Figura 1.6.-	Diferentes Aplicaciones de la Biomasa	10
Figura 1.7.-	Distintos Tratamientos de la Biomasa y sus Aplicaciones	13
<b>CAPITULO 2.-</b>	<b>CARACTERISTICAS DE UNA PLANTA DE BIOGAS Y CONCEPTOS GENERALES DEL BIOGAS</b>	
Figura 2.1.-	Esquema de una Planta de Biogás	15
Figura 2.2.-	Biodigestor Batch o Discontinuo	18
Figura 2.3.-	Biodigestor Semi-contínuo (Tipo Chino)	19
Figura 2.4.-	Tipos de Plantas de Biogás	22
Figura 2.5.-	Planta de biogás Tipo Campana Flotante	23
Figura 2.6.-	Diferentes usos del Biogás	27
<b>CAPITULO 3.-</b>	<b>EQUIPOS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA A TRAVES DE BIOGAS</b>	
Figura 3.1.-	Turbina de Gas	31
Figura 3.2.-	Compresor de una Turbina de Gas	32
Figura 3.3.-	Tipos de Cámara de Combustión o Combustor	33
Figura 3.4.-	Turbinas de Flujo Axial y Radial	33
Figura 3.5.-	Tobera de Escape	34
Figura 3.6.-	Esquema de una Turbina de Ciclo abierto	36

Figura 3.7.-	Esquema de una Turbina de Ciclo cerrado	37
Figura 3.8.-	Esquema de una Turbina de un solo Eje Y Ciclo abierto	38
Figura 3.9.-	Esquema de una Turbina de Doble Eje o Eje partido	39
Figura 3.10.-	Diagrama T-S y P-v del Ciclo Brayton	40
Figura 3.11.-	Ciclo Ideal y Real de una Turbina de Gas	41
Figura 3.12.-	Esquema de una Turbina de Gas con regeneración	43
Figura 3.13.-	Diagrama del Ciclo con recalentamiento	44
Figura 3.14.-	Motor Diesel	45
Figura 3.15.-	Diagrama P-v del Ciclo Diesel	47
Figura 3.16.-	Compresor Alternativo	52
Figura 3.17.-	Compresor Centrífugo	53
Figura 3.18.-	Compresor Axial	54
Figura 3.19.-	Disposición de los Rotores de un Compresor de tornillo	55
<b>CONCLUSIONES</b>		76
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		78
<b>ANEXOS</b>		79

## **OBJETIVO**

En el presente trabajo de tesis se analiza el trabajo y la eficiencia que produce un motor de combustión interna que trabaja con el biogás obtenido de un biodigestor para generar energía eléctrica, y a su vez compararlo con el trabajo y la eficiencia de una turbina de gas al hacerla trabajar con este mismo gas. Todo esto con el fin de saber cuál de los dos equipos es el que mejor se podría desempeñar con este tipo de combustible y además hacer un análisis económico para saber cuál de las dos alternativas sería una mejor inversión y la que mejor rentabilidad tendría.

## **INTRODUCCION**

Actualmente, la producción de energía eléctrica es un proceso en el que se requiere de grandes inversiones y en algunos casos como es en las centrales nucleoelectricas, se liberan grandes cantidades de radiación y de contaminantes, siendo estos, riesgos potenciales para la salud y para el medio ambiente. Además de estos riesgos, existen otros contaminantes como son los gases de efecto invernadero liberados por la combustión de los combustibles fósiles utilizados en los automóviles o en las fábricas y otro muy importante, los gases que son liberados por los desechos orgánicos de las vacas en las granjas o establos, ya que estos son los que contribuyen más a dicho efecto.

Este trabajo se enfoca al análisis y comparación de equipos de generación de energía eléctrica con el uso de biogás generado en una planta instalada en una granja lechera, con una producción de excretas que desechan las vacas de entre 15 y 20 Toneladas al día, con las que obtiene alrededor de 1500 m<sup>3</sup> de biogás y generar por cada 35 m<sup>3</sup> de biogás 35 kW<sup>\*</sup> de energía eléctrica, a partir de motores a diesel modificados. El rancho cuenta con tres motores, generando 105 kW de potencia eléctrica, las necesidades del rancho al máximo son de 90 kW. Cabe señalar que no se darán las marcas ni nombres por razones de no dañar alguna imagen comercial o personal y que la idea es realizar una primera comparación técnica y económica para dar una opinión profesional de que sistema sería el más adecuado.

Aunque el objetivo de este trabajo es analizar dos diferentes equipos de generación de energía eléctrica, también está implícito en este, crear conciencia divulgando el uso de este tipo de tecnología con el fin de minimizar las emisiones de Bióxido de Carbono y de otros tipos de gases que contribuyen a aumentar el daño causado al ambiente por el efecto invernadero.

\*Datos reales de la granja lechera obtenidos directamente de la placa de características del motor.

Es por todo esto que es de vital relevancia darle una mayor importancia al uso de tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa, en especial la húmeda, que es generalmente la que más contamina y la que más abunda, ya sea por los residuos ganaderos (principalmente purines) y las aguas residuales urbanas e industriales. Además, este tipo de biomasa no tiene el problema de no ser renovable, es decir, día a día se renueva por los desechos biológicos de las personas, de los animales de granja y otros.

A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

**CAPITULO I.-** Concepto general de la biomasa, tipos de biomasa, ventajas y desventajas de la utilización de la biomasa, así como sus aplicaciones industriales y/o domesticas.

**CAPITULO II.-** Definición de planta de biogás, que es un biodigestor, tipos de biodigestores, clasificación de los biodigestores, antecedentes del biogás, que es el biogás, composición del biogás y aplicaciones del biogás.

**CAPITULO III.-** Descripción de los equipos de generación de energía eléctrica (turbina de gas, compresores y motor de combustión interna), así como sus partes y ciclos con los que operan.

**CAPITULO IV.-** Análisis técnico entre la turbina de gas y el motor de combustión interna y comparación de resultados.

**CAPITULO I**

**CONCEPTOS GENERALES DE LA**

**BIOMASA**

## 1.1 ¿QUE ES LA BIOMASA?

La biomasa es toda sustancia orgánica renovable de origen tanto animal como vegetal. La energía de la biomasa proviene de la energía que almacenan los seres vivos. En primer lugar, los vegetales al realizar la fotosíntesis, utilizan la energía del sol para formar sustancias orgánicas. Después los animales incorporan y transforman esa energía al alimentarse de las plantas. Los productos de dicha transformación, que se consideran residuos, pueden ser utilizados como recurso energético.

Desde principios de la historia de la humanidad, la biomasa ha sido una fuente energética esencial para el hombre. Con la llegada de los combustibles fósiles, este recurso energético perdió importancia en el mundo industrial. En la actualidad los principales usos que tiene son domésticos.

En Europa, Francia es el país que mayor cantidad de biomasa consume más de 9 millones de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) seguido de Suecia. España ocupa el cuarto lugar dentro de esta lista con 3,6 millones de TEP.

## 1.2 FACTORES QUE CONDICIONAN EL USO DE LA BIOMASA

Los factores que condicionan el consumo de pueden ser los siguientes:

**Factores geográficos:** Debido a las condiciones climáticas de la región, las cuales indicarán las necesidades de calor que requiera cada zona, y las cuales podrán ser cubiertas con biomasa.

**Factores energéticos:** Por la rentabilidad o no de la biomasa como recurso energético. Esto dependerá de los precios y del mercado energético en cada momento.

**Disponibilidad del recurso:** Este es el factor que hay que estudiar en primer lugar para determinar el acceso y la temporalidad del recurso.

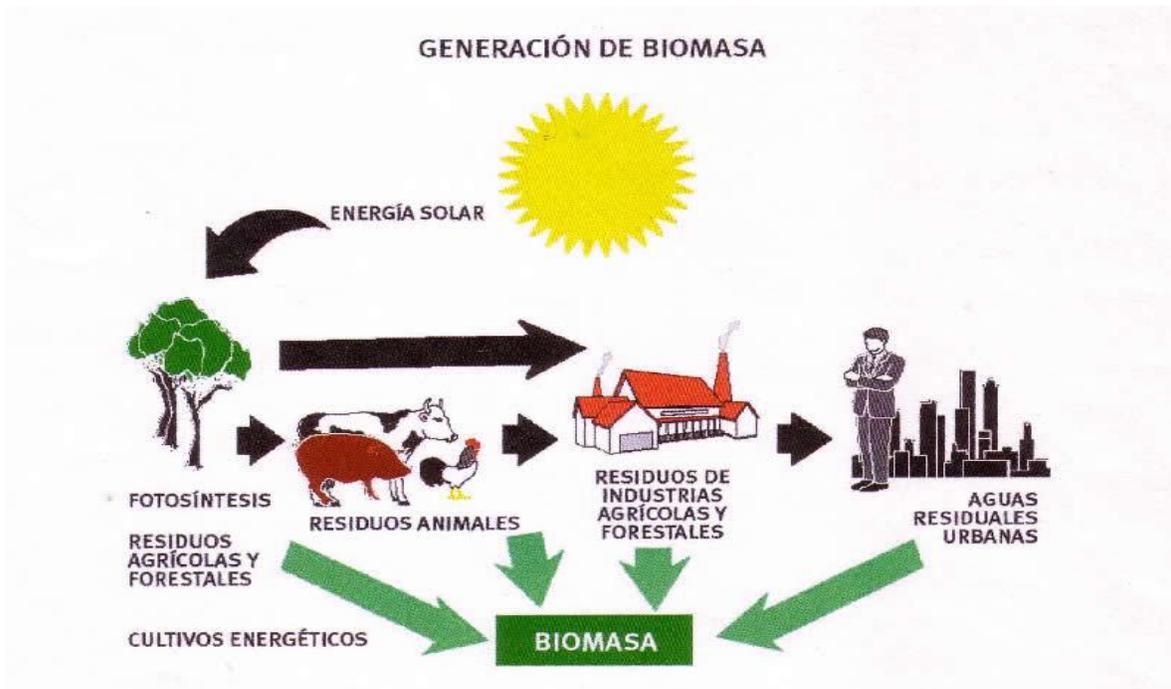


Fig. 1.1 Generación de biomasa

### 1.3 TIPOS DE BIOMASA

Se puede considerar biomasa a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Atendiendo a su origen, la biomasa se puede clasificar en:

- a) **Biomasa Natural:** Es la que se produce en ecosistemas naturales, es decir, es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana. Sin embargo la explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del medio ambiente.
  
- b) **Biomasa Residual:** Es la que genera cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, como basuras y aguas residuales. Incluye los Residuos Forestales y Agrícolas, los Residuos de Industrias Forestales y Agrícolas, los Residuos Sólidos Urbanos y los Residuos Biodegradables.

- c) **Cultivos Energéticos o Biomasa producida:** Es la cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, como la caña de azúcar, orientada a la producción de etanol para carburante. Son cultivos que se caracterizan por una gran producción de materia viva por unidad de tiempo y por permitir minimizar los cuidados al cultivo.
- d) **Excedentes Agrícolas:** Los excedentes agrícolas no utilizados para la alimentación humana son biomasa. Pueden aprovecharse, por ejemplo, para la elaboración de biocombustibles líquidos



*Fig.1.2 Biomasa Natural*



*Fig. 1.3 Biomasa Residual (Húmeda)*



*Fig. 1.4 Biomasa Residual (Seca)*

La biomasa se puede aprovechar de dos maneras: quemándola para producir calor o transformándola en combustible para su mejor transporte y almacenamiento. Su naturaleza es muy variada, ya que depende de la propia fuente, pudiendo ser animal o vegetal, si bien generalmente se compone de hidratos de carbono, lípidos y proteínas. La biomasa vegetal se compone mayoritariamente de hidratos de carbono y la animal de lípidos y proteínas.

#### **1.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA**

La utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas medioambientales:

- Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>; aunque para el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión, y el resultado de la misma sea agua y CO<sub>2</sub>, la cantidad de este gas causante del efecto invernadero, se puede considerar que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, que no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados y muy pocas partículas sólidas.

- Si se utilizan residuos de otras actividades como biomasa, esto se traduce en un reciclaje y disminución de residuos. Canaliza, por tanto, los excedentes agrícolas alimentarios, permitiendo el aprovechamiento de las tierras de retirada.
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentarios en el mercado de alimentos. Eso puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola.
- Permite la introducción de cultivos de gran valor rotacional frente a monocultivos cerealistas.
- Puede provocar un aumento económico en el medio rural.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

En la actualidad la tecnología aplicada a la biomasa está sufriendo un gran desarrollo.

La investigación se está centrando en los siguientes puntos:

- En el aumento del rendimiento energético de este recurso.
- En minimizar los efectos negativos ambientales de los residuos aprovechados y de las propias aplicaciones.
- En aumentar la competitividad en el mercado de los productos.
- En posibilitar nuevas aplicaciones de gran interés como los biocombustibles.

Así como tiene ventajas, la utilización de la biomasa también tiene algunos inconvenientes:

- Tiene un mayor coste de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- Menor rendimiento energético de los combustibles derivados de la biomasa en comparación con los combustibles fósiles.
- Producción estacional (en ciertos casos como por ejemplo: el gabazo de la caña de azúcar, el aserrín, maíz, patata, etc.)

- La materia prima es de baja densidad energética lo que quiere decir que ocupa mucho volumen y por lo tanto puede tener problemas de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de acondicionamiento o transformación para su utilización.

## **1.5 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA**

El uso de la biomasa con fines energéticos requiere una adecuación de ésta para utilizarla en los sistemas convencionales. Estos procesos pueden ser:

**Físicos:** Procesos que actúan físicamente sobre la biomasa y que están asociados a las fases primarias de transformación, como triturado, astillado, compactado e incluso secado.

**Químicos:** Procesos relacionados con la digestión química, generalmente mediante hidrólisis, pirolisis y gasificación.

**Biológicos:** Procesos llevados a cabo por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Se suelen utilizar para la transformación de la biomasa húmeda. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros. En este sentido, destaca el tratamiento llamado biodigestor. Se trata de un sistema de tratamiento primario anaerobio que consiste en retener por un determinado período de tiempo los desechos orgánicos en un tanque cerrado para que se efectúe la fermentación del material, produciendo de esta manera gas natural y un efluente de fácil disposición en el entorno. Se puede construir de metal o concreto y debe estar herméticamente cerrado.

**Termoquímicos:** Procesos basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a altas temperaturas (300°C - 1500°C). Cuando se calienta la biomasa, se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de descomposición de sus moléculas, seguidas

por reacciones en las que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí y con los componentes de la atmósfera en la que tenga lugar la reacción, de esta forma se consiguen los productos finales. Según el control de las condiciones del proceso se consiguen productos finales diferentes, lo que da lugar a los tres procesos principales de la conversión termoquímica de la biomasa:

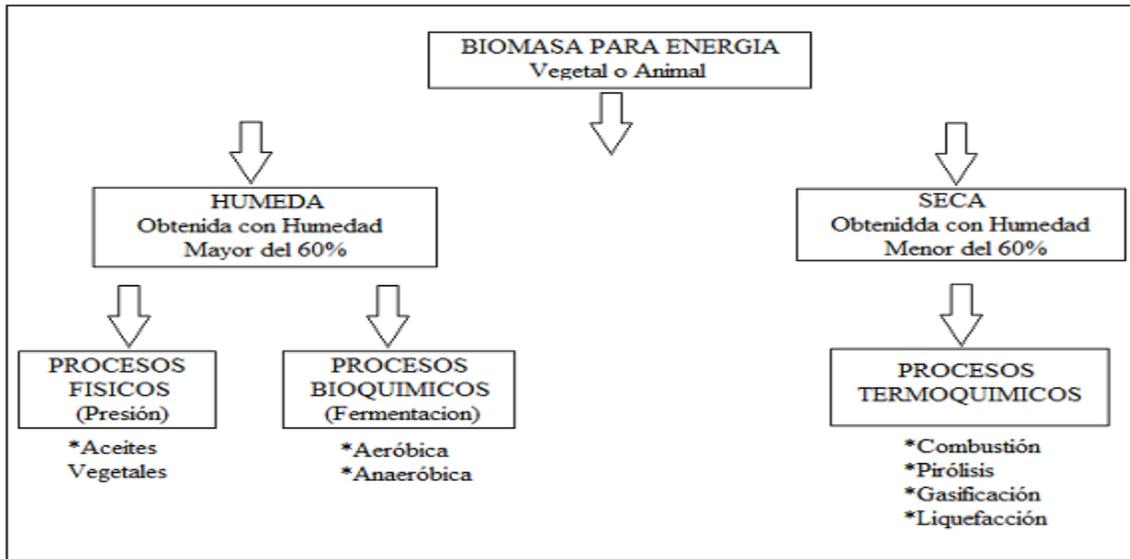
**Combustión:** Se produce en una atmósfera oxidante, de aire u oxígeno, obteniendo cuando es completa, dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas), obteniendo calor en forma de gases calientes.

**Gasificación:** Es una combustión incompleta de la biomasa a una temperatura de entre 600°C a 1500°C en una atmósfera pobre de oxígeno, en la que la cantidad disponible de este compuesto está por debajo del punto estequiométrico, es decir, el mínimo necesario para que se produzca la reacción de combustión. En este caso se obtiene principalmente un gas combustible formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano.

**Pirolisis:** Es el proceso en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia total de oxígeno.

Las instalaciones en la que se realizan la pirolisis y la gasificación de la biomasa se llaman gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente o puede servir como base para la síntesis de metanol, el cual podría sustituir a las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

A continuación se presenta un mapa conceptual de los diferentes tipos de conversión de acuerdo al tipo de biomasa utilizada.



*Fig. 1.5 Procesos de Conversión de la Biomasa*

## 1.6 BIOMASA Y ECONOMIA

Al contrario de las energías extraídas de la tanatomasa (carbón; petróleo), la energía derivada de la biomasa es renovable indefinidamente.

Al contrario de las energías eólica y solar, la de la biomasa es fácil de almacenar. En cambio, necesita enormes volúmenes combustibles que hacen su transporte costoso y por ello es más apropiada para la utilización local y sobre todo rural.

Su rendimiento, expresado en relación a la energía solar incidente sobre las mismas superficies, es muy débil (0,5 % a 4 %, contra 10 % a 30 % para las pilas solares fotovoltaicas), pero las superficies terrestres y acuáticas, de que pueden disponer no tienen comparación con las que pueden cubrir, por ejemplo, los captadores solares.

