



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROPUESTA DE CONVERSIÓN DE UN MOTOR DE GASOLINA A BIOGÁS  
PROVENIENTE DE LA DIGESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE UN  
RESTAURANTE DE CIUDAD UNIVERSITARIA

## **TESINA**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA

Gerardo de la Cruz Ortíz

Directora de Tesina

Dra. Alejandra Castro González

FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F., 2014

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dr. Rogelio González Oropeza

Secretario: Dr. Rogelio Soto Ayala

Vocal: Dra. Alejandra Castro González

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez

2<sup>do</sup>. Suplente: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

*Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.*

*Ciudad Universitaria, México D.F.*

DIRECTORA DE TESINA:

Dra. Alejandra Castro González \_\_\_\_\_

SUSTENTANTE

Gerardo de la Cruz Ortíz \_\_\_\_\_

## ÍNDICE

ÍNDICE	II
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	X
INTRODUCCIÓN	XI
OBJETIVOS	XIV

## CAPÍTULO 1 ENERGÍA LIMPIA

1.1 Energías renovables	1
1.2 Biomasa	7
1.3 Biogás	10
1.3.1 Usos del biogás	12
1.3.2 Purificación del biogás	13
1.3.3 Ejemplos de usos de biogás en el mundo	15
1.3.4 Biogás de digestión de materia orgánica	17
1.3.4.1 Digestores	17
1.3.4.2 Rellenos sanitarios	19
1.3.4.3 Principio de conversión	21
1.4 Ejemplos de plantas de biogás	23
1.5 Protocolo de Kioto	24
1.6 Mecanismo de desarrollo limpio	25
1.7 Bonos de carbono	26

## CAPÍTULO 2 MÁQUINAS Y COMBUSTIBLES

2.1 Máquinas térmicas	27
-----------------------	----

2.1.1 Máquinas de combustión externa	27
2.1.2 Máquinas de combustión interna	27
2.2 Clasificación de máquinas térmicas según el sentido de transferencia de energía	28
2.3 Clasificación de máquinas térmicas según su principio de funcionamiento	28
2.3.1 Turbomáquinas	29
2.3.2 Máquinas volumétricas o de desplazamiento positivo	28
2.4 Rendimiento de las máquinas	29
2.5 Ciclo de cuatro tiempos	30
2.6 Combustibles	31
2.6.1 Diésel	31
2.6.2 Gasolina	31
2.6.3 Gas natural	32
2.6.4 Gas L.P	32

### **CAPÍTULO 3**

#### **CONVERSIÓN DE BIOGÁS A ENERGÍA ELÉCTRICA**

3.1 Sistemas de conversión de biogás a electricidad	33
3.1.1 Nacionales	36
3.1.2 Internacionales	38
3.2 Ejemplo de la conversión de motores de diferentes combustibles a biogás	40
3.3 Conversión de motores usados en el transporte urbano de gasolina a gas natural	42

### **CAPÍTULO 4**

#### **RESULTADOS**

4.1 Caso de estudio	45
4.1.1 Planta de biogás en restaurante de Ciudad Universitaria	46

4.1.2 Diagrama de flujo de los componentes y procesos en la planta de biogás de la cafetería El Cibarium	52
4.1.3 Planta de gasolina para la generación de electricidad	54
4.2. Cambios propuestos para el motor	55
4.3 Propuesta para la medición de eficiencia	57

## CAPÍTULO 5

<b>CONCLUSIONES</b>	60
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	62
<b>ANEXO</b> Características completas de motor HS 40	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1</i>	<i>Evolución de dimensiones y potencias de los aerogeneradores.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.2</i>	<i>Proceso de generación de biogás a partir de la descomposición anaerobia.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.1</i>	<i>Funcionamiento de una microturbina de biogás.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.2</i>	<i>Uno de los digestores de la planta de Perth, Australia.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.3</i>	<i>Elementos que componen el sistema de funcionamiento de un motor con GNV.....</i>	<i>44</i>

<i>Figura 4.1</i>	<i>Cafetería El Cibarium .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.2</i>	<i>Equipos de la planta de tratamiento .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.3</i>	<i>Equipos para el almacenamiento y manejo de biogás .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.4</i>	<i>Triturador de alimento .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.5</i>	<i>Tanque digestor .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.6</i>	<i>Condensador .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.7</i>	<i>Rollos de óxido de férrico del purificador .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.8</i>	<i>Medidor de gas .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.9</i>	<i>Bolsa contenedora de biogás .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.10</i>	<i>Manómetro de agua .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.11</i>	<i>Componentes de la válvula anti retorno .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.12</i>	<i>Secuencia de tratamiento de la planta de biogás .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.13</i>	<i>Diagrama de flujo ideal de procesos para el uso de biogás en el motor .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.14</i>	<i>Vista frontal y lateral del motor .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.15</i>	<i>Lugar en el que se debe de colocar el mezclador biogás-aire para la conversión .....</i>	<i>56</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Volúmenes típicos y composición de biogás producido para diferentes materias primas a 35°C y con los tiempos de retención óptimos en un tanque comercial.....	11
Tabla 1.2	Propiedades comunes del biogás.....	12

Necesitaría un espacio similar al de este trabajo para poder agradecer a todas las personas que me han permitido estar en el punto de mi vida en el que me encuentro. Y aún si lograra escribir un agradecimiento escrito de su presencia en mi vida, no lograría, ni lejanamente, presentar mi gratitud que en verdad merecen.

Doy pues gracias, aunque de forma incompleta, a aquellos que con su fe, con su cariño y su paciencia han llevado a mi vida todos esos trozos de cosas que me han formado; todas esas enseñanzas, esas demostraciones de afecto y de apoyo que en todo momento me acompañan; no sólo en la luz de las ideas y de los proyectos de gran esperanza, sino también en la oscuridad de la incertidumbre y de las dificultades de la vida misma. Nunca ha sido fácil, pero nadie dijo nunca que lo sería. Y es que no estoy agradecido tan sólo por el apoyo ni por su presencia para la realización de este modesto trabajo. No. Más bien estoy agradecido por las enseñanzas, los sentimientos y las ideas que han depositado en mí y que ya están de forma intemporal en mí ser. Cuando llegue el momento de que la vida separé la presencia física de quienes me han constituido, habrá algo que continuará de forma incesante y determinada dentro de mí. Y eso, aquello muy preciso que me han confiado, es lo que en verdad agradezco.

Tengo que agradecer a mi Creador, que sin formas definidas ni absolutismos de la lógica o de la magia, se manifiesta de forma espiritual en mí vida. “Haz el bien; procura al desprotegido; ama a tu hermano; siente una ofensa propia por la injusticia” Enseñanzas que siento y tengo la celosa responsabilidad de procurar día con día. La práctica de las mismas es un aspecto que creo todos debemos de pretender.

Agradezco a mi madre. A mi mamá que me procuró durante todos estos años de mi vida. Que me cuidó y que me enseñó todo lo que pudo para hacerme un buen hombre. A mi madre que de ella aprendí que sin importar las dificultades, lo mejor con lo que podemos contar es con la familia y con las enseñanzas que de ella saquemos. A mi madre que, pudiendo elegir mil alternativas para vivir, nos eligió a mi hermano y a mí. A mi madre que formó un hogar con cariño y que en ese lugar nos señaló la forma en la que ese cariño debía de ser replicado hacía la justicia externa. A mi madre quien no dudo ningún momento para alejar de nuestro hogar a quienes nos traían el mal. A mi madre a la que espero nunca defraudar, aunque la distancia sea infinita, siempre estará en mi corazón y yo buscaré enseñar, en algún momento, lo que de ella aprendí.

Agradezco a mi hermano, mi gran amigo y mi verdadera alma gemela. Agradezco toda su paciencia y su forma de ser conmigo. Porque, de la forma en la que soy, la mitad es debido a él. Porque nunca me dejará de asombrar su sinceridad y su forma tan honesta de encarar al mundo. Mi hermano que sería como algunos de esos generales de antes que preferían perder la cabeza antes de perder el honor de ser quiénes son y defender aquello en lo que creen. Gracias lalo por enseñarme tanto; desde gustos,

gestos y risas, hasta voluntades y formas de vivir. Sin ti yo tan sólo sería un hombre común y corriente; sin ti nunca hubiera pensado en ser un superhéroe...

Marlen, tan sólo recuerdo aquellas aburridísimas tardes de viernes en las que me esperabas en la biblioteca para que yo terminara los avances de este documento. Me esperabas y cuando al fin terminaba, yo no tenía nada que poder ofrecerte ni invitarte. Marlen, tú me has acompañado en algunos de los momentos más duros e importantes de mi vida hasta ahora, y al final todo resultó en que esos momentos han sido de los mejores de mi vida. A tu lado empecé a trabajar, egresé de la carrera, viaje y varias cosas más. Y en ese inter fue cuando me di cuenta de lo valioso y especial de querer a una mujer. Gracias por tu risa, tu tiempo y tu comprensión. Pero aún más, gracias por tu cariño.

A mi familia. A mis abuelos Maricucha y José. Que aunque no los conocí mucho, me han enseñado mucho con sus acciones. Mucho de la vida cobra sentido con el tiempo; y es a través de las otras personas que cobramos el sentido verdadero... A mis tíos, los hermanos de mi mamá: a mi tío Enrique, a Betico, mi madrina y a mi tío chalo. Sin ustedes, mi mamá mi hermano y yo no estaríamos donde estamos. Nunca hubiéramos podido. Seguramente ni la secundaria hubiera terminado. Gracias por su apoyo incondicional y por no abandonarnos cuando todo se vino abajo. Gracias por hacer de nuestra familia un lugar en el que vale la pena cualquier esfuerzo para salir adelante. Gracias también a mi tía Geles, a mi padrino y a mi tía Bella, gracias por hacer un poquito más grande esta pequeña familia. A mis primos: Pepe, Chio, Mónica, Manolo Mariana, Chel, Itza y a la bebé Susy. Por ser mis segundos hermanos y ser quienes son esa combinación perfecta entre familiar y amigo... tenemos aún tanto por hacer. Gracias.

A mis tíos y primos segundos. Gracias por su apoyo y preocupación por mi hermano mi mamá y por mí, por su cariño y sus atenciones.

A mis amigos. Que gracias a la vida he tenido muchos y verdaderos a lo largo de mis años. Unos ya no están directamente conmigo, pero en mí se quedan. Mencionaré, porque el corazón así lo demanda, tan sólo a algunos, y pido anticipadamente una disculpa si omito a alguien. No es porque no esté agradecido, eso es seguro. Rosa, que desde hace más de una década me acompaña; Chepe, mi amigo, mi hermano, bohemio siempre; Salva, que la vida es un algo que vale la pena vivirse; Comadreja, por tus cimientos firmes que colocaste en mí; Miriam, que lejos lejos pero no te olvido; Paola, milonguera querida; Norma, que te quiero aunque no siempre nos llevemos bien; Leonor, camarada mía; Mariana, lo bien que lo pasé a tu lado; Matías, camarada amigo verdadero, por ser como somos; René, porque no hay que quedarse en lo mismo amigo; ñiñote, por ser tan buena persona; Sac, porque siempre procuraste que aprendiéramos; picolin, gracais we; Guardado, por tu franqueza; Sibaja, por tu caballerosidad... En fin. A todos ustedes gracias por estar en mi vida de la forma en la que lo han hecho.

A la gente con la que he trabajado. Por enseñarme algo de este país que, de cualquier otra forma, yo tan sólo lo vería como un espejismo. Por darme la oportunidad y la confianza para salir adelante y

conocer cosas imposibles de conocer en otra circunstancia: Ana, Abraham, Raul, Checo, Efren, Lic. Madero, Marlen, Aldo y Jaime.

Muy especialmente le quiero dar las gracias a la Drá. Alejandra Castro. Por haberme brindado su confianza desde aquel día que fui con usted a pedir hacer servicio social. Por haber visto algo en mí que quizás yo no podía ver. Por haberme dado la oportunidad de emprender proyectos importantes en mi vida, y de confiar plenamente en que podía salir adelante. Cualquier agradecimiento a usted excede ampliamente las palabras.

Agradezco a la UNAM y a su Facultad de Ingeniería. Por todas las enseñanzas directas e indirectas que de ella obtuve. Lamento no haber sido un mejor estudiante, y esa será mi vergüenza por siempre. Pero también aprendí a seguir adelante, por lo que buscaré salvar esa vergüenza con una actitud de solidaridad hacia la sociedad. En ningún momento trataré (ni lo he hecho hasta ahora) de buscar beneficios a costa de mi posición y conocimientos. Al contrario. Tengo la plena seguridad de que un conocimiento que no se comparte y que no se usa en beneficio de la sociedad, es un beneficio inútil y estéril. Más aún. Buscaré, aún en prejuicio de mi mismo si resulta necesario, tratar de hacer de este país un mejor lugar para vivir, y procurar que la justicia no sea algo extraño ni vano, sino más bien, algo por lo que valga la pena luchar.

A mi México, que tan perdido está, pero que aún con siglos de injusticia y dolor, no termina por ser derrotado. Por mi país que tan necesitado esta de gente buena, decidida a actuar para mejorar las cosas.