La biomasa agrícola y forestal supone un potencial económico importante especialmente en las zonas tropicales y subtropicales, dado que en ellas se dan las condiciones más idóneas para el desarrollo de los vegetales. Los organismos fotosintéticos, tanto terrestres como marinos, pueden ser considerados como convertidores continuos de la energía solar, y por consiguiente renovables, en

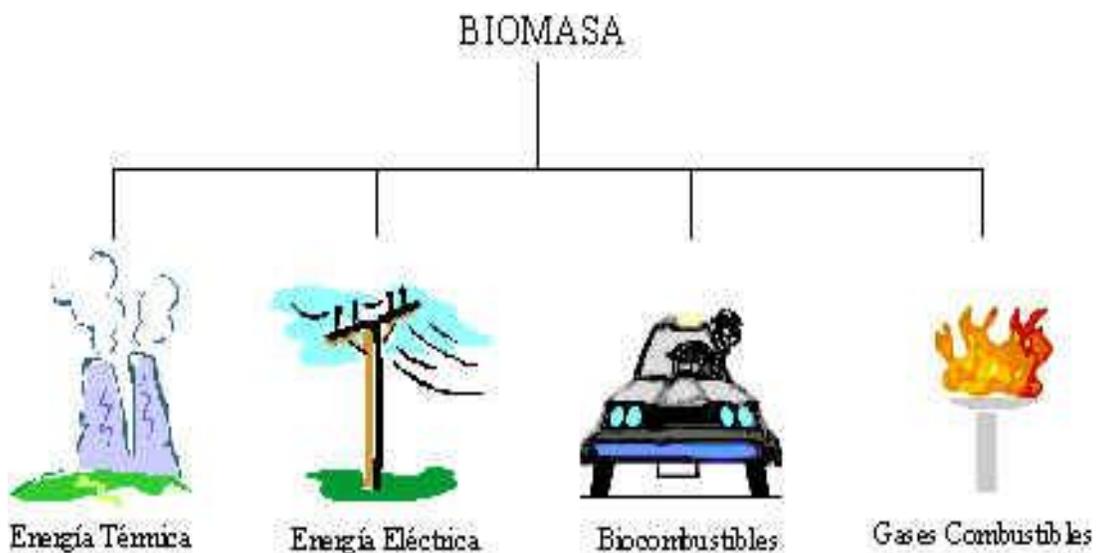
materia orgánica. Las plantas fijan anualmente mediante la fotosíntesis una cantidad de carbono equivalente en energía a 2.1021 julios, que equivalen aproximadamente a 10 veces el consumo mundial de energía y aproximadamente a 200 veces la energía consumida en forma de alimentos.

### 1.7 EL INTERÉS MEDIOAMBIENTAL DE LA BIOMASA

El interés medioambiental de la biomasa reside en que, siempre que se obtenga de una forma renovable y sostenible, es decir que el consumo no vaya a más velocidad que la capacidad del bosque, la tierra, etc. para regenerarse, es la única fuente de energía que aporta un balance de CO<sub>2</sub> favorable, de manera que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento más CO<sub>2</sub> del que se libera en su combustión.

### 1.8 APLICACIONES DE LA BIOMASA

La gran variedad de biomasa existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de ésta en energía (Combustión directa, Pirolisis, Gasificación, Fermentación, Digestión anaeróbica,...) permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica, electricidad, biocombustibles, gases combustibles.



*Fig. 1.6 Diferentes aplicaciones de la Biomasa*

### **Producción de Energía Térmica**

Aprovechamiento convencional de la biomasa natural y residual. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas.

### **Producción de energía eléctrica**

Obtenida minoritariamente a partir de biomasa residual (restos de cosecha y poda) y principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos, de crecimiento rápido (Chopo, Sauce, Eucalipto, Robinia, Coníferas, Acacia, Plátano) y herbáceos (Cardo lleno, Miscanto, Caña de Provenza, Euforbias, Chumberas). También se utiliza el biogás resultante de la fermentación de ciertos residuos (lodos de depuradora, Residuos Sólidos Urbanos) para generar electricidad.

El rendimiento neto de la generación de electricidad en las plantas de biomasa es bajo, del orden del 20% referido a su poder calorífico inferior. Ello se debe fundamentalmente al pequeño tamaño de la planta de producción. La caldera tiene un rendimiento moderado al quemar un combustible de alto contenido en humedad, y su consumo en servicios auxiliares es alto, por encima del 8% de la producción total de electricidad en salida de alternador.

Una posibilidad de incrementar el rendimiento energético en el uso de la biomasa es la cogeneración de calor y electricidad. La condensación del vapor supone una evacuación de calor cercano a la mitad de la energía contenida en la biomasa; la recuperación de parte de ese calor de condensación en forma de vapor de baja temperatura o agua caliente, para usos industriales o domésticos, supone un

aumento de la eficiencia energética. Para ello se puede disponer de una turbina de contrapresión o bien hacer una extracción de vapor con volumen significativo en la zona de baja presión de la turbina. Se instalan los intercambiadores de calor adecuados y se pueden obtener rendimientos globales de entre un 40 y un 60%.

La gasificación es una alternativa con mejores rendimientos que la combustión en calderas. El empleo de motores diesel o de turbinas de gas para quemar el gas producido puede elevar el rendimiento a valores por encima del 30%, sin embargo ésta es una opción poco extendida.

### **Producción de Biocombustibles**

Existe la posibilidad, ya legislada, de alimentar los motores de gasolina con bioalcoholes (obtenidos a partir de Remolacha, Maíz, Sorgo dulce, Caña de azúcar, Papa) y los motores diesel con bioaceites (obtenidos a partir de Colza, Girasol, Soya).

### **Producción de Gases combustibles**

Es una aplicación poco utilizada actualmente que consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible es básicamente metano, pero también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible.

El gas obtenido es de bajo poder calorífico, pero útil en aplicaciones térmicas en el propio entorno ganadero o agrícola, suministrando luz y calor. En el caso de instalaciones de mayor tamaño, se puede llegar a colocar motores diesel de hasta varios cientos de kilovatios de potencia para la generación de electricidad; existen ya ejemplos industriales de ello. La producción de gas se puede controlar adecuándola a la demanda; incluso puede hacerse que durante varias horas el digestor se mantenga embotellado<sup>\*</sup>, sin producir gas, durante los períodos en los que no exista consumo energético.

\*Embotellado: Inmovilizar el consumo de biogás mientras no haya necesidad de consumirlo.



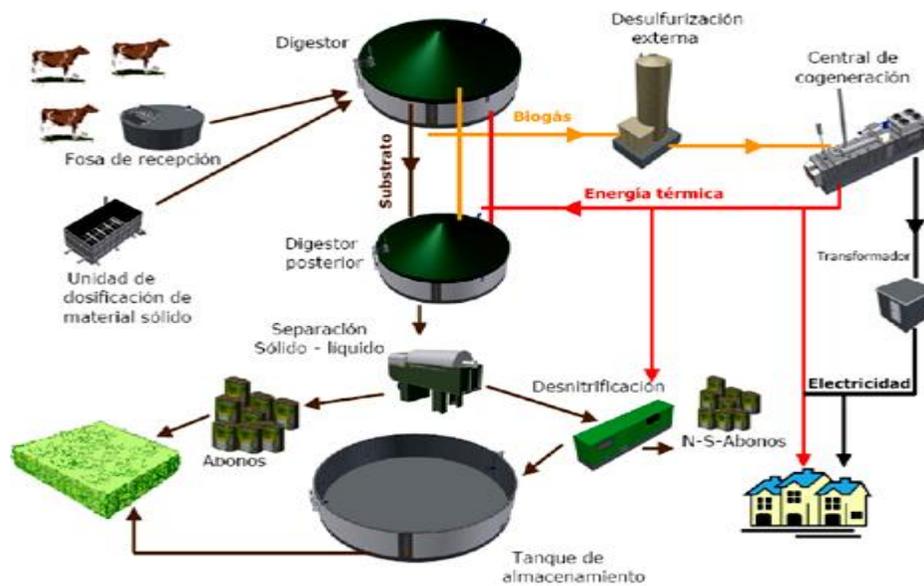
## CAPITULO II

# CARACTERISTICAS DE UNA PLANTA DE BIOGAS Y CONCEPTOS GENERALES DEL BIOGAS

La mayoría de las granjas que existen en la República Mexicana generan grandes cantidades de excretas o estiércol, la cuales no tienen un destino final útil, es por eso que actualmente se han desarrollado tecnologías para aprovechar todos esos desechos ya que son una gran fuente de energía. Una de esas tecnologías son las llamadas plantas de biogás que son una gran alternativa para el buen manejo y utilidad de este tipo de desechos. A continuación se da una pequeña descripción y mención de las ventajas de usar esta tecnología.

## 2.1 PLANTA DE BIOGAS

La instalación destinada a la producción y captación del biogás recibe el nombre de planta de biogás. Existen múltiples diseños y formas, en función de su tamaño, materia prima (residual) que se emplea, materiales con que se construye, etc. Su variedad es tal que los modelos existentes se adaptan prácticamente a todas las necesidades y variantes que se deseen, en cuanto a volumen, materiales empleados y residuales orgánicos que se deben tratar.



*Fig. 2.1. Esquema de una Planta de Biogás*

Una planta de biogás suministra energía y abono, mejora las condiciones higiénicas y no daña el medio ambiente, es una fuente de energía moderna que en el caso de las viviendas rurales, puede ser montada en el lugar donde se consumirá la energía, evitando los extensos y caros tendidos eléctricos rurales, es renovable y con un mínimo mantenimiento. No se necesita un alto grado de capacitación para operarla.

Sin embargo para lograr todo lo antes citado es necesario que la planta de biogás este bien diseñada y construida.

## **2.2 ¿QUE ES UN BIODIGESTOR?**

Para el eficiente manejo del estiércol de bovinos y cerdos, además del agua de lavado de las instalaciones, la planta de biogás debe contar con un elemento importante llamado **biodigestor**, que en su forma más simple, es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos o desechos vegetales) en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos.

Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

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

### **2.3 CLASIFICACION DE LOS BIODIGESTORES**

De acuerdo a la frecuencia de cargado, los sistemas de biodigestión se pueden clasificar en:

- Batch o discontinuo
- Semi-contínuo
- Continuos

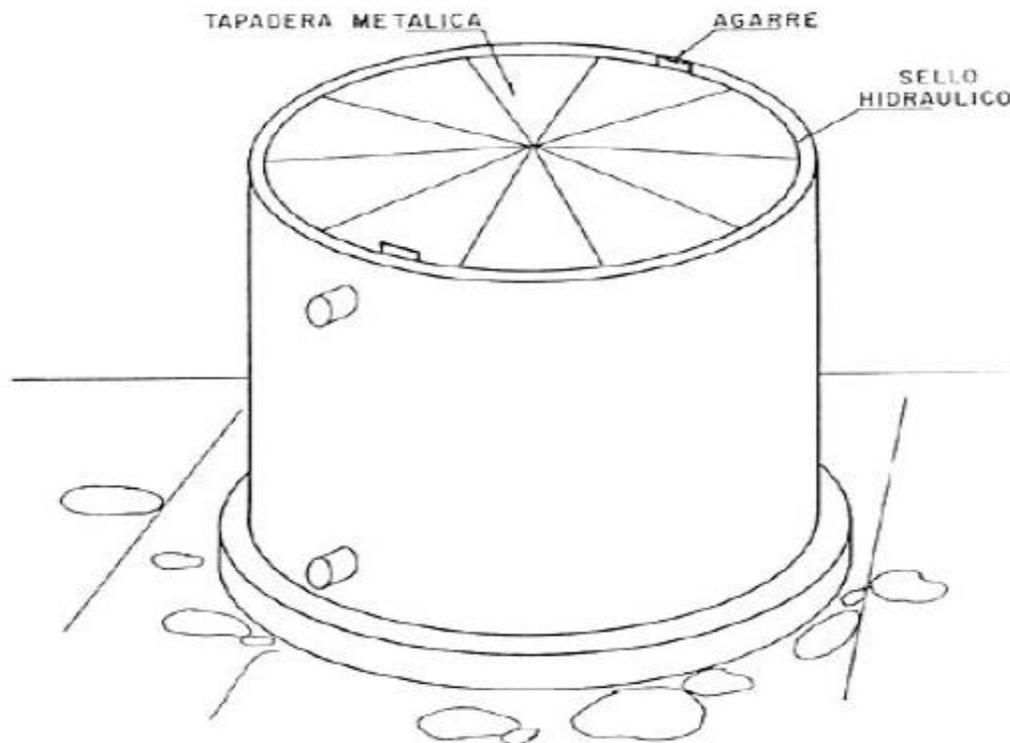
#### **Sistema Batch o Discontinuo**

Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir gas combustible. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En este tipo de sistemas se usa una batería de digestores que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de biogás sea constante. Este tipo de digestor es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas.

De los sistemas Batch, el más usado es el OLADE GUATEMALA, por la facilidad de construcción del sistema, la sencillez en el proceso de digestión, la alimentación del digestor puede ser con residuos vegetales o también mezclando residuos vegetales con pecuarios y por su mayor producción de biogás, en comparación con el modelo chino e hindú.

La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0 m<sup>3</sup> de biogás por cada m<sup>3</sup> del biodigestor.



*Fig. 2.2 Biodigestor Batch o Discontinuo*

### **Sistemas Semi-continuos**

Es el tipo de digester más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino. Entre los de tipo hindú existen varios diseños, pero en general son verticales y enterrados. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación.

Este tipo de digestores presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0,5 a 1 volumen de gas por volumen de digester, y aún más.

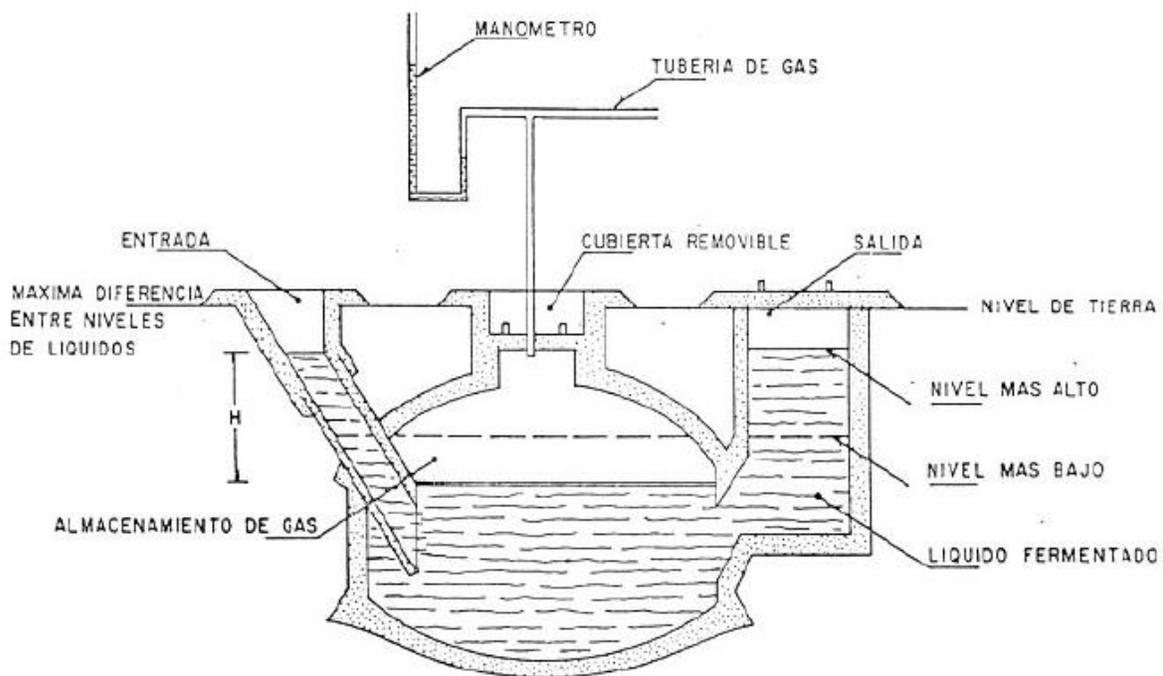
En lo que respecta a los digestores tipo chino, estos son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del mismo sistema.

A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo de la planta, aumenta su presión, forzando a líquido en los tubos de entrada y salida a subir, y llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 100 cm de columna de agua.

La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,1 a 0,4 m<sup>3</sup> de biogás por cada m<sup>3</sup> del biodigestor.

A pesar de que el digestor tipo chino es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general extensos.



*Fig. 2.3 Biodigestor Semi-continuo (Tipo Chino)*

### Sistemas continuos

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto este tipo de plantas son más bien instalaciones tipo industriales, donde se genera una gran cantidad de biogás el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales.

*Características de una Planta de biogás y Conceptos Generales del biogás*

Existen tres clases de biodigestores de flujo continuo.

1. De cúpula fija
2. De cúpula móvil
3. De salchicha, Taiwán, CIPAV o biodigestores familiares de bajo costo

A continuación se muestra un cuadro resumen con las características de los biodigestores más utilizados en las zonas rurales.

*Tabla 2.1 Características de Biodigestores Rurales*

<b>Características</b>	<b>Chino</b>	<b>Hindú</b>	<b>Horizontal</b>	<b>Olade Guatemala</b>
<b>Sistema de Digestión</b>	Batch y de mezcla	Desplazamiento vertical	Desplazamiento horizontal	Batch
<b>Características de Diseño</b>	Circular, pequeño, achatado	Cilindro, vertical, tanque de gas	Horizontal, diferentes secciones, cúpula fija	Cilindro, vertical, tanque de gas flotante
<b>Substratos</b>	Residuos agrarios, excreta humana	Estiércol	Estiércol	Residuos agrícolas, estiércol
<b>Tiempo de Retención(días)</b>	45-90	30-60	30-60	120
<b>Producción de Biogás (m<sup>3</sup> de Biogás por m<sup>3</sup> del biodigestor)</b>	0,1-0,4	0,4-0,6	0,8-1,0	0,5-1,0

Fuente: Tecnología Energética y Desarrollo. Alfredo Oliveros. 1990

Dentro de las bondades que ofrece la construcción de un biodigestor se tiene:

**a. Descontaminación ambiental por la disposición final de la biomasa.**

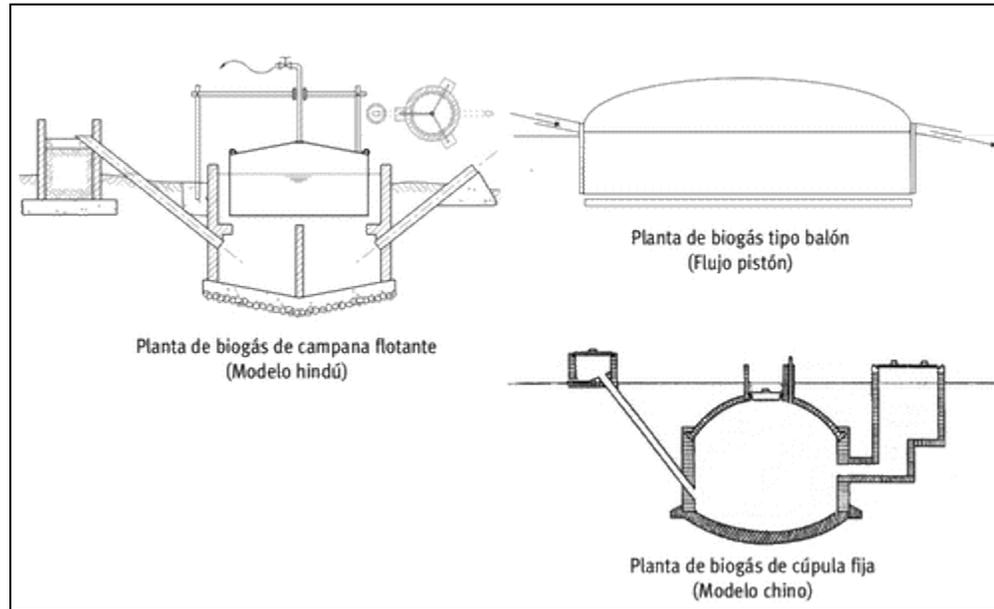
Este efecto de descontaminación ambiental, quizá por lo intangible del hecho en sí, difícilmente pueda valorarse en términos contables pero su efecto ventajoso sobre el ambiente es en muchos de los casos la principal razón para la instalación de biodigestores.

**b. Producción de biogás:**

Con el término **biogás** se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias. Este biogás es usado en muchas aplicaciones, por ejemplo, para iluminación, generación de electricidad, etc.

**c. Producción de abono orgánico**

En el proceso de fermentación se remueven sólo los gases generados ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) que representan del 5% a 10% del volumen total del material de carga. Se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (N, P, K) contenidos en la materia prima, que son esenciales para las plantas. Lo anterior lo convierte en un valioso abono orgánico, prácticamente libre de olores, patógenos, y de fácil aplicación.



*Fig. 2.4 Tipos de Plantas de Biogás.*

La utilización de biodigestores ofrece grandes ventajas para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias, pues además de disminuir la carga contaminante de las mismas, extrae gran parte de la energía contenida en el material sin afectar (o inclusive mejorando) su valor fertilizante y controlando de manera considerable los malos olores.

Los biodigestores más recomendados para el tipo de productores y las características de producción ganadera son los de régimen semi-continuo y del tipo tubular construidos con polietileno calibre 1000 UV, su valor comparado con los construidos en material de cemento tiene una diferencia significativamente menor.



*Fig. 2.5 Planta de biogás Tipo Campana Flotante*

## **2.4 ANTECEDENTES DEL BIOGAS**

El hombre conoce desde tiempos muy remotos la existencia del biogás, pues este “combustible” se produce de forma natural en los pantanos, por esta razón es que en algunos lugares se le conoce como “Gas de los Pantanos”.

En 1808 Humphrey Davy produce gas metano (principal componente del biogás) en un laboratorio. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás. Desde esos días hasta la actualidad mucho se ha avanzado sobre el tema y actualmente se cuenta en instalaciones que van desde la pequeña escala doméstica hasta las aplicaciones agroindustriales. China es el país que ha llevado a la práctica el uso del biogás en mayor escala. Existen allí más de siete millones de digestores rurales en funcionamiento. Estos proveen gas para cubrir necesidades de cocción e iluminación, a la vez que van recuperando suelos degradados a través de siglos de cultivos.

La India experimenta desde 1939 con diversos sistemas para aplicar en climas fríos o cálidos. En Europa y en Estados Unidos se investigan los complejos fenómenos químicos que ocurren durante el proceso de digestión.

En la Segunda Guerra Mundial, la crisis de combustibles hizo que las investigaciones en esta área aumentaran, forzando el desarrollo a pequeña y gran escala. Años más tarde debido a los aspectos negativos de esta tecnología por

depender principalmente de temperaturas superiores a los 30 °C, y por comodidad y conveniencia de otros tipos de combustibles, esta tecnología pasó al olvido.

En China, India y Sudáfrica, debido a la escasez de recursos económicos estos métodos fueron difundiendo y desarrollándose de tal manera que hoy en la actualidad estos países cuentan con más de 30 millones de Biodigestores funcionando, además desarrollaron técnicas de generación gaseosa a pequeña y gran escala<sup>[1]</sup>

## 2.5 ¿QUE ES EL BIOGAS?

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono, aunque también contiene mínimas cantidades de otro tipo de gases. Es un gas más liviano que el aire, tiene una temperatura de inflamación de 700°C y su llama alcanza una temperatura de 870°C. En la tabla 2.2 se muestra la composición química del metano.

Aunque los principales componentes del biogás son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada. Su composición aproximada se presenta a continuación:

*Tabla 2.2 Composición del Metano (Werner et al 1989):*

Metano, CH <sub>4</sub>	50 - 80% volumen
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	30 - 50%
Sulfuro de hidrógeno, H <sub>2</sub> S	0 - 3%
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	0 - 1%

<sup>1</sup>Información de INTERNET de la página: [www.oni.escuelas.edu.ar/biogas\\_historia](http://www.oni.escuelas.edu.ar/biogas_historia)

El biogás se puede producir de forma natural o espontánea, por acción de bacterias de fermentación que se encargan de descomponer el material orgánico en un entorno húmedo. Este proceso se llama degradación anaeróbica por que se realiza en ausencia de oxígeno.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, entre ellos se encuentran: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, residuos vegetales como pajas, pastos, hojas secas y basuras domésticas.

El biogás es un combustible cuyo poder calórico es de 4,500 kcal/m<sup>3</sup> o 18.8 MJ<sup>[2]</sup>, lo que permite generar entre 1.3 y 1.6 kWh, que viene siendo el equivalente a medio litro de petróleo, aproximadamente. El metano es el principal componente del biogás, por lo tanto este le confiere características combustibles que pueden ser usadas como tal, pero solo cuando el metano se encuentra en una concentración mayor al 50%, ya que debajo de esta concentración, el biogás deja de ser inflamable.

La composición química del biogás también puede variar de acuerdo al tipo de fuente según de la cual provenga. En la tabla 2.2 se muestra la composición según el tipo de desecho que se utilice.

<sup>2</sup> Información de INTERNET de la página: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biog%C3%A1s>

Tabla 2.3 Composición del Biogás obtenido de diversas fuentes.

Gases	Desechos Agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos Industriales	Rellenos Sanitarios
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Vapor de Agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación
Hidrogeno (H)	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Acido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de Carbono (CO)	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

## 2.6 APLICACIONES DEL BIOGAS

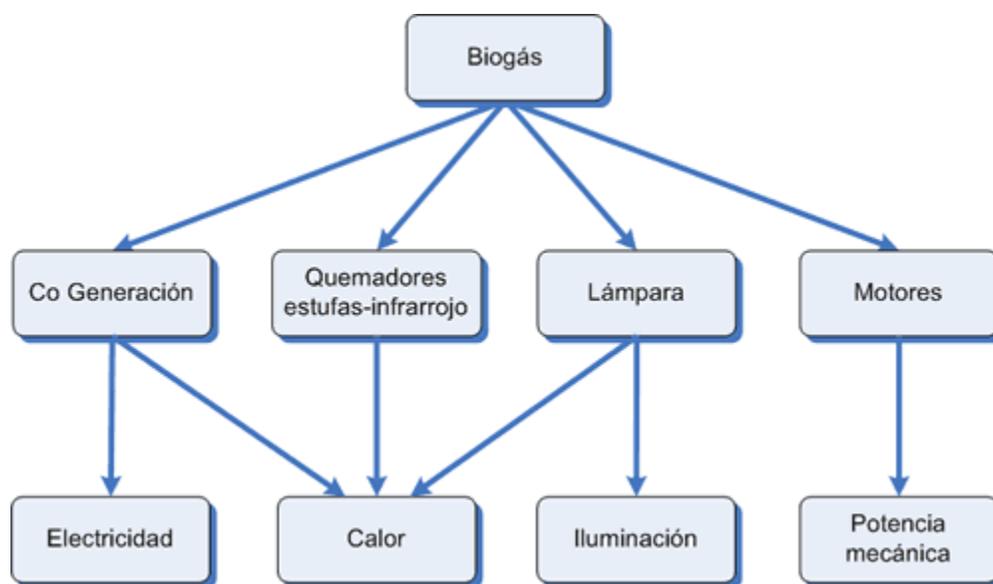
En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier tipo de equipo comercial para uso de gas natural, por ejemplo en aplicaciones como: cogeneración, quemadores, estufas, infrarrojos, iluminación, motores, generación de electricidad, calor, potencia mecánica, etc.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido<sup>[3]</sup>.

El uso del biogás para iluminación, generar calor, en la cocción de alimentos y para la generación de electricidad da un valor adicional al empleo de biodigestores en las empresas agropecuarias. Aunque los resultados económicos no se puede

<sup>3</sup> Información de INTERNET de la página: <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/ usos>

generalizar pues cambiarán de acuerdo a las circunstancias de cada lugar, en la utilización del biogás en motores diesel para generación de electricidad ha demostrado importantes beneficios económicos además de las ventajas anteriormente mencionadas. En algunos ensayos se ha logrado con el biogás una disminución del 40% en los costos del kWh al compararse con los costos actuales de la energía suministrada a través del sistema de interconexión, demostrando la factibilidad de integrar la producción de alimentos y energía de una manera sostenible.



*Fig. 2.6 Diferentes usos del Biogás*

## 2.7 BENEFICIOS DE LA TECNOLOGIA DEL BIOGAS

Los sistemas de biogás pueden proveer beneficios a sus usuarios, a la sociedad y al medio ambiente en general:

- Producción de energía (calor, luz, electricidad).
- Transformación de desechos orgánicos en fertilizante de alta calidad.
- Mejoramiento de las condiciones higiénicas a través de la reducción de patógenos, huevos de larvas y moscas.

*Características de una Planta de biogás y Conceptos Generales del biogás*

- Reducción en la cantidad de trabajo relacionado con la recolección de leña para cocinar (principalmente llevado a cabo por mujeres).
- Ventajas ambientales a través de la protección del suelo, del agua, del aire y la vegetación leñosa, reducción de la deforestación.
- Beneficios micro-económicos a través de la sustitución de energía y fertilizantes, del aumento en los ingresos y del aumento en la producción agrícola-ganadera.
- Beneficios macro-económicos a través de la generación descentralizada de energía, reducción en los costos de importación y protección ambiental.

De esta manera el uso adecuado de la tecnología del biogás puede contribuir a la conservación y al desarrollo.

## CAPITULO III

# EQUIPOS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA A TRAVES DE BIOGAS

La energía eléctrica es una parte esencial de la vida moderna y se puede obtener mediante diversas formas. Una de estas formas es por medio de maquinas térmicas, que gracias a la fuerza motriz que generan pueden ser acopladas a generadores eléctricos y así poder generar esa fuente de energía que en la actualidad es de vital importancia.

Algunas de estas maquinas térmicas como son los motores a diesel modificados y las turbinas de gas, hoy en día son de los dispositivos más utilizados a la hora de generar energía ya sea por medio de un gas combustible o algún otro fluido inflamable.

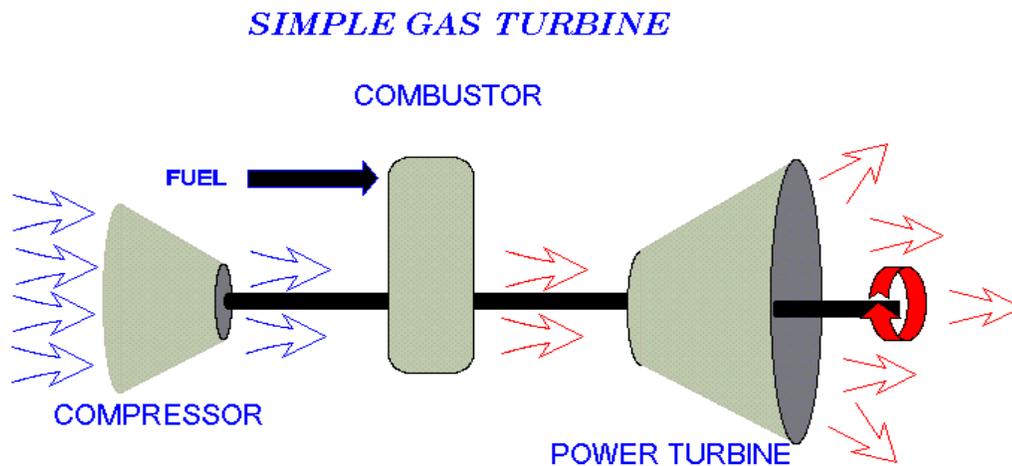
En el presente capítulo se abordaran algunos de los aspectos de cada una de estas maquinas térmicas que se deben tomar en cuenta para la generación de energía eléctrica, utilizando el biogás obtenido de un digestor como combustible.

### **3.1 TURBINA DE GAS**

Una turbina de gas, es un motor térmico rotativo de flujo continuo cuyo fluido de trabajo es un gas. Como la compresibilidad de los gases no puede ser despreciada, las turbinas a gas son turbomáquinas térmicas. Comúnmente se habla de las turbinas a gas por separado de las turbinas ya que, aunque funcionan con sustancias en estado gaseoso, sus características de diseño son diferentes, y, cuando en estos términos se habla de gases, no se espera un posible cambio de fase, en cambio cuando se habla de vapores sí.

Las turbinas de gas se caracterizan por presentar una baja relación peso potencia y una velocidad de giro muy elevada.

La elevada velocidad de giro, que en función del tamaño puede llegar a alcanzar hasta las 40000 revoluciones por minuto, orienta su utilización a una unidad de generación de gases con elevada entalpía que puede utilizarse para propulsión a reacción o puede ser la encargada de accionar una turbina de potencia acoplada a un eje, en la que puede acoplarse cualquier tipo de carga.



*Fig. 3.1 Turbina de Gas*

### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UNA TURBINA DE GAS

Las turbinas de gas operan en base en el principio del ciclo Brayton, en donde aire comprimido es mezclado con combustible y quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para llevar a cabo trabajo. En una turbina de gas con una eficiencia del 33%, aproximadamente  $2/3$  del trabajo producido se usa comprimiendo el aire. El otro  $1/3$  está disponible para generar electricidad, impulsar un dispositivo mecánico, etc.

En la actualidad, la turbina de gas se utiliza ampliamente, pues es capaz de desarrollar muy elevadas potencias con un tamaño y peso contenidos, aunque sin obtenerse rendimientos muy elevados.

Las turbinas de gas orientadas a la generación de trabajo en un eje se han utilizado en buques, trenes, tanques, autobuses, camiones y coches y en los compresores de los gasoductos, pero tienen la utilización prioritaria como generadores de energía eléctrica, bien sea para cubrir las puntas de demanda, gracias a su moderada velocidad de puesta en marcha, bien sea en ciclo combinado con una turbina de vapor para cubrir demandas medianas y con un

elevado rendimiento u otras configuraciones de cogeneración en las que existe un proceso de elevada necesidad de calor, de modo que el gran caudal de gases de escape, una vez aprovechado en la turbina de potencia, se utiliza para la producción de vapor o el secado de un determinado proceso industrial.

### 3.1.2 PARTES DE UNA TURBINA DE GAS

Una turbina de gas consta básicamente de un compresor de aire, una cámara de combustión o combustor, la turbina, toberas y en algunos casos si se requiere mejorar el rendimiento, un regenerador.

**Compresor:** Esta ubicado en la sección frontal de la turbina y es el elemento por el cual se introduce en forma forzada el aire desde el exterior. Esta pieza, por la disposición de sus aletas, permite que el flujo sea "aspirado" hacia el interior de la turbina. Es de flujo axial para grandes turbinas por su elevado rendimiento y capacidad. Para pequeñas turbinas se han usado con éxito compresores centrífugos.



*Fig. 3.2 Compresor de una turbina de gas*

**Cámara de combustión o combustor:** Se fabrican de tipo cilíndrico (can type) o en forma de anillo (annular type). Debe llevar el gas a temperatura uniforme con mínimas diferencias de presión. Generalmente se fabrican metálicos y se enfrían

con el aire entrante, pero también se están construyendo de cerámica, para lograr una mayor eficiencia térmica.

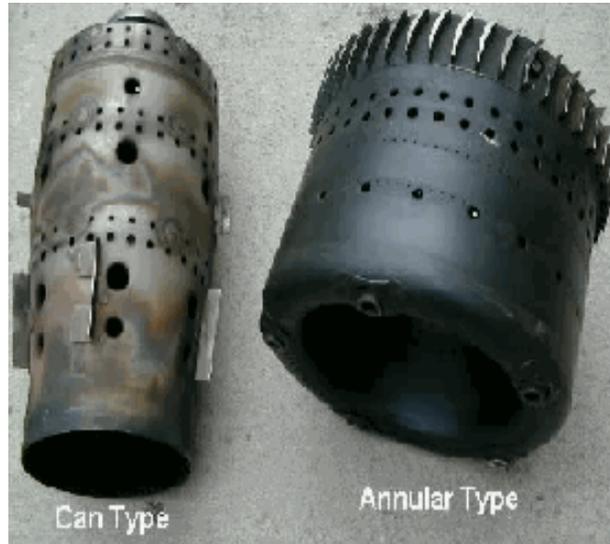


Fig. 3.3 Tipos de cámara de combustión o combustor

**Turbina:** Son casi siempre de flujo axial (axial flow), excepto algunas de pequeñas dimensiones que son de flujo radial (radial flow) dirigido hacia el centro.