Algún día un guerrillero argentino dijo que el nivel más alto al que puede aspirar un hombre es el de ser un revolucionario. Porque un revolucionario es aquel que busca hacer del mundo un lugar mejor para vivir. Dijo, también, que un verdadero revolucionario está guiado por profundos y sinceros sentimientos de amor. De amor al prójimo, a la justicia y al bien común... Luego, al iniciar mi carrera, escuché a un viejo ingeniero que decía que los ingenieros eran aquellos que debían utilizar la ciencia de forma práctica para hacer del mundo un lugar mejor para vivir...Y por último, recuerdo que un día, cierto señor de allá de una tierra de ríos y cacao, decía que era necesario construir, aquí en la tierra, un reino de justicia en la que se lograra que México fuera un lugar luminoso y amable. Hablaba pues, aquel señor, de un renacimiento.

Hilando esas ideas, tengo una noción, aunque vaga aún, de que la ingeniería le puede dar al hombre la posibilidad de revolucionar al mundo para bien. Y quizás, en esa revolución, traer algo de justicia y amor a este país y a este mundo que tanto lo necesitan.

## RESUMEN

El presente trabajo aborda los aspectos necesarios para la implementación de un motor de gasolina para el uso de biogás proveniente de un restaurante en Ciudad Universitaria. El motor, el cual tiene acoplado un generador eléctrico de 2 kVA, podría sustituir la gasolina como combustible si se realizan modificaciones en su sistema de admisión al acoplar un mezclador adicional aire-biogás. Dicho sistema se regula manualmente y permite una operación del motor con biogás y gasolina. Lo anterior es posible debido a que no existe ninguna alteración en el sistema de carburación original del motor. El aprovechamiento de biogás como combustible en el generador permite una reducción en el uso de combustibles fósiles para su operación, además de que utiliza una fuente renovable de energía proveniente de los desechos sólidos orgánicos del restaurante. Sin embargo, el uso de biogás resulta en una menor potencia generada por el motor en comparación al uso tradicional de gasolina debido a que el poder calorífico del biogás es de 16.6 MJ/kg, mientras que el de la gasolina común es de cerca de 40 Mj/kg. Por lo mismo, la cantidad de biogás que requiere el motor para funcionar es mayor con respecto a la gasolina en condiciones iguales. A su vez, la cantidad de biogás que puede ingresar al motor está limitada por el tamaño del cilindro y por el sistema de carburación, el cual, al no modificarse para permitir el funcionamiento “dual” de combustible, ocasionará que la potencia disminuya cerca de un 50%. Lo anterior implica que el generador, el cual tiene una salida máxima de 2 kVA, utilizando gasolina y un factor de potencia de 0.8, resultando en una potencia de 1.6 kW, tan sólo será capaz de generar cerca de 0.8 kW de potencia usando biogás. Si bien la reducción de potencia es de más de la mitad de su valor nominal, las ventajas que ofrece el implantar un sistema de este tipo continúan siendo notables. La conversión no es costosa ya que utiliza materiales que fácilmente se consiguen a nivel comercial principalmente PVC, son económicos y de fácil manipulación y mantenimiento. De igual forma, al ser dual, el motor puede seguir funcionando con gasolina para un aprovechamiento total de su capacidad cuando se requiera.

## INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles para el desarrollo de las actividades humanas a lo largo del último siglo, ha ocasionado severos problemas ambientales, sociales y económicos. De igual forma, la generación de contaminantes, producto de la combustión de combustibles fósiles, en especial el monóxido y dióxido de carbono (CO, CO<sub>2</sub>, respectivamente) son los principales actuadores de lo que hoy se conocen como cambio climático. Tan sólo el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, a nivel mundial, se ha duplicado en cuarenta años, pasando de 14,065 millones de toneladas en 1971, a 30,276 millones de toneladas liberadas en 2010 (IEA, 2012). El cambio climático es el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición normal de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima durante periodos comparables (CMNUCC, 1992). Dicho cambio climático ha ocasionado fenómenos naturales como inundaciones, sequías y alteraciones en la flora y la fauna a nivel mundial. Igualmente, el cambio climático ha producido problemas humanos asociados a los fenómenos naturales, por ejemplo, hambrunas, movimientos humanos y violencia asociada al control de alimentos y agua. La economía también es un factor clave en esta problemática mundial, ya que el control de los energéticos está relacionado con el aspecto económico y es referente de la relación entre las naciones.

Por si fuera poco, el aumento en el consumo de recursos y bienes por parte de los países, ha ocasionado que la disposición de los desperdicios sea algo alarmante en muchas ciudades. De igual forma, el nulo aprovechamiento que se da de los mismos desperdicios, implica que existe un potencial desperdiciado con el uso y aprovechamiento de ellos. Tan sólo en México, la generación de residuos sólidos urbanos se ha duplicado en los últimos nueve años, pasando de 21,967 millones de toneladas generadas en 1992, a 41,062 millones de toneladas generadas en 2011 (CONAFOR, 2006).

Es por eso que una transición energética resulta indispensable para evitar un escenario mundial que es ya de por sí difícil. Las energías renovables son la solución a la dependencia de los combustibles fósiles. Éste tipo de energías son aquellas que por su abundancia y su capacidad de regenerarse, pueden usarse nuevamente y mantenerse de forma más o menos constante en la naturaleza (Fernández, 2010). Entre las energías renovables se encuentran, la energía solar, geotérmica, eólica, hidrológica y aquella que se obtiene por el uso de la biomasa. Todas las energías renovables cuentan ya con un considerable avance tecnológico, lo que permite su utilización casi en cualquier condición ambiental siempre que exista su abastecimiento. De igual forma, las energías renovables pueden tener una conversión a la energía eléctrica, el cual es el tipo de energía usado por la mayor parte de la población mundial.

Respecto a las energías renovables, la biomasa, que pueden ser desechos forestales, animales o comestibles, es uno de los tipos de energía que más opciones de conversión y beneficios presenta debido a que, a partir de ella, se pueden generar combustibles que pueden ser usados de forma directa en vehículos o para producir electricidad. Además, el aumento en el consumo de recursos y bienes por parte de los países industrializados y en vías de desarrollo, hace necesario que se tenga un adecuado sistema de disposición de sus desechos, tanto para atenuar la problemática que generan, como para obtener beneficios que puedan surgir de los mismos.

La biomasa puede ser transformada en diferentes productos para beneficio humano y ambiental. Puede convertirse en biocombustibles, es una fuente de energía térmica y además, su descomposición puede generar biogás, el cual tiene diferentes aplicaciones. El biogás es un producto que se genera en la descomposición anaerobia de la biomasa. Está compuesto principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en proporciones que varían con el tipo de biomasa que lo precede. El uso de sistemas que permiten la conversión de biomasa a biogás, conocidos como digestores, permite, entre otras cosas, una mejor disposición de la biomasa de desecho; disminución de la cantidad de desperdicios que llegan, en el mejor de los casos, a rellenos sanitarios; la disminución de los problemas asociados a un mal tratamiento de los desechos, por ejemplo enfermedades; aprovechamiento del biogás para la generación de calor o electricidad, entre otros.

El biogás tiene varias aplicaciones, una de ellas es la producción de electricidad. Para dicho propósito se usa el biogás en motores de combustión interna o microturbinas. También se puede usar el biogás para generar vapor y usarlo en un ciclo Rankine, sin embargo, debido al bajo poder calorífico del biogás, no es su aplicación más adecuada. No obstante, los motores de combustión interna presentan la ventaja de que su conversión a uso de biogás resulta rentable y es algo práctico. Puede darse en motores diésel y a gasolina, sin importar el número de pasos del pistón.

Para la cafetería El Cibarium, localizada en Ciudad Universitaria, se ha diseñado y construido una planta de generación de biogás a partir de los residuos sólidos orgánicos de la misma cafetería. Normalmente no se realizaría ninguna disposición especial con los desechos y terminarían junto con el resto de la basura, sin embargo, éstos pueden tener otro fin gracias a la planta. La planta cuenta con todos los sistemas necesarios para la recepción, procesamiento y almacenamiento de biogás. Uno de los sistemas de implementación en la planta es el uso de un motor de combustión interna para la producción de energía eléctrica a partir del biogás generado con los desechos comestibles.

El propósito de este trabajo es analizar la posibilidad de la implementación del motor, así como establecer los beneficios que podría presentar al entrar en funcionamiento. De igual forma se revisan los

análisis termodinámicos para el cálculo de la eficiencia del motor operando con biogás. Con lo anterior se podría mejorar el aprovechamiento de una energía renovable en beneficio de la comunidad universitaria, así como una forma de concientización respecto a las energías renovables y la necesidad de su generalización en la sociedad.

# **OBJETIVOS**

## **Objetivo general**

Proponer el uso de un motor de combustión interna, que originalmente funciona con gasolina, para que funcione con el biogás generado en la planta de tratamiento de residuos de la cafetería El Cibarium y de esa forma generar energía eléctrica a partir de los restos de comida generados.

## **Objetivos específicos**

Los objetivos del presente trabajo son:

- Presentar los requerimientos necesarios para la implementación de un motor para generación de energía eléctrica en la cafetería El Cibarium.
- Determinar la factibilidad de implementación del motor propuesto en la cafetería.
- Estimar el consumo de biogás por parte del motor y la energía suministrada por el motor usando biogás.

# CAPÍTULO 1

## ENERGÍA LIMPIA

### 1.1 Energías renovables

Se denominan fuentes energéticas renovables a las que son de origen natural y pueden emplearse ilimitadamente por dos razones:

- Su suministro es muy abundante y prácticamente inagotable.
- Las materias primas de las que provienen esas energías, se pueden renovar (por ejemplo la biomasa), caracterizándose por tener un bajo impacto ambiental (Madrid, 2009).

Ningún combustible fósil es renovable, y como tal, eventualmente se agotará. Como existen cantidades finitas de estos recursos, al igual que se encuentran en zonas específicas del mundo, con el paso del tiempo se volverán más costosos. Aún más, la generación de energía utilizando combustibles fósiles requiere de la combustión del mismo, proceso que daña el ambiente con contaminantes y gases de efecto invernadero. Con la intención de que se pueda mantener el futuro del mundo con fuentes de energías limpias e inagotables, las energías renovables son la elección obvia (Lee y col., 2007). Entre las fuentes de energías renovables están incluidas: Energía solar, energía eólica, energía geotérmica, biomasa e hidrógeno.

Casi todas las fuentes de energías renovables, con excepción de la geotérmica, dependen directa o indirectamente del sol. De hecho, el sol, por sí solo transfiere a la tierra una cantidad aproximada de 400EJ<sup>1</sup> al año (Sims, 2002). Entre los beneficios de este tipo de energías se encuentran la disminución de desechos, estabilización de los costos de energía, no se agotan, etc. Con el aumento de los precios del petróleo y del gas natural como los experimentados en los años setentas y más recientemente en 2005 y 2006, la necesidad de combustibles alternativos ha ido incrementándose notoriamente. De igual forma, los avances en áreas referentes a energías renovables, así como un aumento en la conciencia local de algunos países y ciudades, hacen que las perspectivas de fuentes alternativas y renovables de energía sean muy prometedoras.

---

<sup>1</sup> EJ- exajoule. 1 EJ es equivalente a 10<sup>18</sup> J

La generación mundial de energía eléctrica proveniente de fuentes geotérmicas, solares, eólicas, madera y desperdicios, ha aumentado a un promedio de 6.8% de 1993 a 2003 (IEA, 2003). Estados Unidos de América encabeza este crecimiento con 110.4 mil millones de kilowatts hora, seguido de Alemania con 51.55 mil millones, Japón con 25.86 mil millones, España con 26.75 mil millones y Brasil con 17.09 mil millones. Hasta el 2006 estos cinco países generaban el 60 % de la producción de energía eléctrica proveniente de fuentes geotérmicas, solares, eólicas, madera y desperdicios. México, por su parte, hasta 2006 generó 8.75 mil millones de kilowatts hora mediante este tipo de fuentes renovables (EIA, 2003).

El uso del hidrógeno como fuente renovable de energía aún debe de superar gran cantidad de dificultades técnicas y económicas para que pueda generalizarse su uso. Algunos de estos problemas son el suficiente desarrollo tecnológico para una generación a bajo precio, una distribución y almacenaje sin riesgos, materiales eficientes y seguros para su manejo, motores de combustión interna de hidrógeno, etc. Por otro lado, el uso de biomasa y desperdicios sólidos municipales (DSM que por sus siglas en inglés es MSW, municipal solid waste) son muy prometedores en ciudades en las cuales el espacio disponible para rellenos sanitarios es muy limitado. Avances en la tecnología y procedimientos para el manejo de biomasa han vuelto esta opción eficiente y segura (Lee y col, 2007).

No obstante, hoy en día el 90% de la energía utilizada por el ser humano, se genera mediante combustibles fósiles. Sin embargo, la tendencia del uso de estos combustibles debe de cambiar ya que de no hacerlo, los daños en el ambiente se volverán irreversibles.