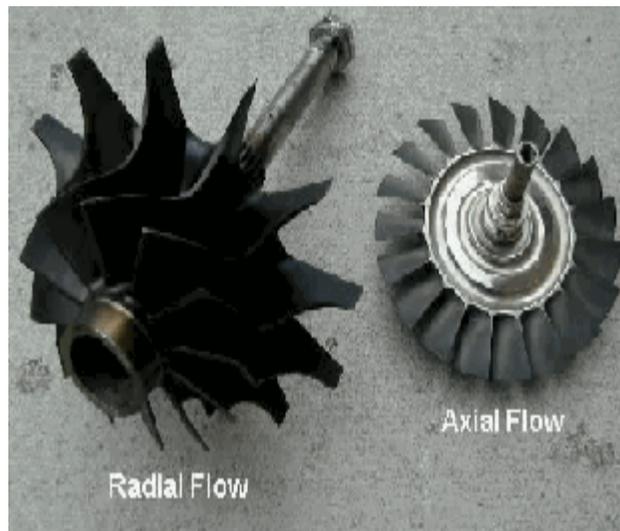


Fig. 3.4 Turbinas de flujo axial y radial

**Tobera del escape:** Para favorecer el constante flujo del aire en el interior de la turbina y poder dirigir efectivamente el aire proveniente de su rueda, se utiliza un aditamento cónico llamado tobera. Esta tobera de escape aumenta considerablemente el empuje del motor.



*Fig. 3.5 Tobera de escape*

### 3.1.3 TIPOS DE TURBINAS DE GAS

Existen múltiples criterios para la clasificación de las turbinas de gas. Algunos de los más importantes son:

- Tipo de Ciclo Termodinámico.
- Modo de Aportación de Energía.
- Disposiciones Mecánicas.
- Tipo de Aplicación de la Turbina de Gas.

#### TIPO DE CICLO TERMODINAMICO

El ciclo termodinámico que realiza una turbina de gas puede diferenciarse en cómo se modeliza la aportación de calor al ciclo termodinámico:

- Aportación de calor a presión constante.
- Aportación de calor a volumen constante.

La turbina de gas con aportación de energía a presión constante sigue el esquema básico de la turbina de gas (compresor, cámara de combustión y turbina) y sigue el ciclo de Brayton. En esta aportación, el flujo de gases es constante, y en ningún momento se interrumpe la vena fluida. Esta disposición es la más utilizada, ya que permite un funcionamiento estable, continuo y sin vibraciones del motor, lo que permitirá unas aceleraciones y velocidades máximas mucho más elevadas que las conseguidas con los motores alternativos convencionales propulsados mediante hélice.

La turbina con aportación de calor a volumen constante sigue el ciclo de Holzward, presenta un rendimiento teórico más elevado y necesita de un compresor mucho más pequeño. Sin embargo presenta desventajas, tales como que el fluido ha de ser confinado en un recinto durante la combustión y, por tanto, la generación de energía deja de ser continua, obteniéndose un flujo pulsatorio que originara problemas de vibraciones.

Es por esto y por otros problemas que presentan que en la actualidad están en desuso, y las turbinas a presión constante constituyen la totalidad de las turbinas de gas actuales.

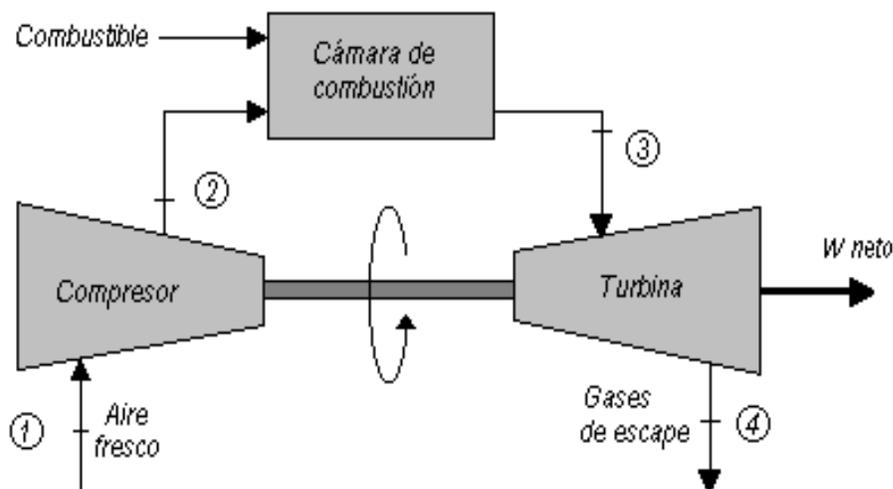
### **APORTACION DE ENERGIA AL CICLO**

En función del ciclo de trabajo que sigue el fluido motor, encontramos:

- Turbinas de ciclo abierto.
- Turbinas de ciclo cerrado.

La gran diferencia entre ambos radica en el modo en el que se realiza la aportación de energía al ciclo, de modo que puede producirse en el interior del mecanismo mediante un proceso de combustión o del exterior al interior mediante un intercambiador,

En las turbinas de ciclo abierto, motor endotérmico, que se muestra en la figura 3.5, en las que el fluido motor es el comburente de la combustión, la aportación de calor es rápida, ya que proviene de la combustión entre combustible aportado y el fluido motor que es el aire. Este aire proviene de la atmosfera y en esta se descargan los gases de escape de modo que la parte final del ciclo no se realiza y se sustituye el fluido motor por aire fresco del exterior.

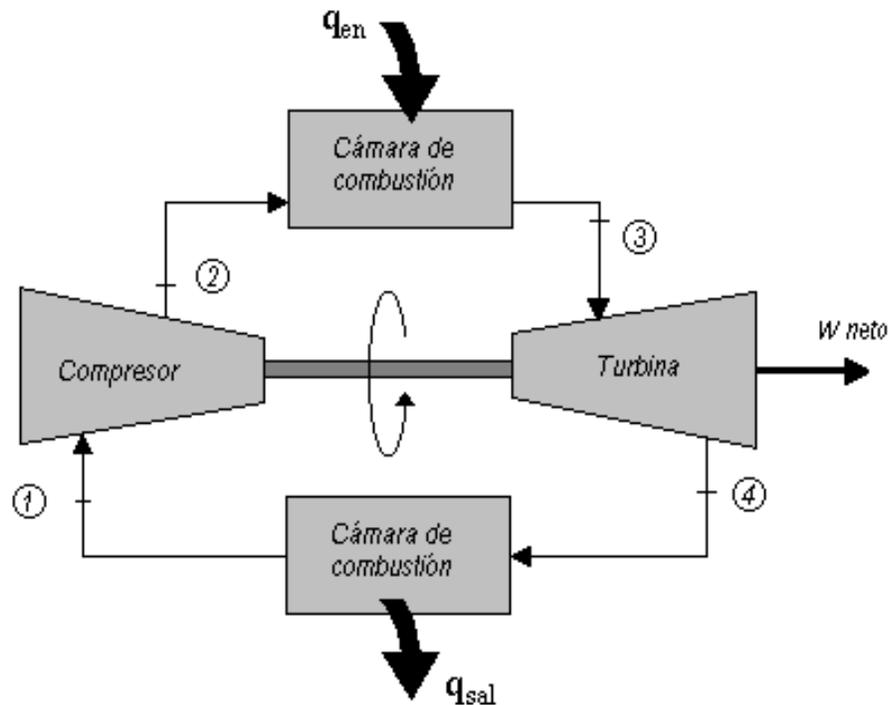


*Fig. 3.6 Esquema de una Turbina de Ciclo Abierto*

En las turbinas de ciclo cerrado, motor exotérmico, que se muestra en la figura 3.6, la aportación de calor es lenta por que interviene la transferencia de calor. El fluido de trabajo circula en un circuito cerrado y no hay descarga en la atmosfera. La energía necesaria para calentar el fluido se obtendrá mediante un fluido auxiliar que cederá posteriormente el calor al fluido motor mediante un sistema de intercambio.

Las encontramos en aplicaciones en que se aprovecha un calor residual a una elevada temperatura en que no es posible una instalación de una turbina de vapor, siempre que los factores volumen y peso pierdan importancia.

Este tipo de turbinas presenta la posibilidad de utilizar un fluido motor de alta densidad, y no aire, pues al no conllevar los gases de la combustión elimina el riesgo de deterioro de los alabes de la turbina. Puede utilizar también combustibles de baja calidad, por ser un motor exotérmico.



*Fig. 3.7 Esquema de una Turbina de Ciclo Cerrado*

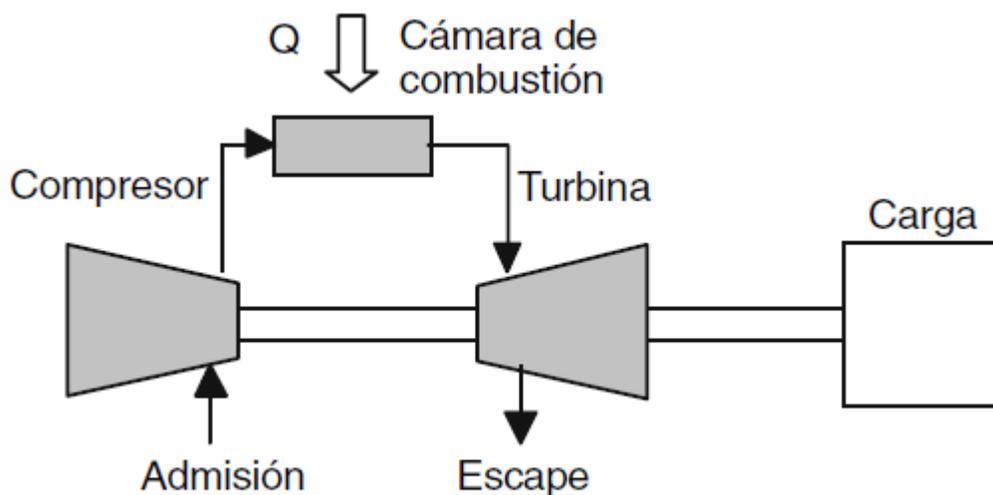
## DISPOSICIONES MECANICAS

Existen muchas variantes del esquema clásico de una turbina de gas (compresor, cámara de combustión y turbina de expansión), y son consecuencia de la adición de varios componentes de entrada y salida al generador de gas.

En las aplicaciones industriales, donde se debe obtener la potencia en un eje, es decir, potencia mecánica, existen múltiples disposiciones, y así encontramos, en función del acoplamiento entre la turbina y el generador de gas:

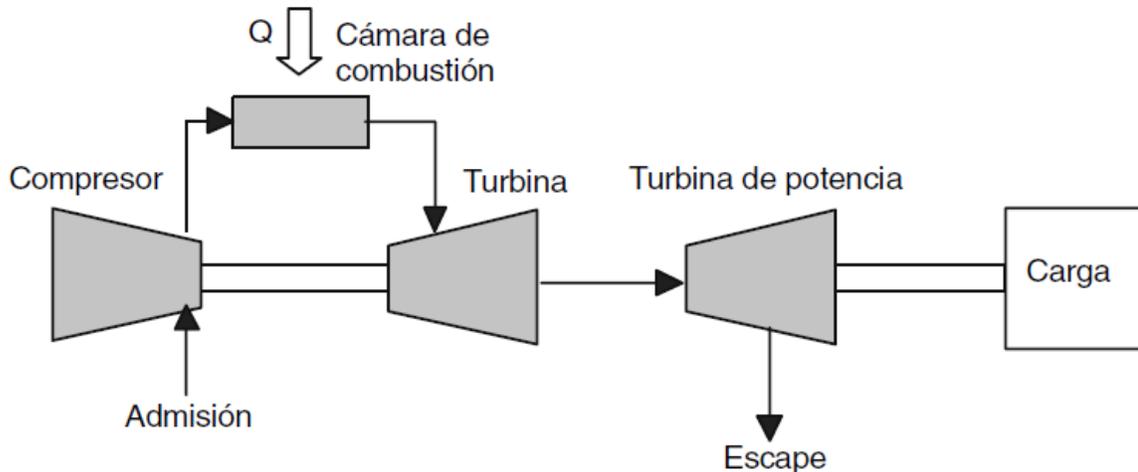
- Turbinas de un solo eje.
- Turbinas de doble eje, con unidad generadora de gases simple o compuesta.

Las turbinas de un solo eje, en la figura 3.7, son turbinas de gas en las que solo hay un compresor y una turbina, que forzosamente giraran a la misma velocidad, y no será otra que la del eje de obtención de potencia mecánica, donde ira conectada la carga. Es un montaje adecuado para el accionamiento de alternadores, ya que tienen una buena adaptación a las variaciones de carga y mantienen fácilmente la frecuencia de giro.



*Fig. 3.8 Esquema de una Turbina de un solo eje y ciclo abierto*

Las turbinas de doble eje (también conocidas como de eje partido) (Fig. 3.8) son turbinas de gas en las que se pueden distinguir, en la misma turbina de gas, dos unidades, la generadora de gas que está formada por un compresor, las correspondientes cámaras de combustión, y una turbina que simplemente extraerá la potencia necesaria para mover el compresor. La otra unidad es la de potencia, que formada por otra turbina de expansión, finalizará dicho proceso de los gases obteniendo la potencia útil del motor, y que transmitirá mediante un eje independiente del de la unidad generadora de gases.



*Fig. 3.9 Esquema de una Turbina de doble eje o eje partido*

La unidad generadora de gases no es más que una turbina de un solo eje que obtiene menos potencia. A la turbina de expansión de la unidad generadora de gases se le llama de alta presión, porque es la que recibe los gases con la presión más elevada del ciclo. La otra turbina es la de baja presión, aunque es la que obtendrá la mayor parte de la potencia.

### 3.2 CICLOS TERMODINAMICO DE LAS TURBINAS DE GAS

Para obtener el trabajo teórico de una turbina de gas, el fluido motor sigue un ciclo de trabajo termodinámico a su paso por el motor. En la mayoría de las aplicaciones de la turbina de gas, el fluido motor sigue el ciclo de Brayton, aunque puede encontrarse en su estado más básico o con algunas modificaciones, tal como se explica a continuación.

#### 3.2.1 CICLO BRAYTON

Es el ciclo teórico que implementa la turbina de gas; consta de evoluciones que se esquematizan en el siguiente apartado.

1.- Compresión adiabática (1-2), cuyo trabajo de compresión se expresa a continuación:

$$W_c = m \cdot (h_2 - h_1) = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

2.- Aportación de calor a presión constante (2-3), que podemos expresar como:

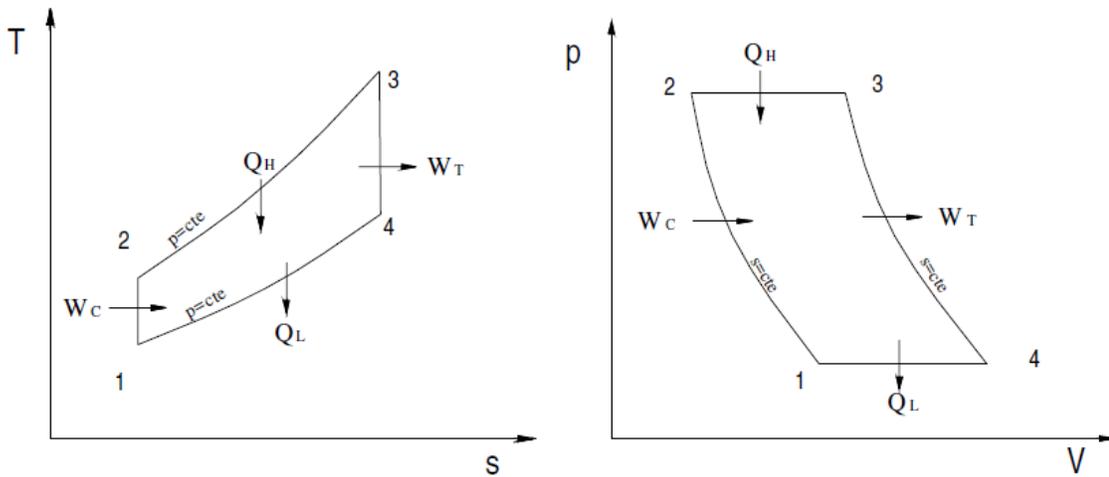
$$Q_H = m \cdot (h_3 - h_2)$$

3.- Expansión adiabática (3-4), en la que el fluido cede el trabajo:

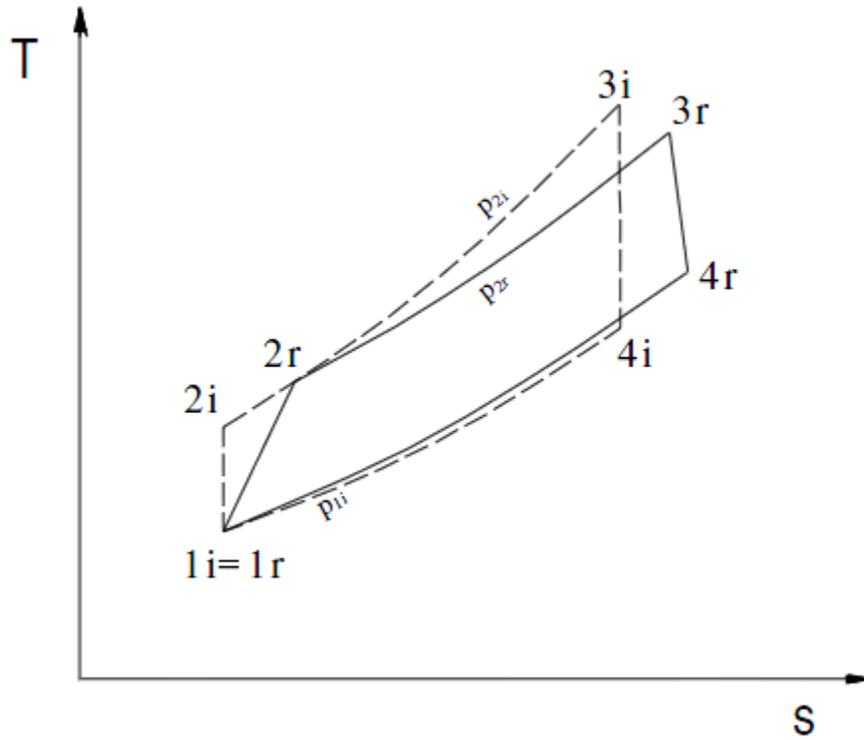
$$W_T = m \cdot (h_3 - h_4) = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)$$

4.- Extracción de calor a presión constante (4-1).

$$Q_L = m \cdot (h_1 - h_4)$$



*.Fig. 3.10 Diagrama T-S y P-v del ciclo Brayton*



*Fig. 3.11 Ciclo ideal (i) y real (r) de una turbina de gas.*

La expresión del rendimiento teórico del ciclo es, en función de la temperatura y la presión:

$$\eta_T = \frac{W_{NETO}}{Q_H} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r \left( \frac{r-1}{r} \right)}$$

$$W_{NETO} = W_T - W_C$$

$$r_{OPTIMO} = \left( \frac{T_3}{T_1} \right)^{\left( \frac{\gamma}{2(\gamma-1)} \right)}$$

Donde  $\gamma$  es el cociente de calores específicos a presión y volumen constante y  $r$  es la relación de compresión  $\left( \frac{P_{max}}{P_{min}} \right)$ . En consecuencia, el rendimiento teórico del ciclo aumenta si:

- Aumenta la relación de compresión, aunque existe una relación de compresión óptima que maximiza el rendimiento.
- Aumenta la temperatura máxima del ciclo.
- Se reduce la temperatura de entrada al compresor.
- Aumenta el cociente de calores específicos del fluido motor.

El rendimiento asociado al ciclo depende en la máquina real de los siguientes aspectos:

- Los procesos de compresión y expansión no son reversibles ni adiabáticos.
- El aporte de calor no se realiza a presión constante.
- Pérdidas de carga debidas a la fricción del fluido.

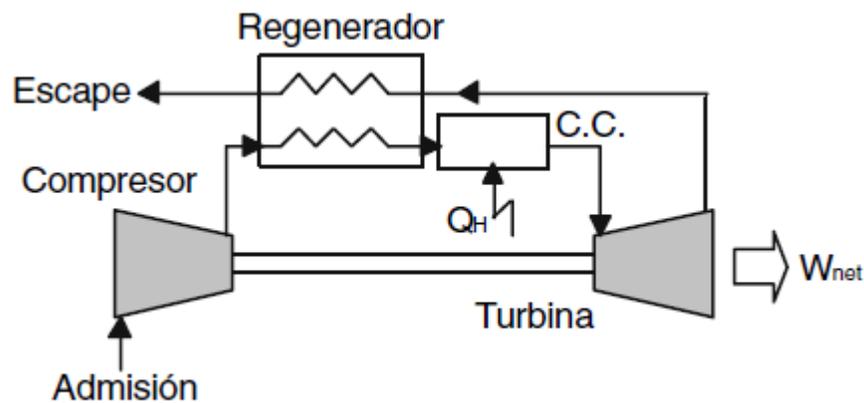
Todas estas irreversibilidades hacen disminuir el rendimiento. El grado de irreversibilidad de los componentes se puede cuantificar al definir el rendimiento isentrópico, tanto para el compresor como para la turbina, que compara, en el caso del compresor, el trabajo necesario si el proceso fuese reversible con el trabajo suministrado en el caso real.

En el caso de la turbina, se compara el trabajo de expansión obtenido en una situación real con el caso ideal.

Sobre la concepción básica del ciclo termodinámico de la turbina de gas se han desarrollado distintas variaciones que en seguida se exponen de manera breve.

### 3.2.2 CICLO BRAYTON REGENERATIVO

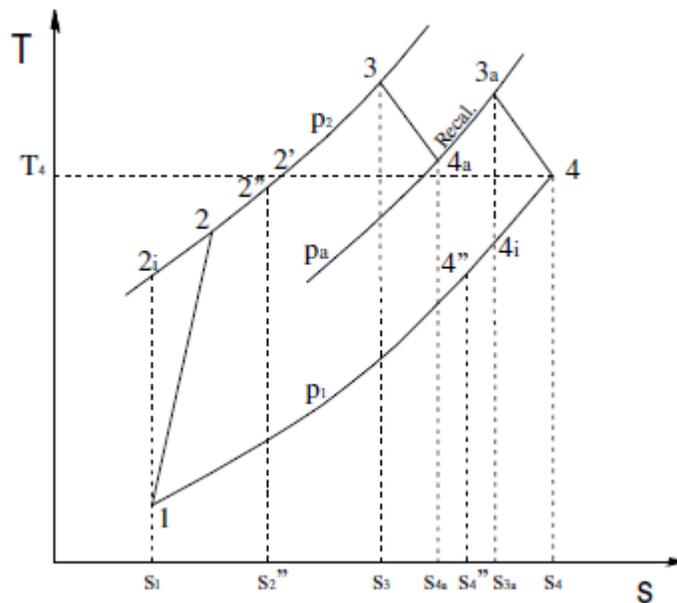
La idea básica de esta modificación del ciclo básico es aprovechar el calor de los gases de salida, para calentar el aire que procede del compresor y que entrara en la cámara de combustión (Fig. 3.7). El proceso es viable debido a una diferencia de temperatura entre los gases de salida de la turbina y los de salida del compresor de unos 200°C o más. La operación se realiza mediante un intercambiador de calor, que recibirá el nombre de regenerador. Presenta como principal ventaja la reducción del consumo de combustible y, por tanto, un aumento del rendimiento térmico del ciclo, y como desventaja el aumento del coste de inversión y su utilización principalmente en turbina estacionaria.



*Fig. 3.12 Esquema de una Turbina de Gas con Regeneración*

### 3.2.3 CICLO CON RECALENTAMIENTO

En el ciclo con recalentamiento se realiza la expansión en varias etapas, volviendo a calentar los gases hasta la temperatura máxima del ciclo antes de cada etapa de expansión (Fig. 3.8). Se obtiene a cambio elevados aumentos del trabajo específico del ciclo, pero su complejidad técnica desaconseja su utilización si no es para aplicaciones muy concretas.



*Fig. 3.13 Diagrama del Ciclo con Recalentamiento*

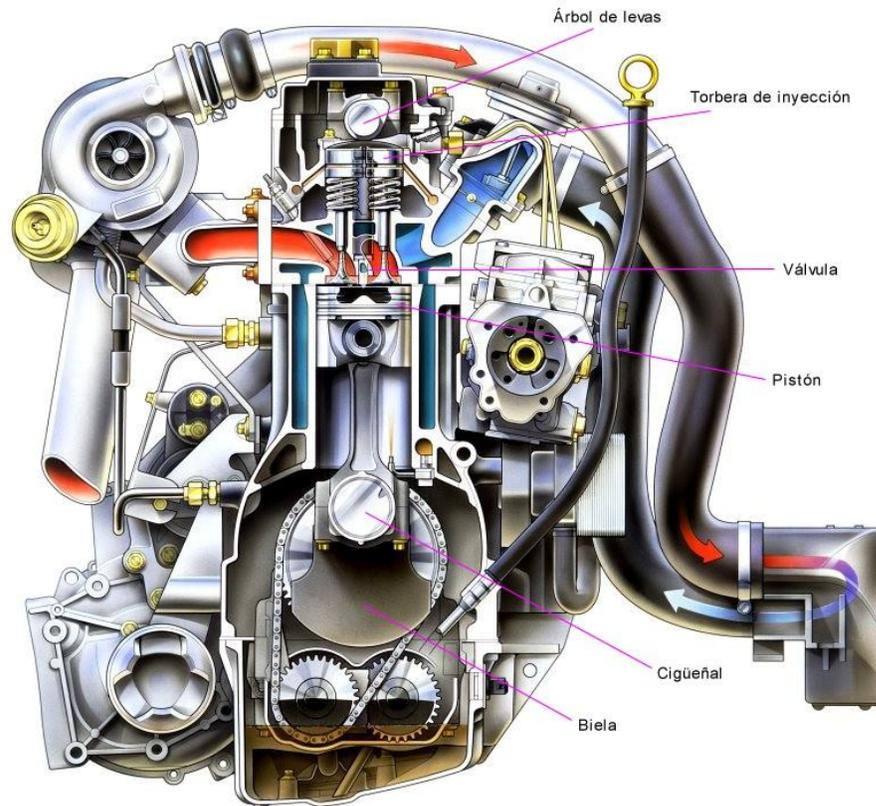
### 3.3 MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma, a diferencia de, por ejemplo, la máquina de vapor.

#### 3.3.1 MOTOR DIESEL

El motor diesel es un motor térmico de combustión interna en el que la combustión se logra por simple compresión del aire en el interior del cilindro, de modo que al inyectarse el combustible se garantice su autoinflamación.

Un motor diesel funciona mediante la ignición (encendido) del combustible al ser inyectado muy pulverizado y con alta presión en una cámara de combustión que contiene aire a una temperatura superior a la temperatura de autocombustión, sin necesidad de chispa como en los motores de gasolina. Esta es la llamada autoinflamación.



*Fig. 3.14 Visión general de un Motor Diesel*

La temperatura que inicia la combustión procede de la elevación de la presión que se produce en el segundo tiempo del motor, la compresión. El combustible se inyecta en la parte superior de la cámara de combustión a gran presión desde unos orificios muy pequeños que presenta el inyector de forma que se atomiza y se mezcla con el aire a alta temperatura y presión (entre 700 y 900 °C) Como resultado, la mezcla se inflama muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo.

Esta expansión, al revés de lo que ocurre con el motor de gasolina, se hace a presión constante ya que continúa durante la carrera de trabajo o de expansión. La biela transmite este movimiento al cigüeñal, al que hace girar, transformando el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación.

Para que se produzca la autoinflamación, es necesario emplear combustibles más pesados que los empleados en el motor de gasolina, empleándose la fracción de destilación del petróleo comprendida entre los 220 y 350°C, que recibe la denominación de gasóleo.

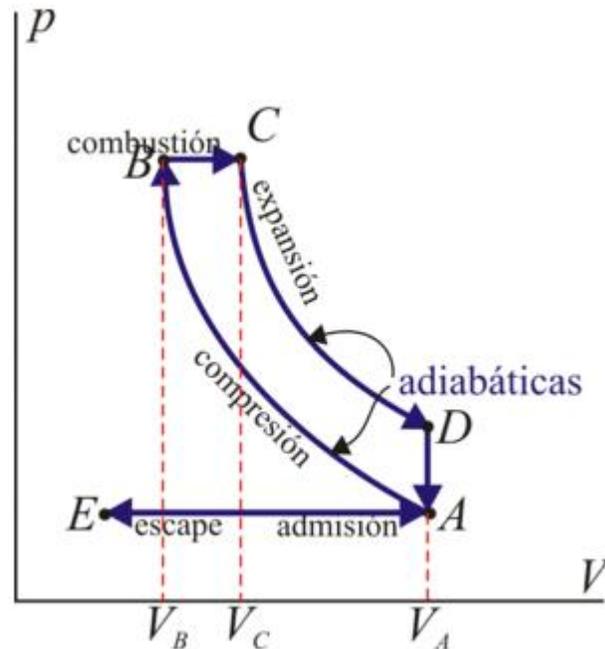
La principal ventaja de los motores diesel frente a los motores Otto (gasolina), estriba en su menor consumo de combustible, además de que es más barato; por ello su uso se ha extendido en aplicaciones con elevada tasa de utilización.

En automoción, las desventajas iniciales de estos motores principalmente precio, costes de mantenimiento y prestaciones, se están reduciendo debido a mejoras como la inyección electrónica y el turbocompresor. No obstante, la adopción para los motores de automoción de la precámara, con la que se consiguen prestaciones equiparables a los motores de gasolina, presentan el inconveniente de incrementar el consumo, con lo que la principal ventaja de estos motores, prácticamente desaparece.

A continuación se presentan las aplicaciones de estos motores:

- Maquinaria Agrícola (tractores, cosechadoras)
- Propulsión ferroviaria
- Propulsión marina
- Automóviles
- Grupos generadores de energía eléctrica (centrales eléctricas y de emergencia)
- Accionamiento industrial (bombas, compresores, etc. Especialmente de emergencia)

### 3.3.2 CICLO DE UN MOTOR DIESEL



*Fig. 3.15 Diagrama P-v del Ciclo Diesel.*

Para modelar el comportamiento del motor diesel se considera un ciclo Diesel de seis pasos, dos de los cuales se anulan mutuamente:

#### **Admisión E→A**

El pistón baja con la válvula de admisión abierta, aumentando la cantidad de aire en la cámara. Esto se modela como una expansión a presión constante (ya que al estar la válvula abierta la presión es igual a la exterior). En el diagrama PV aparece como una recta horizontal.

#### **Compresión A→B**

El pistón sube comprimiendo el aire. Dada la velocidad del proceso se supone que el aire no tiene posibilidad de intercambiar calor con el ambiente, por lo que el proceso es adiabático. Se modela como la curva adiabática reversible A→B, aunque en realidad no lo es por la presencia de factores irreversibles como la fricción.

### **Combustión B→C**

Un poco antes de que el pistón llegue a su punto más alto y continuando hasta un poco después de que empiece a bajar, el inyector introduce el combustible en la cámara. Al ser de mayor duración que la combustión en el ciclo Otto, este paso se modela como una adición de calor a presión constante. Éste es el único paso en el que el ciclo Diesel se diferencia del Otto.

### **Expansión C→D**

La alta temperatura del gas empuja al pistón hacia abajo, realizando trabajo sobre él. De nuevo, por ser un proceso muy rápido se aproxima por una curva adiabática reversible.

### **Escape D→A y A→E**

Se abre la válvula de escape y el gas sale al exterior, empujado por el pistón a una temperatura mayor que la inicial, siendo sustituido por la misma cantidad de mezcla fría en la siguiente admisión. El sistema es realmente abierto, pues intercambia masa con el exterior. No obstante, dado que la cantidad de aire que sale y la que entra es la misma podemos, para el balance energético, suponer que es el mismo aire, que se ha enfriado. Este enfriamiento ocurre en dos fases. Cuando el pistón está en su punto más bajo, el volumen permanece aproximadamente constante y tenemos la isócara **D→A**. Cuando el pistón empuja el aire hacia el exterior, con la válvula abierta, empleamos la isobara **A→E**, cerrando el ciclo.

En total, el ciclo se compone de dos subidas y dos bajadas del pistón, razón por la que es un ciclo de cuatro tiempos, aunque este nombre se suele reservar para los motores de gasolina.

### Rendimiento en función de las temperaturas

Un ciclo diesel contiene dos procesos adiabáticos, A→B y C→D, en los que no se intercambia calor. De los otros dos, en el calentamiento a presión constante B→C, el gas recibe una cantidad de calor  $|Q_c|$  del exterior igual a:

$$|Q_c| = n c_p (T_C - T_B)$$

En el enfriamiento a volumen constante D→A el sistema cede una cantidad de calor al ambiente

$$|Q_f| = n c_v (T_D - T_A)$$

El rendimiento del ciclo será entonces:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{c_v (T_D - T_A)}{c_p (T_C - T_B)} = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{\gamma (T_C - T_B)}$$

Con  $\gamma = c_p / c_v$  la proporción entre las capacidades caloríficas.

### Rendimiento en función de los volúmenes

La expresión anterior requiere conocer las cuatro temperaturas de los vértices del ciclo. Puede simplificarse teniendo en cuenta las características de cada uno de los procesos que lo componen.

Así tenemos, para la compresión adiabática A→B

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

Que, teniendo en cuenta la relación de compresión, podemos reescribir como:

$$r \equiv \frac{V_A}{V_B} \Rightarrow T_B = T_A r^{\gamma-1}$$

Para la expansión a presión constante, aplicando la ecuación de estado de los gases ideales:

$$p_B = p_C \Rightarrow \frac{V_B}{T_B} = \frac{V_C}{T_C}$$

Introduciendo ahora la relación  $r_c = V_C/V_B$  obtenemos

$$T_C = T_B r_c = T_A r_c r^{\gamma-1}$$

Por último, para la temperatura en **D** aplicamos de nuevo la ley de Poisson y el que el enfriamiento es a volumen constante:

$$V_D = V_A T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1} \Rightarrow T_D = T_C \left( \frac{V_C}{V_A} \right)^{\gamma-1}$$

Multiplicando y dividiendo por  $V_B$  y aplicando el valor de la temperatura en **C**

$$T_D = T_A r_c r^{\gamma-1} \left( \frac{r_c}{r} \right)^{\gamma-1} = T_A r_c^\gamma$$

Combinado estos resultados nos queda

$$T_D - T_A = T_A r_c^\gamma - T_A = T_A (r_c^\gamma - 1)$$

$$T_C - T_B = T_A r_c r^{\gamma-1} - T_A r^{\gamma-1} = T_A r^{\gamma-1} (r_c - 1)$$

Sustituyendo esto en la expresión del rendimiento obtenemos finalmente

$$\eta = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{\gamma(T_C - T_B)} = 1 - \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma r^{\gamma-1} (r_c - 1)}$$

### **3.4 COMPRESORES**

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Los compresores son ampliamente utilizados en la actualidad en campos de la ingeniería y hacen posible el modo de vida del ser humano por las razones siguientes:

- Son parte importantísima de muchos sistemas de refrigeración y se encuentran en cada refrigerador casero, y en infinidad de sistemas de aire acondicionado.
- Se encuentran en sistemas de generación de energía eléctrica, tal como lo es el Ciclo Brayton.
- Se encuentran en el interior muchos "motores de avión", como lo son los turborreactores y hacen posible su funcionamiento.
- Se pueden comprimir gases para la red de alimentación de sistemas neumáticos, los cuales mueven fábricas completas.

#### **3.4.1 TIPOS DE COMPRESORES**

Existen diferentes tipos de compresores, pero los más utilizados en la industria son:

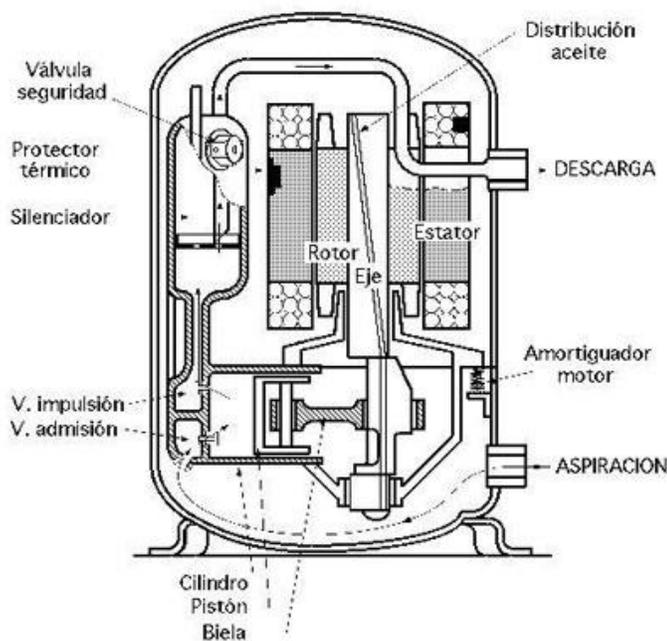
- Alternativos o Reciprocantes (de simple o de doble efecto y de una o dos etapas).
- Dinámicos (Centrífugos y Axiales) (de varias etapas)
- Rotativo (de tornillo)

### 3.4.1.1 Compresor Alternativo o Reciprocante

Los compresores alternativos son máquinas de desplazamiento positivo en las cuales sucesivas cantidades de gas o aire quedan atrapadas dentro de un espacio cerrado y, mediante un pistón, se eleva su presión hasta que se llega a un valor de la misma que consigue abrir las válvulas de descarga.