Como se mencionaba, las principales formas de energías renovables son:

### **1) Radiación solar**

Parte de la energía que incide en la tierra, proveniente del sol, puede ser recibida como radiación en la superficie de la tierra y ser usada de diferentes formas. Entre las formas más importantes de aprovechamiento de la energía solar se mencionan:

#### **a) Uso de la energía solar pasiva**

Los sistemas de este tipo pueden convertir la radiación solar en calor mediante las características propias de una estructura. Por ejemplo las cubiertas transparentes de los edificios. El uso de la energía solar pasiva (a menudo conocida como arquitectura solar pasiva) está caracterizado por el uso de envoltentes en los edificios con el fin de almacenar el calor del mismo. En la mayoría de los casos la

energía solar es transferida sin ningún dispositivo para la transferencia de calor (Kaltschmitt y col., 2007).

### **b) Uso de la energía solar térmica**

Este tipo de tecnología requiere de colectores solares, los cuales convierten la radiación del sol en calor y usarla para un fin específico, ya sea de uso doméstico o industrial. Los componentes principales de la mayoría de los sistemas de térmicos solares son, el colector solar, los tanques de almacenamiento, bombas y la carga. También se requieren de sistemas de control y válvulas. La carga, por su parte, puede variar dependiendo de la aplicación que se requiera, para calentamiento, enfriamiento, secado o trabajo mecánico.

Este tipo de sistemas se usan con bastante éxito en instalaciones domésticas para calentamiento de agua. Para aplicaciones industriales, los rangos de temperatura van de los 60 a los 260°C, y en éste rango de temperaturas, los sistemas solares térmicos son muy eficientes y presentan factibilidad en la inversión a largo plazo, sin embargo, los costos iniciales de implementación suelen ser una desventaja al momento de considerar una opción de éste tipo (Foster y col., 2010).

### **c) Celdas fotovoltaicas**

La sociedad moderna tiene una alta demanda de energía eléctrica la cual, en su mayoría, es suministrada mediante la red eléctrica de todos los países. Sin embargo, algunas regiones o ciudades no están enlazadas mediante las redes eléctricas comunes, en especial en países en vías de desarrollo. Las celdas fotovoltaicas pueden ser una opción para brindar energía eléctrica en estos lugares.

La energía eléctrica se puede producir con la luz del sol mediante un proceso llamado FV (PV que por sus siglas en inglés es PV, photo voltaic), donde “foto” se refiere a luz y “voltaico” a voltaje. Dicho término se refiere al proceso mediante el cual directamente se produce energía eléctrica a partir de la energía radiante del sol. El efecto FV puede suceder en materiales sólidos, líquidos y gaseosos; sin embargo, es en los sólidos, en especial en materiales semiconductores, en los que existe una eficiencia de conversión aceptable. Las celdas solares, (como también se les conoce) están hechas de una gran variedad de materiales semiconductores<sup>2</sup> y cubiertos de aditivos especiales. Los tipos de materiales más usados son los silicónes cristalinos, los cuales representan un 90% de las celdas comerciales.

---

<sup>2</sup> Semiconductores- materiales que tienen una conductividad eléctrica que está entre los metales y los aislantes.

En promedio, una celda de silicón con un diámetro de 4", puede producir algo más de 1 W de corriente directa a pleno sol. Las celdas, al igual que las baterías, pueden ser conectadas en serie o en paralelo para así obtener el voltaje o la corriente deseada. Estas celdas se agrupan en módulos estándar, los cuales las protegen del entorno mientras que suministran energía. Los módulos FV son extremadamente confiables debido a su estado sólido y a que no tienen partes móviles. Las celdas fabricadas hoy en día tienen una vida útil de más de 40 años (Foster y col., 2010).

## **2) Energía eólica**

La generalidad de la energía eléctrica es aprovechar la energía que posee el viento, recurso completamente gratuito y que, en determinadas circunstancias alcanza niveles de producción útiles a gran escala. Sin embargo, la energía eólica ha sido usada desde hace muchos siglos para el transporte marino y para la producción agrícola mediante molinos.

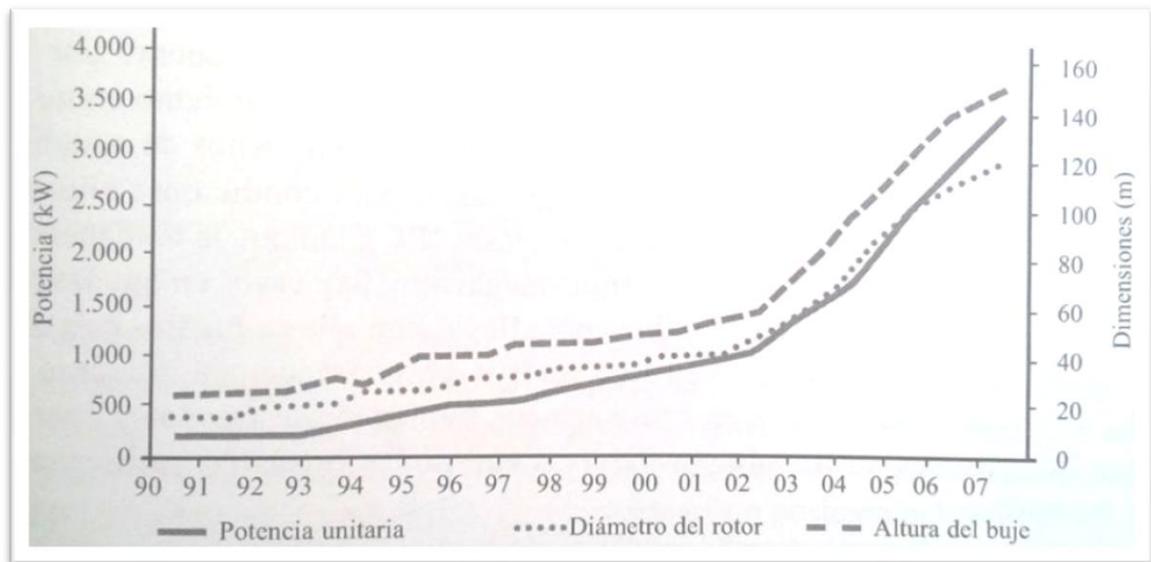
Actualmente, dentro de las aplicaciones de la energía eólica para la producción de energía eléctrica se encuentran:

- Proyectos de inversión a gran escala para producción de energía eléctrica.
- Instalaciones concebidas como proyectos de apoyo par generación de energía eléctrica.
- Instalaciones cuyo objetivo es el suministro de energía a equipos de desalación y bombeo de agua de pozos.
- Instalaciones no conectadas a la red y de pequeño tamaño. Esta aplicación es especialmente importante en zonas que no cuentan con conexión a redes eléctricas.

El elemento principal de aprovechamiento de energía eólica es el aerogenerador, el cual transforma la energía cinética, contenida en el viento, en energía eléctrica en las condiciones idóneas para ser utilizada. Los diseños de los aerogeneradores son variados, abarcándose a los requerimientos específicos. Pueden transformar la energía del viento en energía mecánica para uso directo, o transformándola posteriormente en energía eléctrica; o bien permite directamente transformar la energía cinética en eléctrica.

La evolución de los aerogeneradores ha permitido un crecimiento muy acelerado en lo que a producción de energía se refiere. En los años ochenta del siglo pasado, los aerogeneradores eran prácticamente dispositivos experimentales de generación de energía. Sin embargo, hoy en día, los aerogeneradores son una tecnología consolidada que permite la generación de electricidad a una gran

escala de forma ambientalmente amigable. La Figura 1.1. muestra la evolución de las dimensiones y potencias de los aerogeneradores a lo largo de los años. Se aprecia como la altura del buje va relacionada con la potencia generada.



**Figura 1.1.** Evolución de dimensiones y potencias de los aerogeneradores (Talayero y Telmo, 2008)

Los conjuntos fundamentales de un aerogenerador son:

- El rotor, compuesto por las palas y el buje.
- La góndola, en la cual se encuentra el eje, el multiplicador, el freno, el generador eléctrico, el transformador y parte del sistema de control.
- La torre, la cual es el soporte de todo el sistema y puede ser de tipo tubular o celosía (Talayero y Telmo. 2008).

### 3) Energía hidroeléctrica

Debido al curso de los cauces de agua, ya sean artificiales o naturales, así como a las acumulaciones en forma de lagos o presas, el agua ha sido, desde hace muchos siglos, una fuente de energía mecánica y eléctrica explotados por el ser humano. Durante mucho tiempo se crearon molinos accionados por cauces de agua, los cuales generaban movimiento aprovechado por palas y engranes para fines agrícolas, principalmente. Con los conocimientos de energía eléctrica y la conversión a la misma usando energía mecánica, se desarrollaron sistemas de generación de electricidad mediante el uso de presas las cuales aprovechan la diferencia de altura en los cuerpos de agua. Este es la forma de obtención de energía a partir del agua más usada en nuestros días.

Dos cuerpos de agua que se encuentran a diferentes alturas, tienen dos energías potenciales y cinéticas diferentes, por lo que se han desarrollado tecnologías que aprovechan esta energía para producción de energía eléctrica mediante turbinas. Las turbinas convierten la energía mecánica del agua que se precipita, de una altura mayor hacia una menor, y la convierten en energía eléctrica mediante el movimiento de sus álabes<sup>3</sup>. Los sistemas de generación de energía eléctrica más grandes, son normalmente las presas; tanto en su producción, como en la infraestructura y alteraciones ambientales que produce. Si bien una presa se considera un sistema de generación renovable de energía, no siempre resulta ecológicamente adecuado debido al gran cambio que presenta en el ecosistema que se aplica.

#### **4) Energía geotérmica**

Existe una inmensa cantidad de calor atrapado en el interior de la tierra. De hecho, hay suficiente calor atrapado como para solventar las demandas energéticas del mundo prácticamente por tiempo indefinido. Sin embargo, esta energía no puede ser usada fácilmente. La energía geotérmica puede surgir de dos formas. La primera fuente es con las rocas fundidas (magma), las cuales están presentes en el manto de la tierra entre la corteza y el núcleo. El gradiente de temperatura depende de la profundidad de la tierra respecto a la superficie, aunque, a una mayor profundidad se requieren de más recursos de todo tipo para aprovechar el calor de la tierra. Sin embargo, existen lugares con actividad volcánica en los que los gradientes de temperatura son elevados debido a las propiedades características del sitio. Por lo tanto, las exploraciones de sitios con potencial geotérmico, son aquellas que presentan altos gradientes de temperatura, y más cercanos a la superficie de la tierra.

La segunda forma de energía geotérmica sucede debido a la degradación radiactiva de los isotopos de uranio, torio y potasio, que sucede en la corteza terrestre. Mientras que este proceso sucede, se genera una acumulación de calor. Hay zonas del mundo en las que las rocas fundidas están más cerca de la superficie terrestre, y por tanto, el gradiente de temperaturas que se puede alcanzar a poca distancia de la superficie es mayor. Esto hace posible un mejor aprovechamiento de la energía geotérmica. Lugares como Islandia, el Mediterráneo, el oeste de EE. UU y nueva Zelanda, son los que tienen un mayor potencial para este tipo energía en el mundo.

---

<sup>3</sup> Álabes- parte de una turbina que interactúa con su fluido de trabajo.

Un sistema geotérmico está compuesto prácticamente de tres elementos

- Una fuente caliente,
- Un reservorio, que pueden ser las rocas calientes, las cuales transfieren el calor de la tierra,
- Un fluido, normalmente agua, el cual recibe el calor de las rocas (Dell y Rand, 2004).

## **1.2 Biomasa**

Desde una perspectiva de energías renovables, se define a la biomasa como la materia orgánica reciente derivada de las plantas como resultado de la conversión producida por lo fotosíntesis, o de animales, y que almacena energía química la cual proporcionará calor, electricidad o combustibles (Sims, 2002).

Por otro lado, Fernández (2010) define a la biomasa como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía, es decir, cualquier sustancia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales que resultan de su transformación natural o artificial. El término biomasa incluye a toda la materia viva que, sea cuál sea la circunstancia, no es utilizable ni para la alimentación humana ni la de los animales que viven en los ecosistemas naturales. No se incluye dentro de la biomasa aquella materia que fue viva y que ha sufrido cambios profundos en su composición, tales como lo que han tenido lugar durante los procesos de mineralización ocurridos en la formación de carbón y petróleo.

El uso de la biomasa para su aprovechamiento se ha conocido desde hace mucho tiempo por el ser humano. El uso de la madera para generar fuego es una de las aplicaciones de la biomasa más antiguas. Sin embargo, el uso tecnificado de la biomasa es relativamente nuevo y su comprensión involucra ciencias químicas y biológicas. A gran escala, la biomasa es actualmente la fuente primaria de combustible, para sector residencial, en muchos países en vías de desarrollo. Por ejemplo, se calcula que más del 90% de la energía para uso doméstico en los países más pobres de África y América Central, así como en el 35% de los hogares de Latinoamérica y Asia, usan la biomasa como forma de combustible. La forma de biomasa que se usa puede ser madera, carbón, desechos de plantas o desechos de animales. Los usos de la biomasa en dichos países son, cocinar, alumbrado y calefacción. La dependencia de la biomasa en estos países tiende a disminuir, mientras que en los países desarrollados la dependencia de la biomasa tiende a aumentar.