El elemento básico de compresión de los compresores alternativos consiste en un solo cilindro en el que una sola cara del pistón es la que actúa sobre el gas (simple efecto).

Existen unidades en las que la compresión se lleva a cabo con las dos caras del pistón (doble acción), actuando de la misma forma que si tuviéramos dos elementos básicos de simple efecto trabajando en paralelo dentro de una misma carcasa.



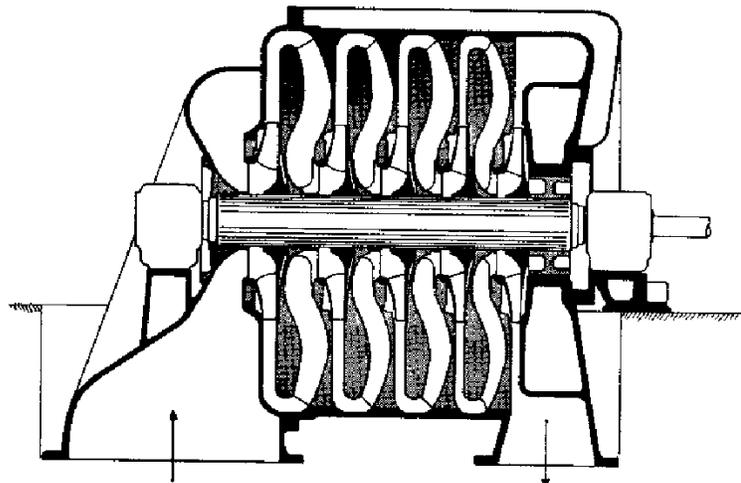
*Fig. 3.16 Compresor Alternativo*

### 3.4.1.2 Compresor Dinámico

El compresor dinámico es una máquina en la que el gas es comprimido por la acción dinámica de las paletas giratorias de uno o más rodetes. El rodete logra esta transmisión de energía variando el momento y la presión del gas. El momento (relativo a la energía cinética) se convierte en energía de presión útil al perder velocidad el gas en el difusor del compresor u otro rodete.

Un compresor de este tipo está constituido esencialmente por dos partes:

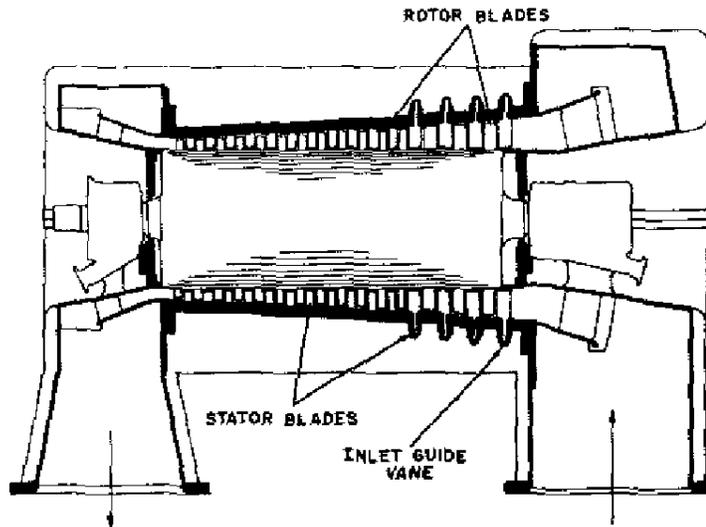
- El rodete, el cual impulsa el gas.
- La carcasa, que primero conduce el gas hasta el rodete y después lo recibe de él a una presión mayor. Según el flujo interno de gas dentro del compresor clasificaremos los compresores en:
  - Compresores centrífugos. En ellos el flujo de gas es radial y la transferencia de energía se debe predominantemente a un cambio en las fuerzas centrífugas actuantes sobre el gas.



*Fig. 3.17 Compresor Centrífugo*

- Compresores axiales. En ellos el flujo de gas es paralelo al eje del compresor. En ellos el gas es comprimido en pasos sucesivos. Cada paso está compuesto por

una corona móvil solidaria al rotor y otra fija perteneciente a la carcasa. La energía se transfiere al gas en forma de momento cinético por la corona móvil, para pasar a continuación a la fija donde transforma su velocidad en presión.

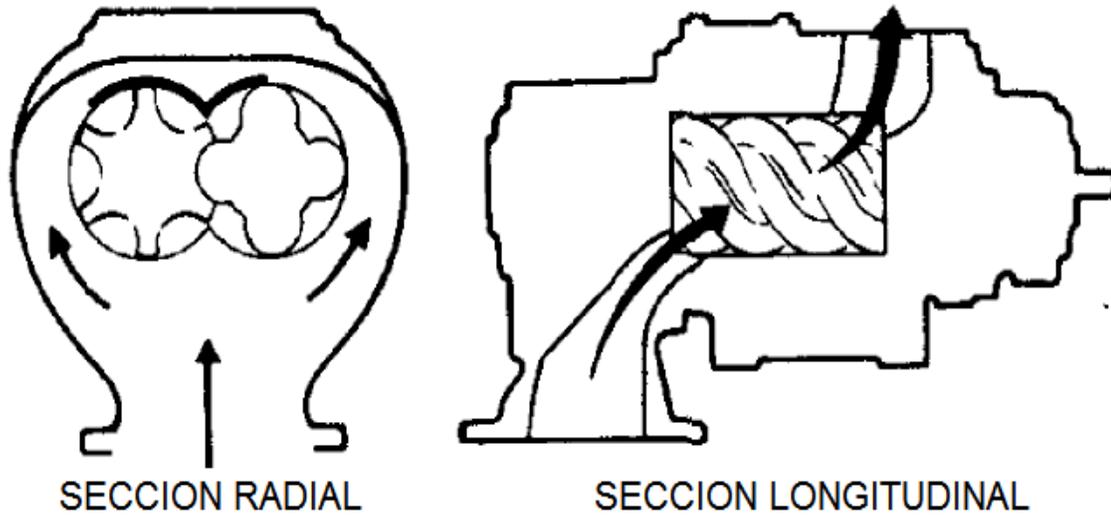


*Fig. 3.18 Compresor Axial*

Sin embargo, en el ámbito industrial los compresores axiales no son de mucha utilidad, es por eso que casi todas las explicaciones se centran en los compresores centrífugos.

### **3.4.1.3 Compresor de Tornillo**

Este tipo de compresor consiste básicamente en dos rotores helicoidales situados dentro de la carcasa de la bomba. Por su movimiento absorben gas que posteriormente se comprime dentro de la cámara helicoidal formada entre los rotores y la carcasa. Como se ve en la figura 3.18, los rotores difieren en su forma de manera que ajusten entre sí formando un cierre hermético por el cual no pueda escapar el gas al ser comprimido.



*Fig. 3.19 Disposición de los rotadores de un Compresor de Tornillo*

La principal característica de este tipo de compresores es que pueden trabajar con corrientes gaseosas que contengan una cierta cantidad de líquido. Este tipo de bombas requieren el uso de aceite de lubricación, sirviendo adicionalmente como líquido de sello.

## CAPITULO IV

# ANALISIS TECNICO-ECONOMICO

## 4.1 ANÁLISIS TÉCNICO

Dadas ya algunas de las características de las máquinas que son utilizadas en la generación de electricidad a través de la biomasa, se procede a hacer un pequeño análisis termodinámico para tener un panorama general de cuál es el equipo más eficiente para este tipo de generación de energía.

Cabe señalar que este tipo de tecnología ya es utilizada en algunos estados de la Republica Mexicana, y en el caso de este trabajo nos basamos particularmente en un equipo ubicado en una granja lechera en el Estado de Guanajuato.

Las fórmulas utilizadas son de simple sustitución ya que casi todos los datos son conocidos y algunos datos fueron sacados de tablas, bibliografía y algunos otros de internet.

El primer análisis que se hizo fue el del compresor que alimenta a los motores de biogás. Los resultados fueron los siguientes:

### Memoria de Cálculos

#### 4.1.1 Compresor

La eficiencia común en datos técnicos de manuales de compresores usados en el rancho lechero es:

$$\eta = 0.90$$

$$\text{Temperatura de entrada } T_1 = 25^\circ\text{C} = 298.15^\circ\text{K}$$

$$\text{Temperatura de salida } T_2 = 123.5220^\circ\text{C} = 396.6989^\circ\text{K}$$

$$\text{Presión de entrada } P_1 = 101.29\text{kPa}$$

$$\text{Presión de salida } P_2 = 303.86\text{kPa}$$

Con los datos anteriores se calcula el trabajo del compresor con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{\eta} \cdot cp \cdot T_1 \left[ \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

El “cp” es el calor específico a presión constante del metano, que es el principal componente del biogás. El cp está dado en  $BTU/lb^{\circ}R$

$$cp = 0.211 + \frac{6.25T}{10^4} - \frac{8.28T^2}{10^8}$$

$$T^{\circ}R = 1.8(T^{\circ}K) = 1.8(298.15)$$

$$= 536.67^{\circ}R$$

$$cp = 0.5225 \frac{BTU}{lb^{\circ}R} = 0.5224 \frac{kcal}{kg^{\circ}K}$$

La relación de compresión  $\varepsilon$  es:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} = \frac{303.86 kPa}{101.29 kPa}$$

$$\varepsilon = 3$$

$k$  es la relación de calores específicos.

$$k = \frac{cp}{cv}$$

$$cv = cp - R_{\text{METANO}}$$

$R$  es la constante específica de un gas, que para el metano es:

$$R = 0.12383 \frac{kcal}{kg^{\circ}K}$$

Entonces:

$$c_v = 0.5224 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}} - 0.12383 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$$

$$c_v = 0.3986 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$$

Y la relación de calores específicos queda:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0.5224 \text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{K}}{0.39857 \text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{K}} = 1.3107$$

Teniendo estos datos se calcula el trabajo del compresor.

$$W = \left( \frac{1}{0.90} \right) \left( 0.5224 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) (298.15^\circ\text{K}) \left[ 3^{\frac{1.3107-1}{1.3107}} \right]$$

$$W = 51.4799 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

La temperatura de salida  $T_2$  se calculo con la siguiente ecuación:

$$T_2 = T_1 \left[ 1 + \frac{1}{\eta} \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]$$

$$T_2 = 396.6989^\circ\text{K}$$

#### 4.1.2 Motor de combustión interna

Ya calculados los datos del compresor, estos servirán para dar paso a los cálculos del motor de combustión.

La presión de entrada del motor es la presión de salida del compresor, así como la temperatura, entonces:

$$P_1 = 3 \text{ Atm} \approx 303.86 \text{ KPa}$$

$$T_1 = 123.5220^\circ\text{C} = 396.6989 \text{ K}$$

Generalmente la eficiencia de un motor de combustión interna, oscila entre el 25-30%, se tomo la eficiencia más alta para hacer los cálculos.

$$\eta_{motor} = 0.30$$

$$\dot{W}_{Electrica} = 35 \text{ KW}$$

La eficiencia de un motor eléctrico esta en el rango de 85-90%.

$$\eta_{Electrica} = 0.90$$

La potencia mecánica está dada por la relación entre potencia eléctrica y la eficiencia eléctrica.

$$\dot{W}_{Mecanica} = \frac{\dot{W}_{Electrica}}{\eta_{Electrica}} = \frac{35 \text{ KW}}{0.90} = 38.89 \text{ kW}$$

Y la eficiencia real está dada por:

$$\eta_{Real} = \frac{\dot{W}_{Mecanica}}{Q_A}$$

El calor agregado lo obtenemos:

$$Q_A = \text{Poder Calorifico (Inferior)} \cdot \text{Flujo (Combustible)}$$

Poder calorífico del biogás

$$4500 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3} \rightarrow 18840.6 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$

Consumo del Motor

$$35 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \text{ de biogas} \rightarrow 0.009722 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cantidad de Energía generada

$$35 \frac{kW}{hr} \text{ por motor}$$

Entonces:

$$Q_A = 18840.6 \frac{kJ}{m^3} \cdot 0.009722 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_A = 183.1683 \frac{kJ}{s}$$

Eficiencia real

$$\eta_{Real} = \frac{38.89 kW}{183.1683 \frac{kJ}{s}} = 0.2123$$

$$\eta_{Real} = 21.23\%$$

Eficiencia Total

$$\eta_{Total} = (\eta_{Compresor})(\eta_{Motor})$$

$$\eta_{Total} = (0.90)(0.2123)$$

$$\eta_{Total} = 0.1911 = 19.11\%$$

De acuerdo a datos reales la vida útil de estos motores modificados es de 2.5 años, debido a los esfuerzos tan altos a los que son sometidos. El requerimiento de la planta es de 90 kW, por lo que tienen instalados 3 motores los cuales tienen una potencia combinada de 105 kW, aunque en realidad solo dos en carga normal y el tercero cuando aumente el pico de demanda que es de 17 a 21 horas.

### 4.1.3 Compresor (Microturbina)

De acuerdo a datos de las aplicaciones de la turbina de gas la presión de entrada y de salida, así como las temperaturas del compresor, son las siguientes:

$$P_1 = 1 \text{ Bar} = 100 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 25^\circ\text{C} = 298.15 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (Temperatura ambiente)}$$

$$P_2 = 5 \text{ Bar} = 500 \text{ kPa}$$

$$T_2 = 223.4571^\circ\text{C} = 496.6071^\circ\text{K}$$

Como ya se dijo con anterioridad la eficiencia de un compresor esta alrededor de un 90%, entonces:

$$\eta_{\text{Compresor}} = 0.90$$

La relación de compresión es:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} = \frac{500 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} = 5$$

$$W_{\text{Compresor}} = \frac{1}{\eta_{\text{Compresor}}} c_p \cdot T_1 \left[ \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ (En este caso el } c_p \text{ es el del aire)}$$

$$c_{p \text{ Aire}} = 0.24 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \text{ (Dato de Tablas)}$$

$$c_{v \text{ Aire}} = 0.17 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \text{ (Dato de Tablas)}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0.24}{0.17} = 1.4118$$

Se procede a calcular la temperatura de salida y el trabajo del compresor.

$$T_2 = T_1 \left[ 1 + \frac{1}{\eta_{\text{Compresor}}} \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]$$

$$T_2 = 298.15 + \frac{298.15}{0.90} (5^{0.2917} - 1)$$

$$T_2 = 496.6071^\circ\text{K}$$

El trabajo es:

$$W_{Compresor} = \frac{1}{\eta_{Compresor}} c_p T_1 \left[ \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$W_{Compresor} = \left( 79.5067 \frac{kcal}{kg} \right) (0.5991)$$

$$W_{Compresor} = 47.6297 \frac{kcal}{kg} = 199.4160 \frac{kJ}{kg}$$

#### 4.1.4 Microturbina de gas

La microturbina es un pequeño motor de ciclo Brayton, que básicamente es una turbina de gas de ciclo simple, pero con un menor costo y con la misma eficiencia. Es por eso que se optó por trabajar con uno de estos equipos.

La turbina de gas funciona gracias al combustor o cámara de combustión, que es el dispositivo en donde se inyecta combustible, se mezcla con el aire comburente procedente del compresor y se provoca la combustión. Este proceso es continuo y se realiza en condiciones de presión y temperaturas elevadas.

El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para llevar a cabo trabajo.

Datos de entrada de la turbina:

$$T_3 = 980^\circ C = 1253.15^\circ K$$

$$P_3 = 5 \text{ bar} = 500 \text{ kPa}$$

La temperatura y presión de salida fueron obtenidas de la siguiente manera:

Temperatura a la salida de la turbina.

$$T_4 = T_3 \left( \varepsilon^{-\left(\frac{k-1}{k}\right)} \right)$$

$$T_4 = 1253.15^\circ K (5^{-0.2884})$$

$$T_4 = 787.8562^\circ K = 514.7062^\circ C$$

Para sacar la  $k$  de la mezcla primero se tuvo que obtener el “cp” de la relación aire-combustible de la siguiente manera. La relación aire combustible para turbinas de gas es de 60, es decir, se abastecen 60 partes de aire por una de combustible.

La ecuación para sacar la relación es:

$$m_{a/c} = \frac{\text{Masa de aire}}{\text{Masa de combustible}}$$

La masa de combustible se obtiene así:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$\rho = \text{densidad}$   
 $m = \text{masa}$   
 $v = \text{volumen}$

La densidad del biogás es de  $1.08 \text{ kg/m}^3$ , entonces despejamos y sustituimos.

$$m = (\rho)(v)$$

$$m = \left(1.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)(35 \text{ m}^3)$$

$$m = 37.8 \text{ kg}$$

Ya que tenemos la masa del combustible, podemos obtener la masa de aire a partir de la fórmula de la relación aire combustible.

$$m_{a/c} = \frac{\text{Masa de aire}}{\text{Masa de combustible}}$$

$$60 = \frac{\text{Masa de aire}}{37.8 \text{ kg}}$$

$$\text{Masa de aire} = (60)(37.8 \text{ kg})$$

$$\text{Masa de aire} = 2268 \text{ kg}$$

La masa de aire más la masa de combustible nos dan el total de la mezcla que es de 2305.8 kg. El porcentaje de cada elemento se obtuvo con una simple regla de tres.

$$\text{Total} = 2268 \text{ kg} + 37.8 \text{ kg}$$

$$\text{Total} = 2305.8 \text{ kg}$$

$$2305.8 \rightarrow 100\%$$

$$2268 \rightarrow x$$

$$x_1 \% \text{ aire} = \frac{(2268 \text{ kg})(100)}{2305.8 \text{ kg}}$$

$$x_1 \% \text{ aire} = 98.3607\%$$

$$x_2 \% \text{ comb.} = 100 - 98.3607$$

$$x_2 \% \text{ comb.} = 1.6393\%$$

Obtenidos los porcentajes de la mezcla, podemos hallar el “cp”.

$$cp = (x_1 \times cp \text{ aire}) + (x_2 \times cp \text{ combustible}) = (0.983607 * 0.24) + (0.016393 * 0.5224)$$

$$cp = 0.2360 + 0.008563 = 0.2446 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$$

El “cv” se saca con los porcentajes de volúmenes.

$$V_{\text{aire}} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}}$$

$$V_{\text{aire}} = \frac{2268 \text{ kg}}{1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V_{\text{aire}} = 1922.0339 \text{ m}^3$$

El volumen total es la suma del volumen del aire más el volumen del combustible que es de 35m<sup>3</sup>

$$V_{\text{total}} = 1922.0339 + 35$$

$$V_{\text{total}} = 1957.0339 \text{ m}^3$$

Sacamos los porcentajes y con estos, el “cv” de la mezcla.

$$x_1 \% \text{aire} = \frac{(1922.0339)(100)}{1957.0339}$$

$$x_1 \% \text{aire} = 98.2116$$

$$x_2 \% \text{comb.} = 100 - 98.2116$$

$$x_2 \% \text{comb.} = 1.7884$$

El “cv” es:

$$cv = (x_1 \times cv \text{ aire}) + (x_2 \times cv \text{ combustible}) = (0.982116 * 0.17) + (0.017884 * 0.3986)$$

$$cv = (0.166960) + (0.007129)$$

$$cv = 0.1741 \frac{kcal}{kg^\circ K}$$

Presión de salida a la turbina.

$$P_4 =$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left( \frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$P_4 = \frac{P_3}{\left( \frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}}}$$

$$P_4 = \frac{5 \text{ bar}}{5}$$

$$p_4 = 1 \text{ bar}$$

Obtenidas las temperaturas y las presiones de la microturbina, en base a las temperaturas podemos sacar la eficiencia del equipo de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{Q_A} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{787.8562^\circ K - 298.15^\circ K}{1253.15^\circ K - 496.6071^\circ K}$$

$$\eta = 0.3527 = 35.27\%$$

Calculada la eficiencia podemos obtener la potencia mecánica a través de la siguiente fórmula que ya había sido usada anteriormente para calcular la eficiencia del motor de combustión interna

$$\eta = \frac{\dot{W}}{Q_A}$$

Despejando tenemos:

$$\dot{W} = \eta \cdot Q_A$$

El calor agregado es

$$Q_A = 183.1683 \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{W} = (0.3527) \left( 183.1683 \frac{kJ}{s} \right)$$

$$\dot{W} = 64.6045 \text{ kW}$$

Ahora bien, según datos de proveedores la eficiencia total del ciclo, es de un 30%<sup>[4]</sup>; si multiplicamos este valor por el calor agregado al ciclo tendríamos la siguiente generación eléctrica.

$$\dot{W}_{ELECTRICA} = (0.30) \left( 183.1683 \right) \frac{kJ}{s} [kW]$$

$$\dot{W}_{ELECTRICA} = 54.9505 \text{ kW}$$

De esta manera se puede observar que la turbina puede ser más eficiente que el motor de combustión interna para este fin, sin embargo, es necesario también hacer un análisis económico, comparar precios y costos de inversión para poder evaluar cual de los dos equipos puede ser una mejor propuesta y también cual es el que mejor remuneración nos dará.

<sup>4</sup> Información obtenida de datos de proveedores de Microturbinas: **MTB Microturbinas para microgeneracion**, <http://www.salicru.com>

## **4.2 ANALISIS ECONOMICO**

Ya hecho el análisis termodinámico o técnico, se hace un análisis económico, dado que la importancia del proyecto no radica en que tan eficiente sea una maquina con respecto a otra, si al final los costos son muy elevados y la inversión no va a ser remunerada de una manera satisfactoria

El análisis económico es uno de los aspectos más importantes a considerar cuando se empieza y se termina un proyecto, puesto que permite determinar los niveles de inversión en que se debe incurrir o en los que se incurrieron para la ejecución de éste; la producción, la prestación de un servicio o la instalación de una fábrica, no escapa a la necesidad de realizar previamente un estudio económico para analizar su viabilidad financiera.

El propósito básico del análisis económico orientado a proyectos es ayudar a diseñar y seleccionar proyectos que contribuyan al bienestar de un país y de sus habitantes. La aplicación de enfoques costo-beneficio y otros métodos similares de análisis económico sirven para determinar el máximo rendimiento de la inversión en un proyecto, facilitar una comparación racional de las posibles opciones y asegurar que las decisiones sobre inversión se adopten con responsabilidad.

El análisis económico también puede resultar útil para detectar y aclarar los problemas planteados en la adopción de determinadas decisiones.

En la tabla 4.1 se puede observar que el motor a diesel modificado genera el 65% de electricidad con respecto a la turbina, con una vida útil de solo el 12.5 % y un costo inicial del 31.25% con respecto al de la turbina, pero para la misma generación de la Microturbina se requerirán tres motores diesel modificados y además su vida útil por deterioro de materiales es de 2.5 años (dependiendo del uso y las condiciones a las que sea sometido), es claro que la Microturbina convendría mas por eficiencia, generación y costo total.

Tabla 4.1 Comparación de costos de equipos de Generación Eléctrica

Equipo	Eficiencia total del Ciclo %	Potencia eléctrica generada (kW)	Vida útil (años)	Costos de equipo ya instalado (Pesos de Mayo de 2011)
Motor a diesel modificado para gas	19.1	35	2.5	300,000.00
Microturbina de biogás	30.0	54.9505	Hasta 20	960,000.00

Tabla 4.2 Comparación de costos de mantenimiento de los equipos de Generación Eléctrica

<b>Costos Asociados a Microturbinas</b>	
Costo de Operación y Mantenimiento	\$0.004 – 0.013 US\$/kWh**
Intervalos de Mantenimiento	5000 – 8000 Horas
<b>Costos Asociados a Motor Diesel</b>	
Costo de Operación y Mantenimiento*	\$0.007 – 0.016 US\$/kWh**
Intervalos de Mantenimiento*	5000 – 8000 Horas

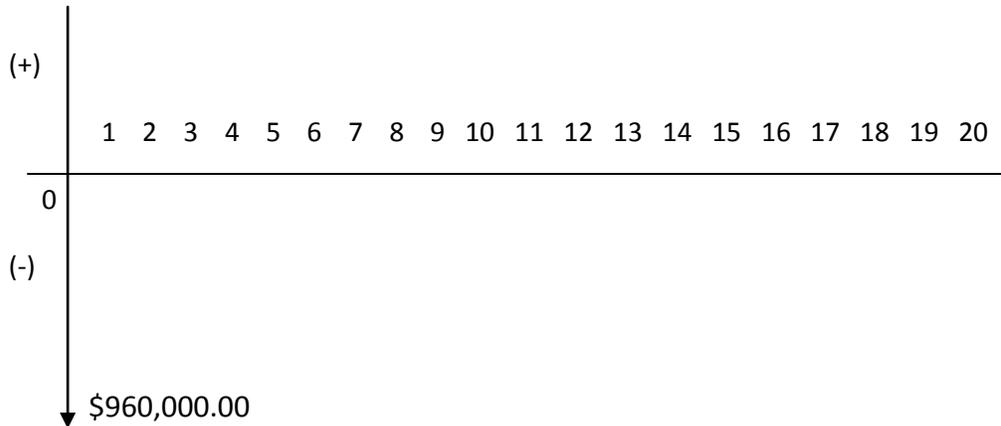
Los costos de mantenimiento pueden variar dependiendo de las condiciones del lugar en el que se instale el equipo y el tipo de uso que se le dé. Se puede observar que los costos e intervalos de mantenimiento entre una Microturbina y el Motor a Diesel modificado son relativamente los mismos, aunque cabe mencionar que la vida útil de la Microturbina es mayor como se muestra en la tabla 4.1, lo que representa una ventaja al momento de comparar los costos de inversión a largo plazo.

\*Este dato es solo aplicable para el caso particular de un Motor Diesel Modificado a gas que opera a diferentes rangos que con el combustible normal (diesel).

\*\*Fuente: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía)

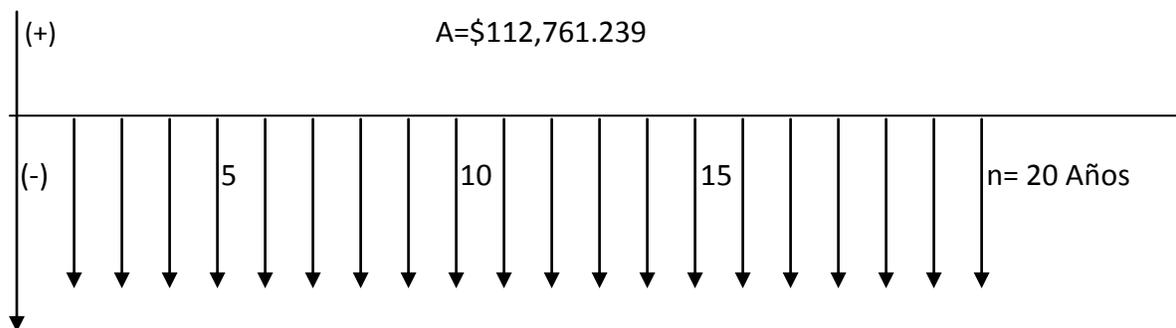
### GASTOS DE LA MICROTURBINA

Para obtener los costos totales de la Microturbina, es decir, los de inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento, se recurrió al método de la anualidad equivalente. El siguiente diagrama muestra la inversión inicial y el intervalo de tiempo que tomaría volver a realizar este gasto.



Obtenemos la anualidad con la inversión inicial (P) que es de \$960,000.00, el interés (i) es de un 10%\* y la vida útil (n) del equipo es de 20 años.

\$



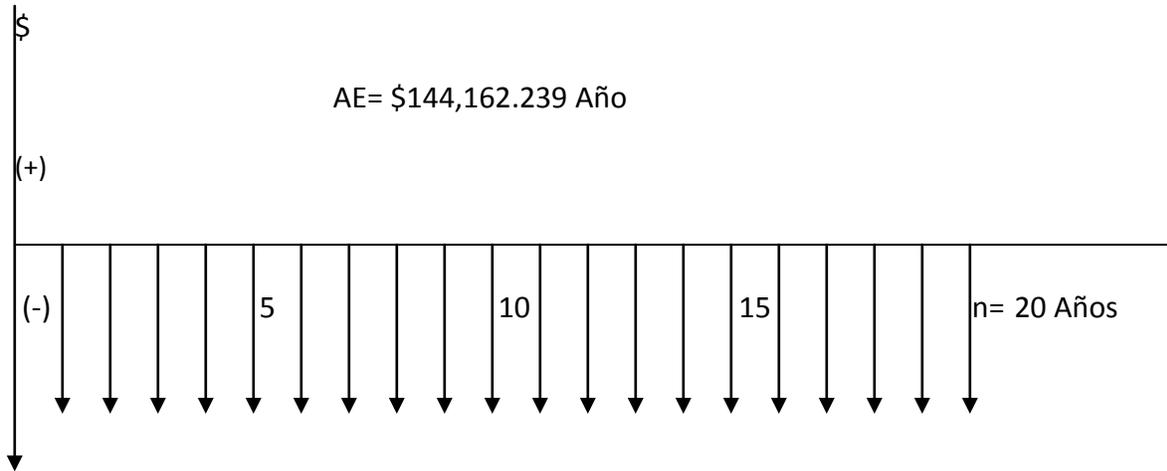
$$A = P \left( \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

$$A = \$960000 \left( \frac{0.1(1+0.1)^{20}}{(1+0.1)^{20} - 1} \right)$$

$$A = \$112,761.239$$

\*Interés manejado por el FIDE y el laboratorio de Diagnostico Energético del Centro Tecnológico de la FES Aragón para proyectos de ahorro de energía.

Los costos de operación y mantenimiento son de \$0.004 a \$0.013 USD por kWh, y se tomo un valor medio, es decir, \$0.008 USD por kWh, el tiempo de operación del equipo al día son 12 horas en promedio y los intervalos de operación y mantenimiento sacando una media son cada 6500 horas. Entonces:



$$100 kWh * \$0.008 \frac{\$USD}{kWh} * 12 \frac{hrs}{dia} * 365 \frac{dias}{año}$$

$$= \$3,504.00USD / Año$$

$$12 hrs \text{ de Trabajo} * 365 \text{ dias/año} = 4380 hrs / año$$

Este valor se divide entre las horas de los intervalos de mantenimiento.

$$\frac{4380}{6500} = 0.6738. \text{ Este valor se multiplica por los costos de mantenimiento.}$$

$$(0.6738)(\$3,504.00) = \$2,360.00USD / año$$

El dólar a la fecha (09/10/2011) está a un precio de \$13.3 MXN por lo tanto de costos de operación y mantenimiento serán:

$$(\$2,360.00USD)(\$13.3) = \$31,401.00MXN$$

$$\text{Así: } (AE) + (O \text{ y } M) = (\$112,761.239) + (31,401.00) = \$144,162.239MXN$$

$$\text{Costo Total Equivalente} \sum_{n=1}^{20} \$2,883,244.78$$

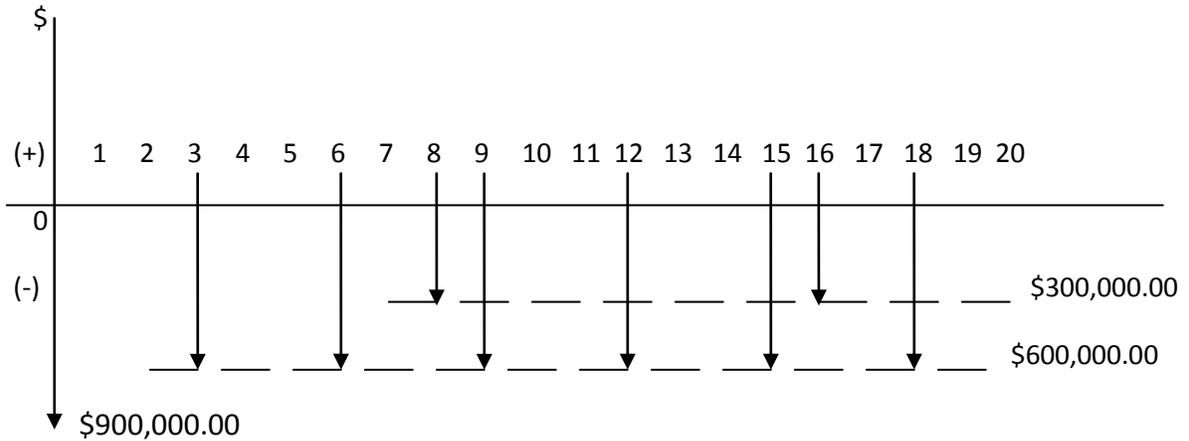
Esta cantidad es lo que se gastaría si tuviéramos que pagar la Microturbina anualmente, y el monto total a pagar sería la suma de esta cantidad 20 veces.

Se puede observar que es una cantidad bastante fuerte de dinero, sin embargo, aun no se ha calculado el costo total del Motor de Combustión Interna para poder compararlo con el costo de la Microturbina y así poder decidir cual equipo es el más rentable.

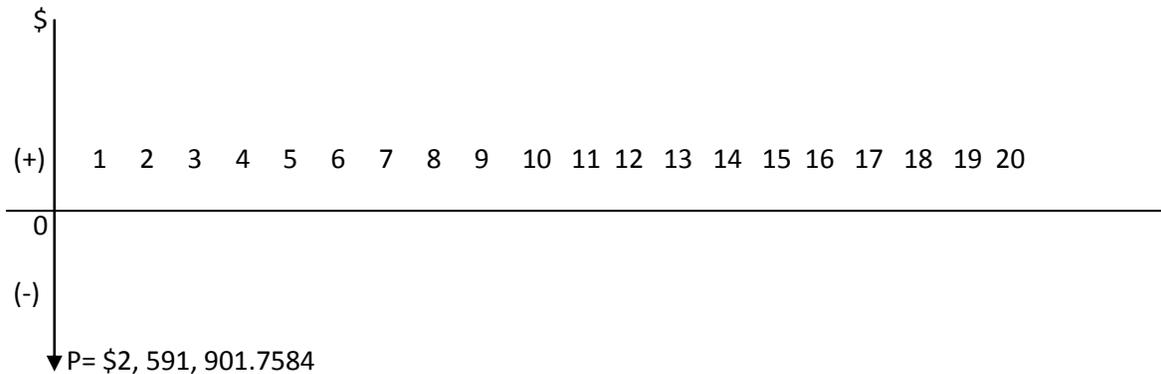
Debemos tomar en cuenta las consideraciones de la pagina **61**, respecto a los motores de combustión interna. Para estar en igualdad de condiciones económicas, el flujo de caja de la alternativa de motores de combustión interna debe ajustarse a cubrir los 20 años, considerar de motores tanto de carga base como de respaldo, así como la inversión inicial, empleando una doble transformación de equivalencia (véase el diagrama de la pagina **73**).

### GASTOS DEL MOTOR A DIESEL MODIFICADO

Se inicio al cálculo obteniendo las transformaciones equivalentes con un diagrama de flujo de gastos. Como uno de los motores es de respaldo solo trabaja 4 horas al día por lo que su vida útil aumentara en un 150%, ya que los otros dos motores trabajan 12 horas al día.



$$P= 900,000+450,788.8+338,684.3+139,952.2+254,458.5+191,178.4+143,635.2+65,288.7+107,915$$



En el diagrama se aprecia claramente que al inicio se compran los tres motores, que es la inversión inicial, mientras que debido al desgaste de los dos motores de carga base, que es diferente al del motor de respaldo, los flujos de efectivo a realizar están espaciados en intervalos de seis y ocho años, con la finalidad de manejar años completos, así como cubrir el plazo de referencia que es de 20 años.

Con esta información obtenemos el valor presente de todos los desembolsos utilizando la siguiente ecuación:  $F = P(1+i)^n \rightarrow P = F(1+i)^{-n}$

El valor negativo de  $n$  se debe a el despeje de  $P$  en la ecuación,  $F$  es la cantidad que se gastó en cada intervalo de tiempo e  $i$  es el interés anual que es del 10%\*.