Aunque la combustión directa de biomasa en forma de carbón o madera, es muy usada en países en vías de desarrollo, este tipo de uso de la biomasa no se considera adecuado o eficiente para aplicaciones energéticas a gran escala. Respecto al tipo de biomasa que se use para la generación de energía, Lee y col., (2007) definieron algunos factores que se deben de considerar para un programa de uso de biomasa a gran escala:

- Disponibilidad de la tierra con respecto al tiempo
- Productividad
- Sustentabilidad ambiental
- Factores sociales y socioeconómicos
- Eficacia económica
- Beneficios secundarios
- Desventajas y problemas de implementación.

Existen cinco formas mediante las cuales la biomasa se puede usar como combustible: combustión directa, gasificación, licuefacción, pirólisis y la producción de biogás.

### **1) Combustión directa**

Como se ha mencionado, la combustión directa de la biomasa es una de las aplicaciones más antiguas de la misma y durante muchos siglos fue la única fuente de iluminación. Sin embargo, hoy en día se conocen los riesgos, tanto ambientales como a la salud de quienes queman biomasa para cocinar o iluminar, principalmente en niños y mujeres. Cuando no existe una ventilación adecuada, la gente está en contacto con gases tóxicos, como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), etc. Y lo que es peor, si el contenido de humedad en la madera aumenta, o si se usa biomasa con un menor contenido energético (como desechos de animal), la cantidad de emisiones nocivas aumenta.

Los sistemas de generación de electricidad son ineficientes si queman biomasa en forma directa, debido a la alta pérdida de calor de desecho, el cual puede ser de dos terceras partes del contenido total de energía de la biomasa. Sin embargo, si el calor de desecho es aprovechado de forma eficiente, puede servir en industrias agrícolas y ganaderas o donde se requiera secado de materiales.

## 2) Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte materia con contenido de carbono, ya sea carbón y/o desechos, ya sean usados solos o combinados, para producir gas de síntesis. Dicho gas contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y otros hidrocarburos, comúnmente referidos como C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>.

Se realiza una combustión parcial en un ambiente en el cual el suministro de oxígeno es restringido. Las temperaturas a las cuales se debe de realizar dicha combustión van, desde los 600°C hasta los 1,300°C. El poder calorífico del gas de síntesis está apenas entre el 10-14% del poder calorífico del gas natural. Por lo tanto no puede ser usado en motores ni turbinas. Si en lugar de aire se usa oxígeno como medio de gasificación, el poder calorífico tiende a aumentar, sin embargo los costos lo hacen poco viable. Para un uso del gas de síntesis, éste se comprime para así poder ser quemado y usado en motores y producir electricidad (Panagiotis, 2011).

## 3) Licuefacción

El proceso de la licuefacción consiste en separar la madera y biomasa en una fracción sólida y otra líquida. La fracción líquida se manda a una unidad de neutralización y de ahí a una etapa de fermentación. Por su parte, la fracción sólida se manda directamente a la fermentación. Al salir de la fermentación, los componentes ligninosos<sup>4</sup> se retiran para su uso en generación de electricidad, y de ahí se manda el resto a una unidad de destilación.

## 4) Pirólisis

La pirólisis es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno. Se produce a 500°C. A estas temperaturas los residuos se transforman en gases, líquidos y cenizas sólidas denominadas “coque” de pirólisis. Las proporciones relativas de los elementos producidos dependen de la composición de los residuos, de la temperatura y del tiempo que ésta se aplique.

Mediante este proceso se produce el carbón vegetal. Adicionalmente, la pirólisis conlleva la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos

---

<sup>4</sup> Los componentes ligninosos son aquellos encargados de engrosar el tallo de las plantas, generando fibras de madera en los árboles y algunas plantas.

ligeros. Este gas, de bajo poder calorífico, puede servir para accionar motores diesel, o para producir electricidad, o para mover vehículos.

### 1.3 Biogás

Los residuos orgánicos, como pueden ser las basuras, las aguas fecales o los excrementos, son vistos en general como un problema del que hay que desprenderse. Pero existen métodos mediante los cuales es posible obtener energía de ellos. La producción de biogás es uno de estos métodos, en el cual, microorganismos anaerobios, descomponen la materia orgánica. Las bacterias consumen el carbono y el nitrógeno, y como resultado se producen gases entre los que se encuentra el metano, el cual puede ser usado para generar energía. La composición del biogás es de entre 60-70% gas metano, dependiendo de la biomasa que lo genera, y el resto es una mezcla entre dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y gases en mucha menor cantidad (Sims, 2002).

Este biogás de modo genérico se puede producir tanto de forma natural (en este sentido el gas natural no es más que un tipo de biogás surgido por el mismo proceso a partir de residuos orgánicos que quedaron enterrados) o de forma artificial, en dispositivos denominados digestores, diseñados para eliminar la contaminación de origen orgánico y producir energía.

La producción de biogás por degradación anaerobia es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables ya que produce un combustible de valor además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico.

El metano ( $\text{CH}_4$ ), constituyente principal del biogás, contribuye de manera muy importante como gas de efecto invernadero (GEI), ya que tiene un impacto 21 veces mayor que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera. Los sistemas de generación biogás, por lo tanto, cumplen funciones tanto energéticas como ambientales, al capturar y aprovechar el  $\text{CH}_4$  para la generación de energía eléctrica, mecánica o calorífica. El biogás tiene un poder calorífico medio entre 18.8 y 23.0  $\text{MJ/m}^3$  (CONAFOR, 2006), o entre 20 y 26  $\text{MJ/m}^3$  (Sims, 2002) y puede usarse en motores de combustión interna, para cocción de alimentos, iluminación y calefacción doméstica entre otros usos. El biogás también tiene otros compuestos en menor proporción.

En la Tabla 1.1 se muestran valores de biogás producido con base a diferentes tipos de biomasa, su porcentaje de metano y el tiempo de retención.

**Tabla 1.1**

**Volúmenes típicos y composición de biogás producido para diferentes materias primas a 35°C y con los tiempos de retención óptimos en un tanque comercial (Sims, 2002)**

<b>Materia prima</b>	<b>Biogás producido (L/kg de sólidos totales)</b>	<b>Metano en biogás (%)</b>	<b>Días de retención adecuados</b>
<b>Estiércol de oveja</b>	180-220	55-57	20-25
<b>Estiércol de ganado</b>	190-220	56-60	20-25
<b>Estiércol de cerdo</b>	170-450	60-65	20-30
<b>Estiércol de ave</b>	300-450	60-70	15-20
<b>Periódicos</b>	235-245	51-53	28-30
<b>Maleza acuática</b>	370-390	55-57	20-25
<b>Hojas de remolacha</b>	375-385	65-68	20-25
<b>Paja de cereal</b>	350-450	54-58	25-30
<b>Heno</b>	350-460	54-65	20-25
<b>Avena entera</b>	450-480	51-55	20-25
<b>Maíz entero</b>	350-500	50-55	20-25
<b>Pasto</b>	450-530	55-57	20-25
<b>Col</b>	440-560	47-58	20-25
<b>Alfalfa</b>	450-600	56-64	20-25
<b>Carne de desecho</b>	590-610	58-60	25-30
<b>Raíz de remolacha</b>	610-630	64-66	15-20
<b>Papas</b>	800-890	53-55	25-20
<b>Plátano</b>	930-950	52-55	15-20

El ser humano ha desarrollado formas de usar el biogás debido a su potencial como combustible. Normalmente es obtenido a partir de aguas de desecho residuales, en plantas de tratamiento de aguas, campos de cultivo, industrias que generan desechos orgánicos y a partir de desechos orgánicos en proceso de descomposición.

En la Tabla 1.2 se muestran algunas propiedades promedio del biogás. Es necesario mencionar que todas las propiedades del biogás varían con base a la materia prima que lo genera. De igual forma, las condiciones físico-químicas a las que está expuesta la reacción de generación del mismo, como por ejemplo, la temperatura y el tiempo de residencia, están directamente relacionadas a las propiedades del mismo.

**Tabla 1.2**

<b>Propiedades comunes del biogás (PSE PROBIOGAS, 2010 b)</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Biogás Crudo</b>	<b>Biogás depurado (Sin H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O)</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	%	60	<b>98</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	%	37	<b>&lt;2</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	g/m <sup>3</sup>	>13.5	<b>0.05</b>
<b>H<sub>2</sub>S</b>	mg/m <sup>3</sup>	500	<b>&lt;5</b>
<b>Temperatura</b>	°C	36	<b>4</b>
<b>Poder calorífico</b>	kWh/m <sup>3</sup>	6.62	<b>10.8</b>
<b>Densidad</b>	kg/m <sup>3</sup>	1.2	<b>0.72</b>

### **1.3.1 Usos del biogás**

Al estar compuesto mayoritariamente por metano, el biogás tiene un potencial de ser usado como combustible. No obstante, esta composición mayoritaria de metano, no es lo suficientemente alta como para que sustituya en forma plena a otros combustibles gaseosos como el gas natural. Eso, junto con la alta cantidad de contaminantes del biogás, no lo hacen viable para su utilización de forma directa en algunas aplicaciones más especializadas.

El biogás puede utilizarse para generar energía térmica o para quemarlo en motores de combustión interna, que transforman la energía térmica en energía mecánica de rotación, que puede utilizarse para mover un alternador y producir energía eléctrica. En la producción de energía térmica se usan calderas o quemadores, es un proceso poco eficiente y que genera emisiones y gases tóxicos nocivos para la salud humana. Los motores de combustión que se utilice deben de ser adaptados a la composición especial de este combustible, de bajo poder calorífico. Por lo general, la inversión necesaria para este tipo de uso de biogás es elevada, aunque su falta de rentabilidad viene compensada por el beneficio medioambiental que reporta (González, 2009).

Para ser utilizado en aplicaciones más complejas, el biogás requiere ser purificado para extraer de él la mayor cantidad de contaminantes (en especial el azufre), así como para que la cantidad de metano en el gas sea más elevada. La cantidad de metano del gas, para ser usado en un motor, es de 95%. De los usos más recientes del biogás, se encuentran: las pilas de combustible y su uso para la elaboración de gas de síntesis.

Las pilas de combustible son dispositivos en lo que tiene lugar una reacción electroquímica entre un combustible y un compuesto oxidante, produciéndose electricidad. Su principal característica y ventaja es la capacidad de convertir directamente la energía química en energía eléctrica, asegurando la generación de energía con alta eficiencia y bajo impacto ambiental. Las pilas, sin embargo, pueden funcionar con una gran variedad de combustibles y oxidantes. Sin embargo, estos combustibles deben de ser transformados antes de su entrada a la celda en  $H_2$  para su posterior reacción con el oxígeno del aire y la consecuente producción de energía. El biogás se considera actualmente como uno de los combustibles que tienen la posibilidad de ser usados en las pilas de combustible debido a su carácter renovable. Puede ser utilizado directamente o reformado previamente para obtener hidrógeno, el cual a su vez sería de origen renovable y aumentaría el carácter de sostenibilidad de la tecnología.

Por su parte, el gas de síntesis es un gas de gran interés en la industria química y petroquímica. Esto debido a que es el punto de partida de muchas reacciones de gran interés que pueden llevar desde la síntesis química de compuestos de alto valor añadido hasta a la síntesis de combustibles sintéticos.

En la actualidad la producción de gas de síntesis se hace a partir de gas natural reformado con vapor. Por lo que, el biogás, debido al alto contenido de metano (hasta 70%) se puede proponer esta fuente de energía renovable como materia prima alternativa al gas natural para la producción de gas de síntesis (PSE PROBIOGAS, 2010,a).

El biogás también puede ser introducido a una red de gas natural, sin embargo debe de ser purificado y comprimido para su adecuado uso. También es un material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido, como el metanol y el gas natural licuado (Fernández, 2010).

### **1.3.2 Purificación del biogás**

El biogás una vez producido, puede ser quemado en calderas, usado como combustible en generación de electricidad, puede ser usado para obtener productos químicos, como combustible de auto o inyectado en redes de gas natural.

Sin embargo, los usos de biogás dependen de la calidad alcanzada, la cual se deriva del tipo de refinado químico que puede sufrir el biogás en distintos niveles, para eliminar contaminantes tales como nitrógeno, oxígeno, ácido sulfúrico, dióxido de carbono y humedad. Sin embargo, las composiciones de biogás, en no pocas ocasiones contienen concentraciones de H<sub>2</sub>S que varían entre 100-4,000 ppm, dependiendo del residuo original, y ese es uno de los contaminantes más problemáticos a la hora de utilizar el gas del digestor como fuente de energía: es tóxico, corrosivo para la mayor parte de los equipos, además de que es un compuesto oloroso.

Los tratamientos de purificación de biogás afectan a los costos de producción y consecuentemente al precio final de la energía generada. Los métodos de depuración de biogás pueden clasificarse según la tecnología utilizada:

#### **a) Métodos de adsorción**

Se basan en la captura selectiva de las impurezas del gas con ayuda de materiales sólidos granulados, los cuales contienen una gran superficie específica. La aplicación de elevadas presiones mejora sustancialmente el resultado final. Estos sistemas se utilizan principalmente para eliminar el agua, dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno presentes como contaminantes del biogás. El proceso más conocido utiliza un sistema de adsorción por balanceo de presión, donde el gas es comprimido a 100 psi, antes de ser comprimido en el sistema de adsorción. El sistema PSA elimina el agua, el dióxido de carbono a valores cercanos al 3%, y H<sub>2</sub>S a valores típicos entorno a 4ppm, obteniéndose un gas que se encuentra dentro de los límites normalmente exigidos para su distribución en tubería.

#### **b) Métodos de absorción**

Fundamentalmente aplicables al caso del H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>. Se basan en la transferencia de masa entre la sustancia gaseosa a depurar y un líquido denominado absorbedor que posee propiedades selectivas de absorción. El solvente habitual es el agua y se utilizan diversos compuestos y sistemas para la depuración. Uno de los procedimientos empleados para absorber el H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>, consiste en la utilización de soluciones de aminas<sup>5</sup>, las cuales tienen el grupo amino (NH<sub>2</sub>) que se combina con el dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno para dar compuestos de hidrógeno carbonato, amoniaco

---

<sup>5</sup> Amina: compuestos químicos orgánicos que resultan de la sustitución de los hidrógenos de la molécula por radicales alquilo.

$(\text{RNH}_3)\text{HCO}_3$  y azufre con amoníaco  $(\text{RNH}_3)\text{S}$ , pero con el inconveniente de que son un método muy costoso.

También se han empleado soluciones acuosas alcalinas. Su principal ventaja consiste en que los problemas de corrosión y formación de espuma lo hacen menos costoso. Sin embargo, el agente antiespumante hace que el equipamiento y la operación sean más complicados. Este método presenta un elevado consumo de energía para el bombeo de la solución y de los gases.

### **c) Métodos de separación por membrana**

Este proceso se basa en la difusión de algunos compuestos que pasan a través de una membrana selectiva. Con el objetivo de facilitar la difusión se emplea un portador. La permeabilidad del gas a través de la membrana es función de la solubilidad y difusividad del gas en función de la membrana, tales como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , el  $\text{H}_2$  y otros hidrocarburos y gases ligeros.

Diferentes filtros de membranas han sido probados para la separación del sulfuro de hidrógeno y  $\text{CO}_2$  del gas. Los equipos y la operación de este método son simples, sin embargo, la eficiencia de la separación por membrana es baja y el costo de la misma es elevado, además de que requiere de presiones elevadas.

### **d) Métodos biológicos**

Se llevan a cabo mediante la acción de determinados microorganismos tales como bacterias sulfuoxidantes que llevan el sulfuro a azufre metálico. Se conocen muchos microorganismos que habitan en lugares húmedos y que son consumidores de  $\text{H}_2\text{S}$  como fuente nutricional, cubriendo sus alrededores con azufre. Estos organismos tienen preferencia por las aguas residuales y nunca deja de crecer y multiplicarse mientras las condiciones ambientales lo permitan y pueden vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno. El efecto biocatalítico en cuestión se debe al consumo de  $\text{H}_2\text{S}$  por parte de los microorganismos disminuyendo así su concentración en el biogás (PSE PROBIOGAS, 2010, a).

## **1.3.3 Ejemplos de uso de biogás en el mundo**

El biogás se utiliza en muchos lugares del mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo, mediante una combustión directa del mismo. Esta aplicación es utilizada para la cocción de alimentos, calefacción y, en algunos lugares, para generar condiciones adecuadas de ambiente en criaderos de animales. También se usa su combustión directa en muchos rellenos sanitarios para la

obtención de bonos de carbono en proyectos nuevos que sean amigables con el entorno. O sencillamente se quema para que el metano (21 veces más destructivo para la capa de ozono que el dióxido de carbono) no llegue a la atmósfera.

Pero el biogás que ha sido sometido a una purificación, puede ser usado para la producción de energía eléctrica mediante motores de combustión interna y turbinas; aunque para esta aplicación se usan mayoritariamente motores. También es usado en vehículos para su funcionamiento. La mayoría de los vehículos que funcionan con un motor de combustión a gasolina o a diesel, pueden modificarse para funcionar con gas natural. El gas natural, al igual que el biogás, tienen una composición mayoritaria de metano. La diferencia del gas natural al biogás, radica en que tiene una cantidad menor de contaminantes, así como una mayor proporción de metano. Sin embargo, el biogás purificado y tratado, puede ser usado de forma similar al gas natural.

En el caso de los vehículos, hay diferentes configuraciones en las que puede ser usado el biogás:

- Motores que funcionen con gas natural comprimido
- Gas natural licuado
- Motores bi-combustible, esto es gasolina/gas natural comprimido
- Motores de combustible dual, gas natural licuado/diesel

Suecia es, en la actualidad, el líder en el uso del biogás para medios de transporte. Cuentan con una flota de cerca de 4,500 vehículos en la que el 45% de consumo de combustible es por parte de biogás. Otros países como Alemania, Dinamarca, Alemania, Holanda e Inglaterra también han desarrollado aplicaciones en estos campos (WI, 2007). Se prevé que en los próximos cincuenta años habrá cambios en los esquemas energéticos de generación centralizada a un modelo de generación distribuida y a la producción de energía a nivel local, lo cual favorecerá los sistemas de aprovechamiento de biogás. No obstante, se requiere de una revisión de los incentivos de los gobiernos para la consolidación de esta tecnología.

Ya que el biogás purificado es muy parecido al gas natural, las emisiones, su manejo y su mantenimiento son considerados equivalentes. Aparte de Europa, las experiencias más importantes, y las más antiguas del uso de biogás, se encuentran en China y en Nepal. En el primer país se ha trabajado desde los años ochenta y la mayor expansión se dio en los noventa; a la fecha existen 11.1 millones de digestores domésticos y cuenta con más de 100 mil unidades de pequeña y mediana escala (para comunidades y pequeñas ciudades). En el segundo país se tienen contabilizadas cerca de 100 mil unidades familiares. La creación y utilización del biogás de manera artificial se remonta a la segunda

guerra árabe-israelí, a mediados de los años setenta del siglo XX, cuando el precio del petróleo subió al ser utilizado como arma política, lo que promovió investigaciones enfocadas a la producción de energía (Fernández, 2010).

### **1.3.4 Biogás de degradación de materia orgánica**

La degradación anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las mismas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. Se pueden usar dos o más tipos de residuos. La co-degradación es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro.

Un digestor de desechos orgánicos es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican-, etcétera) 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.

El fenómeno de degradación anaerobia ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaerobios presentes en los desechos que, al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH<sub>4</sub>) llamada biogás, que es utilizado como combustible. Como resultado de este proceso se generan residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.

Una de las características más importantes de la degradación anaerobia es que disminuye el potencial contaminante de los excrementos de origen animal y humano, disminuyendo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno DBO hasta en un 90% (dependiendo de las condiciones de diseño y operación).

#### **1.3.4.1 Digestores**

Los diseños utilizados para los sistemas de degradación anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el digestor. El digestor de

funcionamiento más sencillo es el de mezcla completa, y es el más utilizado para residuos. A continuación la clasificación de tipos de digestores:

#### **a) Digestor de mezcla completa sin recirculación**

Consiste en un digestor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de substrato como de microorganismos. Esto se consigue mediante un sistema de agitación. Esta puede ser mecánica (recirculación de biogás a presión), y nunca violenta. Esta topología de digestor no ofrece problemas de diseño y es el más usado para residuos. Comparativamente a otros digestores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el digestor en régimen estacionario, es la misma que se pretende en el efluente.

#### **b) Digestor de mezcla completa y recirculación**

Este sistema sería equivalente al sistema de lodos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales.

Regulando la circulación es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Esto se consigue con base a aumentar el tiempo de retención de los microorganismos, gracias a su confinamiento en el sistema mediante la separación en el decantado y re-circulación. Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales con alta carga orgánica. Requiere de un desgasificador, sin el cual la decantación se puede ver impedida.

#### **c) Filtro anaerobio**

En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte, columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste, con flujo vertical.

El soporte puede ser de material cerámico o plástico. Su distribución puede ser irregular, (filtro anaerobio con flujo ascendente) y en este caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente, y en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas. Este tipo de sistema ha sido extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria. Su coste de inversión es elevado.

#### **d) Lecho fluidizado**

En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una película, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado se recurre a la recirculación.

#### **e) Lecho de lodos**

El digestor de lecho de lodos favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador de materia. Es el más simple entre los sistemas de retención de biomasa y el único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule, esto es, que forma agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición de agua a tratar y mantener una operación adecuada.

#### **f) Sistemas discontinuos**

En un sistema discontinuo, la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos. Por lo tanto, el concepto de tiempo de retención no tienen sentido y se hablaría de tiempo de degradación. Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben de combinarse varios digestores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo. Estos digestores han sido aplicados a residuos con una alta concentración de sólidos con una alta concentración de sólidos que dificultan la adopción de sistemas de bombeo, tales como residuos de ganado vacuno.

### **1.3.4.2 Rellenos sanitarios**

Un relleno sanitario es un sitio, especialmente seleccionado y acondicionado, para depositar la basura proveniente de las ciudades. A diferencia de los tiraderos comunes a cielo abierto, en un relleno sanitario se va depositando basura a la vez que se cubre con capas de tierra y materiales que impiden el contacto directo con la atmósfera. Las capas de basura y tierra se van acumulando una encima de otra hasta formar varios niveles. Al final de la vida útil del relleno, queda en la superficie un terreno que puede ser usado para áreas verdes o recreativas. El método más común para la disposición de los desechos sólidos ha sido, durante muchos años, ha sido el vertido de los desechos. Sin embargo, debido a los problemas ambientales que se ocasionan, se modificó la práctica para dar lugar a los rellenos

sanitarios los cuales acumulan, de forma organizada, los desechos que se reciben principalmente de las ciudades. Las prácticas modernas de vertido incluyen programas de seguimiento de los residuos entrantes, para gases, para lixiviado, etc., con el fin de controlar la contaminación del entorno circundante, especialmente las aguas subterráneas, las superficiales y de la atmósfera.

El lixiviado es un líquido acuoso que se filtra en un vertedero. Se produce por las infiltraciones de lluvia y de las fracciones húmedas de los residuos. Puesto a que permanece mucho tiempo en el relleno, en un ambiente principalmente anaerobio, se contamina con metales orgánicos y pesados y como tal resulta altamente tóxico. Es importante que estos lixiviados no alcance jamás los cuerpos de agua subterráneas (Kiely, 1999).

En un relleno sanitario se genera el gas de relleno, o de vertedero, el cual se produce debido a la degradación anaerobia de los residuos orgánicos biodegradables. El gas que se origina tiene una composición parecida a la del biogás, alrededor de 60% de metano y un 40% de dióxido de carbono. Al tener un alto contenido de metano, el gas de relleno es potencialmente explosivo y debe de ser sometido a alguna clase de control. Un relleno sanitario es la opción más económica para la eliminación de residuos sólidos. Puede manejar una gran cantidad de desechos y funcionar durante periodos largos de tiempo. Sin embargo, un relleno sanitario requiere de una interminable cantidad de mantenimiento mientras que dure su vida útil. Además, la creación de un relleno sanitario no consiste, simplemente, en buscar una zona especial donde puedan verterse los residuos sólidos, pudiendo provocar graves problemas de degradación del paisaje, incendios, malos olores, peligro de infecciones, contaminación de aguas subterráneas, etc.

Para establecer una descarga controlada en el relleno sanitario, se debe de escoger una zona alejada de toda corriente de agua y, al mismo tiempo, que no suponga un grave perjuicio ecológico. Por lo tanto, los residuos no deben de ser tóxicos ni peligrosos y deben de haber sido compactados previamente.

En el relleno, todos los días la basura depositada es cubierta con una capa de tierra, arena o escorias inertes; las capas de basura no pueden exceder los dos metros de grosor. Si bien el método es bueno para el manejo de basura, cuenta con algunos problemas, por ejemplo, requiere de un presupuesto elevado para poblaciones pequeñas y una generación muy elevada de basura para ciudades grandes. Otro de los problemas que se pueden presentar es la impermeabilidad de las capas de basura, teniendo en cuenta el elevado porcentaje de plástico, vidrios y latas. Lo anterior imposibilita, en gran medida, la

fermentación típica de las materias orgánicas que se producen en un vertedero, y por lo tanto, la asimilación de estos residuos por la propia naturaleza (Sans y de Pablo, 1989).

### **1.3.4.3 Principios de conversión**

El proceso de degradación anaerobia tiene tres etapas bien definidas:

1) Inicialmente, la biomasa es descompuesta por un conjunto heterogéneo de microorganismos no necesariamente confinados a ambientes anaerobios. Esta descomposición comprende la hidrólisis de la celulosa en simple glucosa usando enzimas que proveen los microorganismos para la catálisis. De igual forma, las proteínas son descompuestas en amino ácidos y lípidos en ácidos grasos de cadenas largas. El resultado de esta primera etapa es que la mayor parte de la biomasa es ahora soluble en agua en una forma química más simple, ideal para la siguiente etapa.