La suma de estas cantidades es de \$2, 591,901.7584. Este es el valor presente al cual se le saca la anualidad equivalente, tal y como se hizo con la Microturbina.

$$AE = P \left( \frac{i(1+i)^n}{(1+0.1)^n - 1} \right)$$

$$AE = 2,591,901.7584 \left( \frac{0.1(1+0.1)^{20}}{(1+0.1)^{20} - 1} \right)$$

$$AE = 304,443.8080$$

Los costos de operación y mantenimiento son de \$0.007 a \$0.016 USD por kWh, y al igual que en la Microturbina se tomo un valor medio, o sea, \$.011 USD, el tiempo de operación del equipo al día son 12 horas en promedio y los intervalos de operación y mantenimiento sacando un valor medio , son cada 6500 horas. Entonces:

$$100 kWh * \$0.011 \frac{USD}{kWh} * 12 \frac{hrs}{dia} * 365 \frac{días}{año}$$

$$= \$4,818.00 USD / Año$$

$$12 hrs \text{ de Trabajo} * 365 \text{ días/año} = 4380 \text{ hrs/año}$$

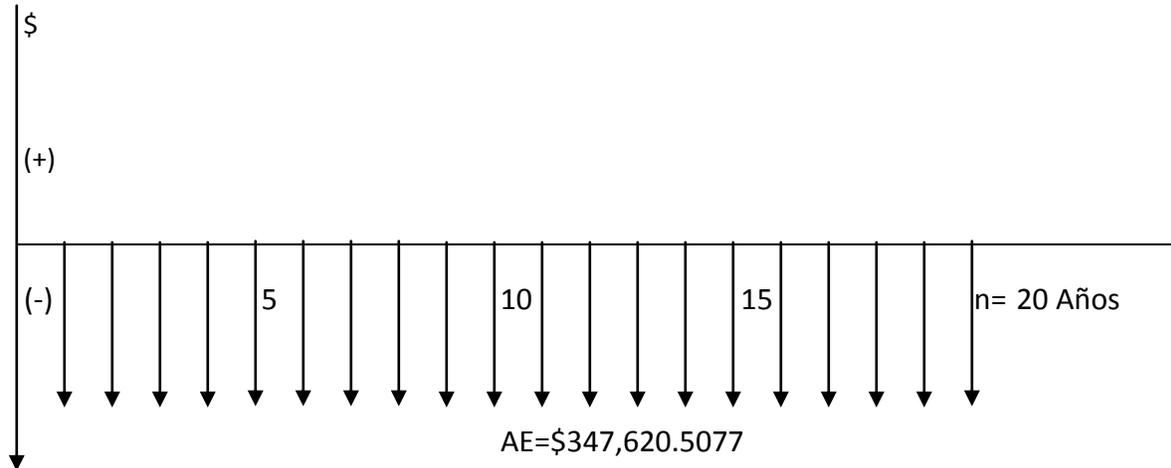
Esto lo dividimos ente las horas de los intervalos de mantenimiento.

$$\frac{4380}{6500} = 0.6738. \text{ Este valor se multiplica por los costos de mantenimiento, o sea:}$$

$$\$4,818.00 * 0.6738 = 3246.3684 USD / Año$$

Multiplicamos este valor por el precio del dólar:  $(\$3246.3684)(13.3) = \$43,176.6997$

$$\text{Así: } (P) + (O \text{ y } M) = \$304,443.8080 + \$43,176.6997 = \$347,620.5077 \text{ MXN}$$



Costo Total Equivalente  $\sum_{n=1}^{20} \$6,952,410.154$

Esta es la cantidad que se tendrá que pagar durante 20 años por los motores y por los gastos de operación y mantenimiento.

Se puede apreciar que los gastos equivalentes que se generan con el motor de combustión interna son mucho mayores, y por lo tanto, en una primera impresión, es más conveniente instalar una Microturbina de gas en lugar del Motor Diesel modificado a gas.

## CONCLUSIONES

Con un primer análisis técnico y económico resulta más rentable la utilización de Microturbinas a gas para la generación de electricidad. Aunque se carece de datos reales, es posible realizar estimaciones y acercarnos más a una comparación exacta en base de la ingeniería económica, así como también tener un panorama de los riesgos que hay que tomar en cuenta y la incertidumbre que se genera el invertir en un proyecto de estas dimensiones. Además es importante destacar que los costos de los equipos pueden variar durante el periodo de vida útil de cada uno de ellos, así como el precio del dólar que no se mantiene constante y eso puede alterar los resultados que se obtuvieron con los datos actuales. Sin embargo, las propiedades y especificaciones técnicas de los equipos comparados se mantendrían, por lo tanto es válido el análisis y sus resultados.

Los costos iniciales de inversión son altos y por lo tanto para una u otra tecnología se requiere mecanismos que promuevan el financiamiento de tales inversiones.

Por otro lado, de datos proporcionados por administradores del rancho lechero, refieren que se están ahorrando mensualmente aproximadamente 75,000.00 pesos por manejo de estiércol en mano de obra, maquinaria, combustibles y facturación eléctrica, lo cual indica que la inversión en una Microturbina se recuperaría en aproximadamente un año (12.8 meses), si comparamos el costo inicial del equipo contra el ahorro referido por ellos.

De acuerdo al análisis de anualidad equivalente, se observa que los gastos totales de una Microturbina ascienden a los \$2, 883,244.78 MXN y los de los motores a diesel modificado a los 6, 952,410.154 MXN; se puede apreciar que los gastos en este equipo se duplican con respecto a los de la Microturbina, quiere decir que por sentido común nos conviene más invertir en la instalación de microturbinas a gas para la generación de energía eléctrica por medio de biogás.

Para reafirmar el uso de estas tecnologías cabe mencionar que la emisión de contaminantes a la atmósfera por uso de biogás se ve reducida en un 100% en

esta granja además que al darle uso al biogás compuesto en su mayoría de metano reduce los efectos en contaminación de este compuesto.

Cabe mencionar también que al hacer uso de este tipo de tecnologías se está fomentando el cuidado del medio ambiente ya que los residuos de la fermentación contienen una alta concentración de nutrientes y materia orgánica, por lo tanto pueden ser utilizados como un excelente fertilizante o mejorador de suelo, ya que el proceso de digestión anaerobia elimina los malos olores y la proliferación de moscas, algo que es de vital importancia, pues se elimina un potencial foco de infección.

## **BIBLIOGRAFIA**

BURGHARDT, M.D. (1984). Ingeniería Termodinámica. México, D.F: Editorial Harla.

FAIRES, Virgil M. Termodinámica. 6ª. Edición. Editorial UTEHA, 1983

MANRIQUE, José A. Termodinámica. Editorial Harla.

WARK, Kenneth. Termodinámica. Editorial Mc Graw – Hill.

## **PÁGINAS WEB**

[www.biodigestor.net](http://www.biodigestor.net)

[www.biodigestores.org](http://www.biodigestores.org)

[www.cubasolar.cu/biblioteca](http://www.cubasolar.cu/biblioteca)

[www.elsitioagricola.com](http://www.elsitioagricola.com)

[www.energiuacm.org.mx](http://www.energiuacm.org.mx)

[www.energiacasera.wordpress.com](http://www.energiacasera.wordpress.com)

<http://es.wikipedia.org>

<http://materias.fi.uba.ar/compresores>

[www.mavainsa.com/compresores](http://www.mavainsa.com/compresores)

[www.naturalaenergy.es](http://www.naturalaenergy.es)

[www.oni.escuelas.edu.ar/biogas\\_historia](http://www.oni.escuelas.edu.ar/biogas_historia)

[www.textoscientificos.com/energia/biogas](http://www.textoscientificos.com/energia/biogas)

[www.engormix.com](http://www.engormix.com)

[www.salicru.com](http://www.salicru.com)

## ANEXOS

TABLA I Calores específicos variables a baja presión

Todas las ecuaciones deducidas de los datos espectrográficos:  $c_p = c_p - R$ ;  $C_p = C_p - 1.986$ . Ver valores de  $R$  en B 1.

(a) Este valor proviene de la publicación de Spencer y Justice.<sup>(1,2)</sup>; (b) ídem de Spencer y Flinnagan<sup>(3,4)</sup>; (c) ídem de Chipman y Fontana<sup>(5,6)</sup>; (d) ídem de Sweigert y Beardsley<sup>(7,8)</sup>; (e) ídem de Spencer.<sup>(9,10)</sup>

Sustancia (intervalo de temp.)	M (masa molar)	Btu/lb·°R	Btu/lbmol·°R
(a) Aire (600–2 700°R)	28.97	$c_p = 0.219 + 0.342T/10^4$ $-0.293T^2/10^8$	$C_p = 6.36 + 9.92T/10^4$ $-8.25T^2/10^8$
(b) SO <sub>2</sub> , dióx. azufre (540–3 400°R)	64.07	$c_p = 0.1875$ $+ 0.0944T/10^4$ $-1.336 \times 10^3/T^2$	$C_p = 11.89 + 6.05T/10^4$ $-85.6 \times 10^3/T^2$
(b) NH <sub>3</sub> , amoníaco (540–1800°R)	17.03	$c_p = 0.363 + 2.57T/10^4$ $-1.319T^2/10^8$	$C_p = 6.19 + 43.8T/10^4$ $-22.47T^2/10^8$
(c) H <sub>2</sub> , hidrógeno (540–4 000°R)	2.016	$c_p = 2.857 + 2.867T/10^4$ $+ 9.92/T^{1/2}$	$C_p = 5.76 + 5.78T/10^4$ $+ 20/T^{1/2}$
(d) O <sub>2</sub> , oxígeno (540–5 000°R)	32.	$c_p = 0.36 - 6.375/T^{1/2}$ $+ 47.8/T$	$C_p = 11.515 - 172/T^{1/2}$ $+ 1 530/T$
(d) N <sub>2</sub> , nitrógeno (540–9 000°R)	28.016	$c_p = 0.338 - 123.8/T$ $+ 4.14 \times 10^3/T^2$	$C_p = 9.47 - 3 470/T$ $+ 116 \times 10^3/T^2$
(d) CO, monóx. carbono (540–9 000°R)	28.01	$c_p = 0.338 - 117.5/T$ $+ 3.82 \times 10^3/T^2$	$C_p = 9.46 - 3 290/T$ $+ 107 \times 10^3/T^2$
(d) H <sub>2</sub> O, vapor de agua (540–5 400°R)	18.016	$c_p = 1.102 - 33.1/T^{1/2}$ $+ 416/T$	$C_p = 19.86 - 697/T^{1/2}$ $+ 7 500/T$
(d) CO <sub>2</sub> , dióx. carbono (540–8 300°R)	44.01	$c_p = 0.368 - 148.4/T$ $+ 3.2 \times 10^3/T^2$	$C_p = 16.2 - 6 530/T$ $+ 141 \times 10^3/T^2$
(e) CH <sub>4</sub> , metano (540–2 700°R)	16.04	$c_p = 0.211 + 6.25T/10^4$ $-8.28T^2/10^8$	$C_p = 3.38 + 100.27T/10^4$ $-132.7T^2/10^8$
(d) (540–1 500°R)		$c_p = 0.282 + 4.698T/10^4$	$C_p = 4.52 + 0.00737T$
(b) C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , etileno (540–2 700°R)	28.04	$c_p = 0.0965 + 6.78T/10^4$ $-9.97T^2/10^8$	$C_p = 2.706 + 182.7T/10^4$ $-279.6T^2/10^8$
(d) (350–1 100°R)		$c_p = 0.151 + 4.27T/10^4$	$C_p = 4.23 + 0.01177T$
(e) C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , etano (540–2 700°R)	30.07	$c_p = 0.0731 + 7.08T/10^4$ $-11.3T^2/10^8$	$C_p = 2.195 + 212.7T/10^4$ $-340T^2/10^8$
(d) (400–1 100°R)		$c_p = 0.1334 + 5.44T/10^4$	$C_p = 4.01 + 0.01638T$
(e) C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , n-butano (540–2 700°R)	58.12	$c_p = 0.075 + 6.94T/10^4$ $-11.77T^2/10^8$	$C_p = 4.36 + 403T/10^4$ $-683T^2/10^8$
(e) C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , propano (540–2 700°R)	44.09	$c_p = 0.0512 + 7.27T/10^4$ $-12.32T^2/10^8$	$C_p = 2.258 + 320T/10^4$ $-543T^2/10^8$
(b) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , acetileno (500–2 300°R)	26.04	$c_p = 0.459 + 0.937T/10^4$ $-2.89 \times 10^3/T^2$	$C_p = 11.94 + 24.37T/10^4$ $-75.2 \times 10^3/T^2$
(d) C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> , octano (400–1 100°R)	114.22	$c_p = 0.0694 + 6.27T/10^4$	$C_p = 7.92 + 0.0601T$

Tabla obtenida del tema de Calores Específicos del libro "Termodinámica" del Autor FAIRES, Virgil Moring

## MICROTURBINAS PARA MICROGENERACIÓN (www.salicru.com)

## ➤ Características Técnicas

MODELO		MTB 100	
TURBINA DE GAS	Tipo de Compresor		Centrifugo
	Tipo de Turbina		Radial
	Tipo de Cámara de combustión		Lean Pre-mix
	Numero de cámaras de combustión		1
	Presión de cámara de combustión		4.5 bar
	Temperatura interior turbina		950°C
	Velocidad nominal		70,000 rpm
	Consumo de aceite lubricante		<3 l/año(6000 h funcionamiento)
SALIDA	Tensión		3 x 400 V AC
	Frecuencia		50 / 60 Hz
	Potencia		100 kW (± 3)
	Eficiencia eléctrica		30% (± 1)
COMBUSTIBLE	Presión mínima/máxima		0.02 / 1.0 bar
	Temperatura mínima/máxima		0°C / 60°C
	PCI (Poder calorífico inferior)		38 – 50 MJ/kg
	Combustible estándar		Gas natural
	Otros combustibles admisibles		Biogás, diesel, keroseno, metanol, GLP
GENERALES	Consumo combustible		333 kW
	Caudal gases de escape		0.80 kg/s
	Temperatura de gases de escape		270°C
	Nivel de ruido		70 dBA a 1 metro
	Emisiones en volumen <sup>1</sup>	Nox	<15 ppm/v = 32 mg/MJ combustible
		CO	15 ppm/v = 18 mg/MJ combustible
INTERCAMBIADOR CALOR AIRE AGUA	Salida térmica (agua caliente)		165 kW (± 5) a 50 – 70°C
	Eficiencia total		80% (±1)
	Temperatura mínima entrada de agua		50°C
	Temperatura máxima salida de agua		150°C
	Presión máxima del agua		24 bar
	Temperatura gas salida		70°C
MANTENIMIENTO	Vida media esperada	Turbina de gas	>60,000 horas
		Recuperador	>60,000 horas
		Quemador	>30,000 horas
	Inspección	Intervalo	6,000 horas
		Intervención	2 horas
	Revisión	Intervalo	30,000 horas
		Intervención	8 horas
NORMATIVA	Seguridad		EN ISO 12100-1/2; EN 294; DIN EN 349; DIN EN 746
	Atmosferas explosivas		DIN EN 1127
	Marcado		CE
	Gestión de calidad y ambiental		ISO 9001 e ISO 14001 TUV

(1) Al 15% de O<sub>2</sub> y 100% de la carga

Disminución de la emisión de  $\text{CO}_2$  por el uso del biogás producido por un biodigestor de  $7.2 \text{ m}^3$  como alternativa a la combustión de diesel.

Producción de biogás	Energía producida †	Ahorro en emisión ‡	Disminución en emisión de $\text{CO}_2$	Disminución total en emisión de $\text{CO}_2$
$\text{m}^3/\text{año}$	$\text{kW}/\text{año}$	$\text{kg CO}_2/\text{kW}$	$\text{kg}/\text{año}$	$\text{t}/\text{año}$
591,30	3524,15	0,34	1198,21	1,20
683,50	4133,26	0,34	1405,31	1,41

† El equivalente calorífico de  $1 \text{ m}^3$  de biogás es de  $5,96 \text{ kW}$ . (Sasse, 1988).

‡ Disminución de emisiones estimado por Kumar *et al.* (2000).

Reducción anual hipotética de la emisión de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y óxidos de nitrógeno debido a la aplicación de la tecnología de biodigestor anaeróbica y su valor económico estimado.

Gases	Toneladas totales (000s)	Equivalente $\text{CO}_2$ por tonelada †	Total $\text{CO}_2$ (000s)	Valor económico (US\$ /tonelada) ‡	US\$ (millones)
Metano	13 240	25	331 000	5,95 - 44,95	1967,8 - 14 878,5
Dióxido de carbono	420 000	1	420 000	5,95 - 44,95	2496,9 - 18 879,0
Oxido de nitrógeno	49	320	15 680	5,95 - 44,95	93,2 - 704,8
Total					4557,9 - 34 462,3

† Estimado por de Haan *et al.* (1997).

‡ DOE (1993).

Beneficios económicos totales (US\$) derivados de la aplicación de la tecnología de biodigestión para un biodigestor de 7.2 m<sup>3</sup> en un periodo de 20 años.

	Años					
	0	1	5	10	15	20
<b>Beneficios</b>						
Valor de biogás	148,40	152,85	172,04	199,44	231,20	268,03
Valor de efluente	260,25	268,06	301,70	349,75	405,46	470,04
Valor funcional	35,15	36,20	40,75	47,24	54,76	63,48
<b>Beneficios totales</b>	<b>408,65</b>	<b>420,91</b>	<b>473,74</b>	<b>549,19</b>	<b>636,66</b>	<b>738,07</b>
<b>Costos</b>						
Instalación	150,00	0,00	1,00	201,59	0,00	270,92
Manejo	146,00	150,38	169,25	196,21	227,46	263,69
<b>Costos totales</b>	<b>296,00</b>	<b>150,38</b>	<b>170,25</b>	<b>397,80</b>	<b>227,46</b>	<b>534,61</b>
<b>Beneficios netos por año</b>	<b>112,65</b>	<b>270,53</b>	<b>303,48</b>	<b>151,39</b>	<b>409,20</b>	<b>203,46</b>

† Un descuento anual del 3 % se aplica como sugiere el modelo de Fankhauser (1995). El descuento es una técnica aplicada para evaluar proyectos cuyos costos y beneficios varían a través del tiempo (Craven, 1984).

## TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Motor a gas



<b>Eficiencia Eléctrica:</b>	25 – 45%
<b>Tamaño</b>	0.005 – 5 MW
<b>Espacio Requerido</b>	0.021 – 0.029 m <sup>2</sup> / kW
<b>Costo Instalado</b>	US \$850 – 1600 / kW
<b>Operación y mantenimiento.</b>	US \$0.009 – 0.018/kWh
<b>Disponibilidad:</b>	92 – 97%

Motor Diesel



<b>Eficiencia Eléctrica:</b>	30 – 50%
<b>Tamaño</b>	0.05 – 15 MW
<b>Espacio Requerido</b>	0.021 m <sup>2</sup> / kW
<b>Costo Instalado</b>	US \$850 – 1600 / kW
<b>Operación y mantenimiento.</b>	US \$0.007 – 0.01/kWh
<b>Disponibilidad:</b>	90 – 95%

Turb. de Gas (Microturbinas)



**Eficiencia Eléctrica:**

20 – 30%

**Tamaño**

0.025 – 0.25 MW

**Espacio Requerido**

0.018 – .18 m<sup>2</sup> / kW

**Costo Instalado**

US \$600 – 1500 / kW

**Operación y mantenimiento.**

US \$0.004 - .013/kWh

**Disponibilidad:**

90 – 98%