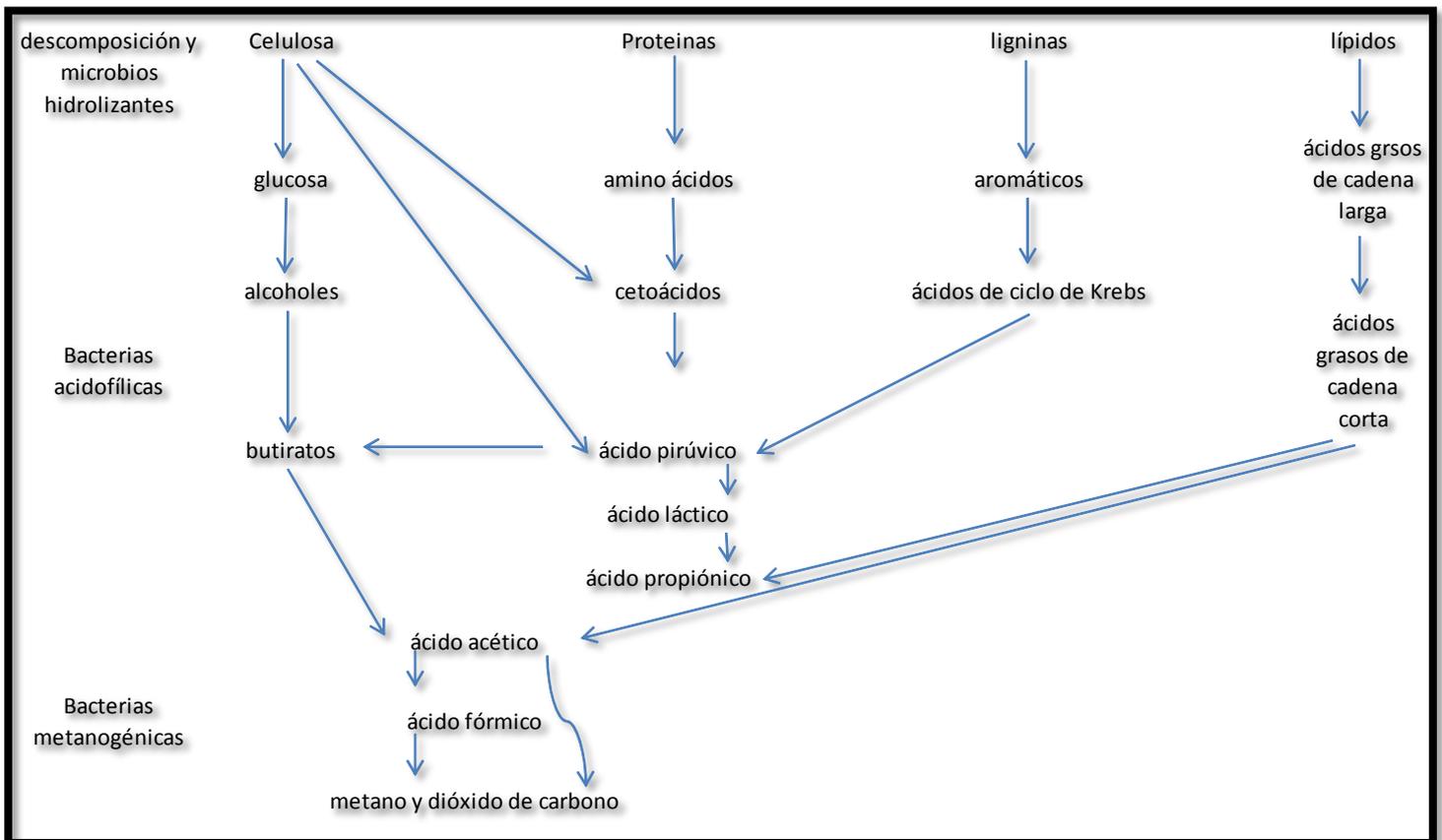
2) En la segunda etapa interviene la deshidrogenación (removiendo átomos de hidrógeno de la biomasa), así como cambiando a glucosa en ácido acético, carboxilación (removiendo grupos carboxyl) en amino ácidos, de nuevo, obteniendo ácido acético como producto final. Estas reacciones son de fermentación y están realizadas por una gama de bacterias acidoflicas (formadoras de ácido). Su rendimiento óptimo requiere un pH de entre 6-7 (ligeramente ácido), pero como los ácidos formados comúnmente bajan el pH de la mezcla, con frecuencia se adiciona cal.

3) La tercera y última etapa es la producción de biogás (mezcla de metano y dióxido de carbono) del ácido acético mediante una segunda fermentación realizadas por bacterias metanogénicas. Estas bacterias son muy susceptibles por lo que requieren de un ambiente estrictamente anaerobios. A menudo, el proceso se planea para llevarse a cabo en un solo contenedor, pero el hecho de separar el proceso en etapas permite una mayor eficiencia. Este último proceso puede tomar semanas, mientras que los primeros comúnmente duran días y hasta horas, dependiendo de la biomasa (Sørensen, 2011).

Con la intención de que el proceso se realice de forma exitosa, algunas cuantas condiciones se deben de llevar a cabo. La acción de las bacterias se ve inhibida por la presencia de sales de metal, penicilina, amoniacó en grandes concentraciones. De la misma manera, una fuente de nitrógeno es necesaria para el crecimiento de los microorganismos. Si existe poco nitrógeno relativo a la cantidad (una relación de nitrógeno carbono menor a 15) de carbono contenido en la biomasa que se ha de transformar, entonces el crecimiento de las bacterias es insuficiente ya que las bacterias comienzan a

sufrir un envenenamiento por amoniaco la producción de biogás es muy pobre. Por el contrario, si la cantidad de nitrógeno es muy alta (relación carbono nitrógeno mayor a 30) la producción de biogás comienza a disminuir, sin embargo, en algunos sistemas que tienen una relación de alrededor de 70 aún se puede generar biogás.

Si el tiempo del proceso no es un problema, casi cualquier material con celulosa puede convertirse en biogás, incluso el pasto. La producción promedio de estiércol de ganado y cerdos adultos (en Europa, Australia y América) es de 40 y 2.3 kg/día que corresponden a 62 y 6.2 MJ/día, respectivamente. El equivalente en producción de biogás puede alcanzar 1.2 y 1.8 m<sup>3</sup> /día. Los residuos de un proceso anaerobio tienen valores más altos como fertilizante que como biomasa pura. La materia insoluble al inicio se pierde y lo que queda es material altamente soluble y cargado de nitrógeno. La carga de patógenos en los residuos se reduce. Se ha encontrado que hay una reducción de entre 65%-90% de *Salmonella* durante el proceso, así como una reducción significativa de los estreptococos, coliformes y virus, así como una eliminación casi total de parásitos como *Entamoeba* y *Esquistosoma*. En la Figura 1.2 se muestra la secuencia para la generación de biogás a partir de la descomposición anaerobia.



**Figura 1.2.** Proceso de generación de biogás a partir de la descomposición anaerobia (modificado de Sørensen, 2011)

## 1.4 Ejemplos de plantas de biogás

En la actualidad, existen ya varios tipos de plantas para la generación y aprovechamiento de biogás a lo largo de todo el mundo. Las plantas se usan para diferentes fines, ya sea para la combustión simple del biogás y su aprovechamiento como fuente de calor, o para la generación de energía eléctrica.

Algunos ejemplos de plantas de biogás en el mundo son:

- **Nuevo León, México**

Fue la primera planta a nivel nacional, sobre el aprovechamiento de biogás emitido por la basura dispuesta en rellenos sanitarios, para la generación de 40 GWh/año de energía eléctrica y la mitigación de emisiones de 34 m<sup>3</sup>/min de metano. La planta fue diseñada de forma modular y escalable para, de esa forma, facilitar su operación, mantenimiento y tener una capacidad de crecimiento a futuro. La planta comprende dos sistemas principales: el primero es una red de captación de biogás que se estima, proveerá el gas durante 20 años. El segundo sistema corresponde a la central de producción de energía eléctrica, compuesta de 7 motogeneradores de 1.06 MW cada uno y 7 transformadores de 1,250kVA (Macera, 2006).

La empresa, Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V. (BENLESA) fue el primer proyecto a gran escala sobre el uso de energías renovables en México y en América Latina, el cual utiliza como energía el biogás generado en un relleno sanitario. BENLESA, es el resultado de una alianza entre la empresa privada Bioeléctrica de Monterrey, S. A. de C. V. y el Gobierno del Estado de Nuevo León, a través del Sistema para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (simeprode), un organismo público descentralizado. Bioeléctrica de Monterrey y Sistemas de Energía Internacional, S. A. de C. V. (seisa) son empresas completamente mexicanas, subsidiarias del Grupo generor. seisa cuenta con una amplia trayectoria en el área de la generación de energía “limpia” a través de proyectos de cogeneración.

La planta inició operaciones en el año de 2003 con un total de 465 pozos de extracción de biogás, distribuidos en un área de 100 ha y de los cuales se extraen 7800 m<sup>3</sup>/h.

- **Villa de Jühnde, Alemania**

La villa de Jühnde, cerca de Göttingen, Alemania, le ha suministrado a sus 850 habitantes, calor y energía mediante fuentes renovables desde 2005.

La villa cuenta con una unidad de biogás de 700KW. El calor se distribuye mediante una red de tuberías con una longitud de 5.5 Km de longitud. La fuente de biomasa para la planta de generación de biogás proviene en su totalidad de la misma villa, lo cual genera beneficios económicos adicionales. La biomasa proviene de 800 vacas y 1,400 cerdos de granjas. Igualmente el pasto, desechos de jardines y restos de cultivos también se usan para la generación de biogás (Seifried y Witzel, 2010).

- **Ribe, Dinamarca**

Existe una planta de biogás en la ciudad de Ribe, en Dinamarca, la cual es un ejemplo de planta cuya tecnología le permite el manejo de diferentes tipos de desechos. La planta está diseñada para convertir 110 millones de kilogramos de estiércol y 30 millones de kilogramos de otros desechos orgánicos en 100 TJ de biogás. El uso de biogás es para calefacción en los hogares y para actividades agrícolas y en los criaderos de animales. También se usan los residuos de la generación de biogás como fertilizante natural (Sørensen, 2011).

## **1.5 Protocolo de Kioto**

En 1992 la Conferencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Ambiente (mejor conocido como Cumbre de la tierra) se reunió en Rio de Janeiro, Brasil y adoptó el Marco de la convención del de las naciones unidas para el cambio climático<sup>6</sup>. En su artículo 2 se establecía el alcanzar una estabilización de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel en el que se previnieran efectos antropogénicos peligrosos para el clima. Desafortunadamente nadie fue capaz de determinar los niveles “peligrosos” de los cuales se hizo mención y por lo tanto ningún objetivo fue establecido. Este asunto, sin embargo, fue establecido para una nueva reunión en Kioto en el año de 1997, en el que las naciones industrializadas de Europa, Japón y EE.UU, se les demandaron reducir sus emisiones promedio de gases de efecto invernadero para el periodo 2008-1012. Las metas fueron fijadas con base en las emisiones históricas que tuvieron lugar en 1990, menos un porcentaje adecuado (Dell, y Rand, 2004).

No obstante a los objetivos establecidos, han surgido gran cantidad de problemas para realizarlos. Por ejemplo, para diciembre de 1999 las emisiones de gases nocivos de EE.UU, se habían incrementado en un 12% en comparación con los niveles de 1990. De igual forma y como era de esperarse, las naciones desarrolladas, encabezadas por EE.UU, han mostrado renuencia a acatar las metas establecidas.

---

<sup>6</sup> UNFCCC- por sus siglas en inglés

Lo anterior debido a que la presión de las compañías por modernizar su maquinaria y procesos de manufactura ha disminuido los alcances establecidos.

Para resolver este dilema, EE.UU y otras naciones industrializadas compran una gran cantidad de permisos de emisiones. Estos permisos son justamente derechos de propiedad que pueden ser vendidos y comprados. Las compañías siempre están a la expectativa de mejorar sus ganancias, por lo tanto estos permisos están diseñados para que las compañías y los gobiernos a los que les resulta demasiado caro modernizar sus sistemas productivos. En el protocolo se establecieron otros mecanismos de incentivar a las naciones y a las empresas para reducir sus contaminantes nocivos, para modernizar sus tecnologías por otras más limpias y para reducir los gases de efecto invernadero.

Lamentablemente está claro que hay muchos asuntos legales, políticos, económicos y tecnológicos que deben de solucionarse antes de que las metas sean alcanzadas y los mecanismos para la reducción de gases de efecto invernadero sean efectivos. Una forma más concreta para alcanzar la disminución de gases de invernadero es la de imponer impuestos muy elevados a todos los combustibles fósiles (Dell y Rand, 2004). Si las perspectivas sobre el cambio climático no mejoran, los impuestos a los combustibles fósiles parecen ser una medida eficaz para solucionar los problemas de alto consumo. Sin embargo debido a los recientes descalabros económicos por los que pasan las naciones, así como por el hecho de que las energías renovables aún requieren de una mayor penetración en la forma de vida de las personas, podrían surgir nuevos problemas y un des aceleramiento del desarrollo de las naciones, especialmente de las menos industrializadas.

## **1.6 Mecanismos de desarrollo limpio**

Es un incentivo económico para que las naciones en vías de desarrollo promuevan proyectos que eviten la emisión de gases de efecto invernadero y de esa forma otorgar créditos por la generación de los proyectos. Se intenta que el financiamiento de un proyecto limpio sea en parte pagado con los créditos otorgados por estos mecanismos para de esa forma hacer más atractiva la generación de este tipo de proyectos.

Estos permiten a los gobiernos de los países industrializados (también llamados países desarrollados o países del Anexo 1 del Protocolo de Kioto) y a las empresas (personas naturales o jurídicas, entidades públicas o privadas) suscribir acuerdos para cumplir con metas de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) en el primer periodo de compromiso comprendido entre los años 2008 - 2012, invirtiendo en proyectos de reducción de emisiones en países en vías de desarrollo

(también denominados países no incluidos en el Anexo 1 del Protocolo de Kioto) como una alternativa para adquirir reducciones certificadas de emisiones (RCE) a menores costos que en sus mercados.

En teoría, los MDL permiten una drástica reducción de costos para los países industrializados, al mismo tiempo que éstos se hacen de la misma reducción de emisiones que obtendrían sin los MDL. El MDL permite también la posibilidad de transferir tecnologías limpias a los países en desarrollo. Al invertir los gobiernos o las empresas en estos proyectos MDL reciben reducciones certificadas de emisiones RCE (uno de los tres tipos de bonos de carbono) los cuales pueden adquirir a un menor costo que en sus mercados y simultáneamente logran completar las metas de reducciones a las que se han comprometido.

Existen dos posturas, aquellos que argumentan que se podrían dar reducciones menores con los MDL y que incluso se podría caer en prácticas insostenibles en el largo plazo. Aquellos a favor argumentan que el control por parte de un tercero sobre el monitoreo de las reducciones de emisiones solucionaría el problema.

## **1.7 Bonos de carbono**

Otro de los medios con los cuales fomentar una reducción de gases de efecto invernadero y reducción de contaminantes, son los bonos de carbono. El desarrollo de instrumentos para financiamiento de bonos de carbono, por ejemplo el Banco mundial de Financiamiento de unidades de carbón, ha creado un mercado para el comercio de bonos de emisión de carbono. Esto, a su vez, ha promovido que inversionistas cambien a tecnologías enfocadas en la disminución de emisiones.

El banco mundial de emisiones de carbono utiliza los fondos aportados por compañías y gobiernos de países industrializados para comprar emisiones de reducción de gases de efecto invernadero en los países en desarrollo. Las reducciones de emisiones compradas por uno de los ocho fondos del banco. Todo esto establecido mediante el protocolo de Kyoto. El objetivo la unidad de financiamiento de carbono es catalizar un mercado global de carbono que reduzca los costos de transición de los países en vías de desarrollo, apoyar el desarrollo sustentable y facilitar el crecimiento en los países más pobres (WI, 2007).

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTOS**

#### **2.1 Máquinas térmicas**

Así se les denomina a las máquinas que tienen la finalidad de transformar la energía térmica en energía mecánica directamente utilizable. La energía térmica puede provenir de varias fuentes primarias: combustibles de varios orígenes, energía eléctrica, energía solar, energía nuclear.

El trabajo útil, que es el medio con el cual las máquinas térmicas generan aprovechan la energía para un uso, es realizado por elementos en movimiento alternativo, o que giran en movimiento rotatorio o bien directamente por el empuje producido por un chorro de gas. El movimiento de los elementos de las máquinas térmicas es generado por un fluido conocido como fluido de trabajo. El fluido realiza el trabajo gracias a variaciones de presión y de volumen que son consecuencias de la introducción de calor generado por la combustión. El fluido de trabajo actúa, por lo tanto, también como un vehículo de transporte de calor, porque lo introduce al motor en ciertos puntos del ciclo operativo y lo extrae en otros (Serrano, 2002).

##### **2.1.1 Máquinas de combustión externa**

Se les conoce así a las máquinas que realizan la combustión fuera del fluido de trabajo. En este tipo de máquinas, el calor es transmitido al fluido a través de las paredes de calderas (máquinas de vapor) o de otros tipos de intercambiadores (motores Stirling por ejemplo).

##### **2.1.2 Máquinas de combustión interna**

En estas máquinas el combustible se quema en el fluido mismo de trabajo de modo que los productos de la combustión entran también a formar parte de éste. Como la combustión se produce en el fluido de trabajo, el cual por tanto está parcialmente constituido por una mezcla de combustible y comburente y sufre después de una serie de transformaciones debidas a la reacción de combustión.

El aire participa como un comburente en la combustión del combustible introducido; recibe el calor producido alcanzando una temperatura elevada y después, transformado en gas de escape, sale al exterior a una temperatura más baja.

## **2.2 Clasificación de máquinas térmicas según el sentido de transferencia de energía**

Dependiendo del sentido de transferencia de energía, una máquina se puede clasificar como motora y generadora. Una máquina motora transfiere energía extraída del fluido de trabajo al ambiente en forma de trabajo mecánico, y una máquina generadora transfiere al fluido la energía recibida como trabajo del ambiente. Los motores de gasolina y diesel y todas las turbinas son máquinas motoras, y las bombas, ventiladores y compresores son máquinas generadoras (Golden y col., 1989).

## **2.3 Clasificación de máquinas térmicas según el principio de funcionamiento**

Una máquina térmica puede clasificarse en base a dos grupos:

- Turbomáquinas
- Máquinas volumétricas

### **2.3.1 Turbomáquinas**

En las turbomáquinas un elemento rotativo llamado rodete o rotor, causa cambios importantes en las componentes rotacionales de la velocidad (Golden y col., 1989). Permiten una transferencia energética entre un fluido y un rotor provisto de álabes o paletas, mientras el fluido pasa a través de ellos. La transferencia de energía tiene origen en un gradiente de presión dinámica que se produce entre la salida y la entrada del fluido en el rotor, por lo que también se denomina a estas máquinas de presión dinámica.

Las turbomáquinas se clasifican dependiendo, la dirección del flujo a través del rodete y según la forma del intercambio de energía entre el fluido y el rodete. En el flujo radial puro, el fluido pasa por el rodete en la dirección normal al eje de rotación. En el flujo axial puro, el fluido pasa por el rodete paralelo al eje de rotación. Cuando el flujo en el rodete ni es paralelo ni normal al eje se denota el flujo como mixto.

Cuando el fluido intercambia sólo su energía cinética con el rodete, la turbomáquina es de impulsión o reacción pura. En la máquina de impulsión no hay cambio de presión del fluido al pasar

por el elemento móvil. Por otro lado, cuando el fluido intercambia energía con el elemento rotativo mediante una caída de presión, la turbomáquina es de reacción pura (Polo, 1980).

### 2.3.2 Máquinas volumétricas o de desplazamiento positivo

En esta clasificación se incluyen no sólo a las máquinas de émbolo o máquinas alternativas, sino todas aquellas, incluso rotativas (motor Wankel, bomba o motor de lóbulos o engranajes), cuyo principio de funcionamiento es el principio de *desplazamiento positivo*. Según este principio, en las máquinas de desplazamiento positivo una cierta cantidad de fluido queda positivamente retenido durante su paso a través de la máquina, experimentando cambios de presión al variar el volumen del recipiente, y también por adición y sustracción de calor a la máquina térmica; pero sin que la variación del momento cinético del fluido juegue un papel esencial en la transformación de la energía. Por eso a estas máquinas se les llama estáticas (Mataix, 1973). Existe una cierta masa de fluido bien definida que evoluciona en la máquina en cada instante.

### 2.4 Rendimiento de las máquinas

- El rendimiento (eficiencia) puede definirse como el aprovechamiento de energía para realizar un trabajo. Existen diferentes tipos de rendimientos dependiendo del proceso que realicen. Para los moto generadores, el rendimiento de la máquina está dado por la relación que existe entre la potencia eléctrica efectiva y la potencia calorífica suministrada. Esto se expresa en la ecuación (2.1). Sin embargo, se sabe que la potencia es la cantidad de energía (ya sea en forma de calor, trabajo, etc.) que aplicada o recibida en una determinada cantidad de tiempo. De tal forma, que la eficiencia también se puede expresar como una relación entre la energía de salida del generador y la energía suministrada por el combustible al motor. Dicha relación se muestra en la ecuación (2.2)

$$\eta_e = \frac{\text{potencia eléctrica (KW)}}{\text{potencia calorífica suminitrada (KW)}} \quad (2.1)$$

$$\eta_e = \frac{\text{energía a la salida del generador (kWh)}}{\text{energía suministrada por el combustible al motor (kWh)}} \quad (2.2)$$

## 2.5 Ciclo de 4 tiempos

Como ciclo se entiende la sucesión de operaciones o fases, que el fluido activo cumple en el cilindro y repite con ley periódica. Un motor es de 4 tiempos cuando el ciclo se cumple en 4 carreras del pistón. Esto significa que los motores de 4 tiempos completan un ciclo cada 2 revoluciones del cigüeñal. Las cuatro fases del ciclo de 4 tiempos son:

- **Admisión de la carga al cilindro.**-El pistón en la carrera hacia el P.M.I<sup>7</sup> crea una aspiración del fluido hacia el cilindro. En la cámara de combustión se abre en el momento oportuno la válvula de aspiración para permitir la entrada de aire o de la mezcla gaseosa combustible. La válvula comienza a abrirse antes del inicio de la carrera y se cierra después que la carrera se ha completado.
- **Compresión.**-Cerrada la válvula de admisión, durante la carrera de regreso del pistón la carga es comprimida en la cámara de combustión hasta un valor máximo que alcanza en el P.M.S<sup>8</sup>. En ese momento el volumen de la carga se ha reducido a una fracción del volumen que tenía al comienzo de la carrera; esta fracción es el valor inverso de la relación volumétrica de compresión<sup>9</sup>.
- **Combustión y expansión.**- Poco antes del fin de la carrera de compresión se produce el encendido de la mezcla por medio de una chispa eléctrica, o bien el encendido espontáneo del combustible inyectado en la cámara de combustión, con el consiguiente repentino aumento de temperatura y de presión causado por el calor de la combustión. El valor alcanzado por la presión después del encendido es unas 2 entre 4 veces superior al que se tenía inicialmente, por lo que el pistón es empujado hacia el P.M.I. antes que la carrera de trabajo se haya completado comienza a abrirse la válvula de escape y los gases quemados, que aún están a una cierta presión, comienzan a salir del cilindro.
- **Escape.**- Durante su carrera de regreso hacia el P.M.S. el pistón expulsa los gases quemados a través de la válvula de escape (Giacosa, 1986).

---

<sup>7</sup> P.M.I-Punto muerto inferior. Posición del pistón más lejana a la cabeza del cilindro

<sup>8</sup> P.M.S-Punto muerto superior Posición del pistón más cercana a la cabeza del cilindro.

<sup>9</sup> Relación volumétrica de compresión ( $\varphi$ ) relación entre el volumen total del cilindro  $V_1$  y el volumen de la cámara de combustión  $V_2$ . Comúnmente se le conoce como relación de compresión.

Al final de la carrera, o poco después, se vuelve a cerrar la válvula de escape; mientras tanto se ha abierto nuevamente la de admisión y comienza un nuevo ciclo para continuar repitiéndose regularmente.

## **2.6 Combustibles**

Un combustible es básicamente una fuente de calor (Sarkar, 2009). El método usual para producir calor a partir del combustible es mediante un proceso de combustión el cual es una reacción química entre el combustible y el oxidante. En la gran mayoría de los casos, el aire es el oxidante, de igual forma se usa el oxígeno y otros químicos.

### **2.6.1 Diésel**

La base de los combustibles diésel son los primeros destilados de la parafina (Sarkar, 2009). El combustible diésel está compuesto de un 85% de carbono y un 15% de hidrógeno. Esa composición no es tan diferente que la composición de la gasolina, sin embargo, el diésel no se evapora tan fácilmente como la gasolina, por lo que es más idóneo para formar mezclas de aire y combustible. El calor requerido para la ignición del combustible está dado por las partículas más volátiles del mismo: su número cetano<sup>10</sup>. La temperatura de encendido del combustible es de más de 250°C. El diésel se utiliza en los motores de encendido por compresión (Bennett, 2010).

### **2.6.2 Gasolina**

La gasolina es el combustible líquido usado en los motores de combustión interna de encendido por chispa. Existen dos tipos diferentes de gasolina: para motores y para aviones.

1. La gasolina para motor es una mezcla de hidrocarburos con bajo punto de ebullición con un punto final de ebullición de 215°C. Se hace en las refinerías mediante la mezcla de diferentes sustancias. Se le añade butano (cerca de un 10%) para facilitar el encendido en motores fríos. A la gasolina comercial se le añaden aditivos tales como agentes anti golpeteo, antioxidantes y antiaglomerantes.

---

<sup>10</sup> Índice cetano - guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión, denominado "Intervalo de encendido"

2. La gasolina para aviones está caracterizada por un octanaje y una volatilidad más elevados. La gasolina de avión tiene, al igual que la gasolina de motor, agentes anti golpeteo y antioxidantes, sólo que en mayor cantidad.

### **2.6.3 Gas natural**

El gas natural es el más simple de los hidrocarburos, se identifica comúnmente con el metano  $\text{CH}_4$ , sin embargo contiene otros compuestos como alcanos,  $\text{H}_2\text{S}$ , y varios compuestos inorgánicos más (Berkowitz, 1997). Debido al sector eléctrico, el consumo de gas natural se ha incrementado de forma considerable desde las últimas décadas del siglo XX. Se estima que el consumo de gas natural crezca a un ritmo de 2.4% a nivel mundial hasta 2030. Con la disminución en las reservas de petróleo, el gas natural ha sido la respuesta a la demanda energética mundial, debido a que presenta una mejor disposición para su extracción, así como por la tecnología madura para su procesamiento. Otra de las ventajas del gas natural es su variedad de usos finales, ya que requiere de menos transformaciones para su uso en la industria o a nivel doméstico (Sarkar, 2009).

### **2.6.4 Gas L.P**

Los compuestos de propano ( $\text{C}_3$ ) y butano ( $\text{C}_4$ ) pueden ser licuados a temperatura ambiente y a presiones moderadas para su transporte en forma líquida en contenedores a baja presión. A esto se le conoce como gas licuado de petróleo (LP). En muchos países, se distribuyen mezclas de gas en las que los componentes mayoritarios son  $\text{C}_3$  y  $\text{C}_4$ . Los componentes que tienen mayoritariamente  $\text{C}_3$ , se manejan a presiones más bajas y se usan de forma directa en aplicaciones domésticas.

El gas embotellado, como también se le conoce, se hace con gas natural, gases de refinerías y otros compuestos aromáticos. El uso principal de éste gas es en aplicaciones domésticas. Esto debido a la gran cantidad de energía calorífica almacenada en un pequeño espacio y la capacidad para usarlo directamente en estufas y quemadores. En muchos países que no tienen red de gas para uso doméstico, el uso de gas embotellado es la mejor opción. También se usa en algunos vehículos que tienen motores de combustión interna. El butano y el butano también se usan para enriquecer las mezclas de gas natural (Sarkar,2009).

## CAPITULO 3

### CONVERSIÓN DE BIOGÁS A ENERGÍA ELÉCTRICA

#### 3.1 Sistemas de conversión de biogás a electricidad

El biogás, producto de la descomposición de diferentes tipos de biomasa, puede ser convertido en electricidad mediante diversos tipos de tecnologías. Durante mucho tiempo se han usado los motores de combustión debido a la capacidad de adaptarse al uso de biogás y de qué son muy comunes en otras actividades, sin embargo, recientemente se ha comenzado a usar otro tipo de sistemas de generación de electricidad. Específicamente el uso de turbinas ha sido estudiado para el uso de biogás, y a fechas más recientes, el uso de pilas de combustible, las cuales aún están en desarrollo.

Además, los sistemas de generación de electricidad con biogás también pueden ser adaptados para su aprovechamiento en otros sistemas energéticos. Por ejemplo los sistemas de cogeneración en los cuales se produce energía eléctrica y térmica a partir de un mismo combustible, lo cual permite una mayor eficiencia energética y aprovechamiento de energía. Entre las más utilizadas se encuentran: motores de combustión interna, generación de vapor para su uso en ciclo Rankine y turbinas.

- **Motores de combustión interna**

El biogás, como se ha mencionado, puede ser usado en los motores de combustión interna acoplados a un generador eléctrico.

Los motores adaptados para el uso de biogás requieren, sin embargo, de ciertas modificaciones para el uso de biogás. Principalmente debido a los requerimientos de robustez para hacer frente al tipo de gases empleados. Por ejemplo, se busca la eliminación de los componentes de bronce y acero en las líneas de gas, debido a la corrosión que genera. El biogás puede ser utilizado como cualquier otro gas combustible. Mezclas de biogás con aire en una relación de 1:20 forman un gas detonante altamente explosivo. Se debe tener cuidado con tuberías de gas en recintos cerrados que tengan fuga (Carmona y Orozco, 2003). Sin embargo, hasta ahora no se tiene conocimiento sobre explosiones peligrosas causadas por el biogás. Para su uso en motores el biogás debe de ser analizado y de esa forma adecuar los sistemas de generación de electricidad. Hay que recordar que los componentes del biogás varían dependiendo de la biomasa que lo origina. Los análisis de gas se realizan para la selección del motor a utilizar y la verificación del cumplimiento de las especificaciones (PSE PROBIOGAS, b, 2010).

- **Sistemas de generación mediante ciclo Rankine**

Otra de las tecnologías utilizadas para la generación de energía eléctrica con biogás es mediante el uso de vapor producido en un ciclo Rankine. El biogás es quemado en un calentador para producir vapor sobrecalentado. El vapor es usado para mover un generador-turbina de vapor, para la producción de energía. Los beneficios de la producción de energía usando el ciclo Rankine de la combustión de biogás, es la baja tasa de producción de calor. Otras de las ventajas de la combustión del biogás usando ésta tecnología es la eliminación del metano. Ésta tecnología es usada en los rellenos sanitarios, principalmente (Pérez y col., 1986).

- **Turbinas**

Una turbina de gas es un dispositivo capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica a través del acoplamiento de un generador en la flecha de la turbina (Siles, 2012). El uso de turbinas para la generación de energía eléctrica ofrece ventajas sobresalientes a otros medios de generación. Por ejemplo, mecanismo de trabajo y mantenimiento sencillo, se alcanzan picos de trabajo en poco tiempo y una alta eficiencia tanto en ciclo directo como en cogeneración. Además, las turbinas son versátiles en el tipo de combustibles que utilizan, y el biogás es uno de ellos. Aunque una turbina puede funcionar con biogás directamente, es necesario arrancarla utilizando otro gas con un poder calorífico más alto, o con un combustible distinto. Se debe tener en cuenta que la pérdida de potencia asociada a la capacidad calorífica resultará en una pérdida proporcional de potencia en la turbina y, en consecuencia, en la energía eléctrica desarrollada.

Existen dos tipos de turbinas para el uso de biogás como combustible: las turbinas convencionales y las microturbinas.

### **3.a) Turbinas convencionales**

Son turbinas diseñadas a partir de turbinas de gas L.P. o de gas natural. Debido a su elevado consumo de biogás, se usan en plantas de tratamiento de desechos o rellenos sanitarios. Prácticamente no cambia ningún aspecto del funcionamiento de la turbina a que sí se usara otro tipo de gas como combustible. Sin embargo, el biogás debe de ser purificado de la misma forma a que si se usará en un motor de combustión interna. Además, también se le debe de bajar la humedad para evitar corrosión en los álabes de la turbina. Aunque la eficiencia de las turbinas de biogás es relativamente alta en comparación con otros tipos de sistemas de generación, alcanzando entre 40 y 50% de eficiencia en ciclo

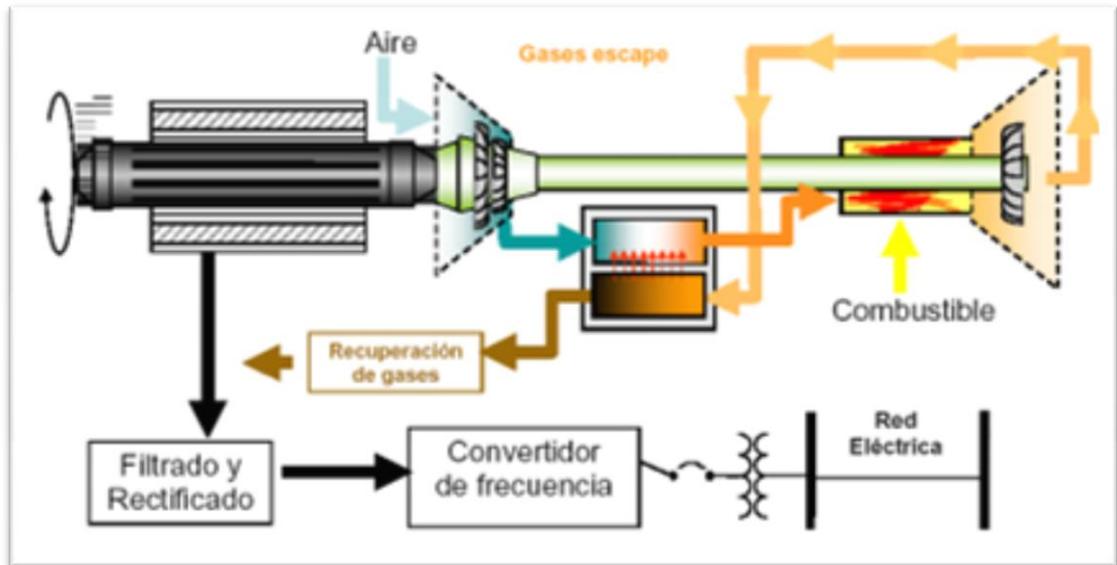
simple, comúnmente se usan en sistemas de cogeneración en dónde alcanzan eficiencias de hasta el 90%. Son capaces de producir de 1 a 6 MW de potencia (CONAE, 2008).

### **3.b) Microturbinas**

Las microturbinas son equipos muy similares a las turbinas convencionales, pero con algunas diferencias en el modo de funcionamiento. La principal diferencia es un ciclo de recuperación de calor para mejorar el rendimiento. El resto de las diferencias se encuentra en el sistema de transformación de energía mecánica a eléctrica, ya que no existe una transmisión mecánica que haga funcionar el alternador directamente, sino que el alternador funciona a alta frecuencia y la conversión se realiza mediante electrónica de potencia.

El rango de potencia eléctrica de las microturbinas está comprendido entre 30 y 200 kW, al tratarse de equipos modulares que pueden conectarse en serie son muy interesantes para aplicaciones en las que se dispone de pequeños caudales de biogás. Otra de sus características principales es que pueden trabajar con contenidos de metano tan bajos como de un 35%, lo que permite su aplicación en con gases pobres. Además, a diferencia de los motores de combustión interna, se trata de equipos que toleran contenidos elevados de ácido sulfúrico (hasta 70,000 ppm), otro aspecto que las hace muy adecuadas para trabajar con gas procedente de la degradación.

En el funcionamiento de la microturbina el aire es aspirado y tras pasar por un filtro de partículas se comprime. A continuación, se hace circular por un intercambiador de calor donde se absorbe parte de la energía de los gases de escape. Una vez en la cámara de combustión, se realiza la inyección de biogás y se produce la combustión de la mezcla. A diferencia de los motores de gasolina o diésel, las turbinas necesitan una presión de entre 3 y 5 bar para ser inyectado en la cámara de combustión. Los gases calientes producto de la combustión se expanden en la turbina, que al girar mueve el alternador eléctrico y el compresor. Los gases de escape expandidos se hacen circular por el intercambiador de calor. En la Figura 3.1 se muestra el funcionamiento de una microturbina (*PSE PROBIOGAS, 2010 d*). Otra de las ventajas de las microturbinas con respecto a otras tecnologías es que, debido a sus elevadas revoluciones, no requiere de sistema de lubricación y por lo tanto su mantenimiento es mínimo.



**Figura 3.1** Funcionamiento de una microturbina de biogás (PSE PROBIOGAS, 2010d)

### 3.1.1 Nacionales

En México, la producción de energía eléctrica mediante el uso de biogás ya se ha desarrollado de manera satisfactoria en algunos lugares. Las tecnologías que se usan para la producción de energía con biogás son, principalmente en granjas y rellenos sanitarios. En muchos casos se hace uso de programas e incentivos para la implementación de energías renovables, los cuales, ayudan a que los proyectos sean más rentables para su implementación. Sin embargo, existen muchos sitios en los que un potencial de generación eléctrica sigue latente. En especial en los rellenos sanitarios y en los sistemas de generación a pequeña escala para comunidades rurales como es el caso de la India y China, ya que el territorio nacional, así como las condiciones sociales y de infraestructura de buena parte de la población hacen propicia la implementación de sistemas de aprovechamiento del biogás. México, aún a pesar de los cambios demográficos que se han dado en los últimos 50 años, continúa siendo un país con una presencia rural muy importante. Eso y el hecho de que las actividades humanas de un gran sector de la población siguen sucediendo en torno al campo, ya sea para la ganadería o para la agricultura, permite que la implementación a una escala importante de sistemas renovables de energía, en éste caso, de uso de biogás, sea algo prometedor. Algunos de los sistemas de generación de energía eléctrica mediante biogás, en México, son los siguientes:

- **Salinas de Victoria, Nuevo León**

Nació como un proyecto demostrativo promovido por la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol) para la captura y destrucción de las emisiones de metano del relleno sanitario de Salinas Victoria, Nuevo

León, donde se deposita la basura de los municipios conurbados con la ciudad de Monterrey. Es el primer proyecto de generación de electricidad con biogás de un relleno sanitario en México y Latinoamérica, tiene una capacidad nominal de 8 MW y fue inaugurado el 22 de septiembre de 2003.

El proyecto se hizo acreedor a un financiamiento de cinco millones de dólares por parte del fondo mundial para el medio ambiente gestionado a través del Banco Mundial. El objetivo de esta subvención es cubrir los costos incrementales que representa la introducción de una nueva tecnología y ayudar a remover algunas de las barreras mencionadas anteriormente.

- **Montemorelos, Nuevo León**

La Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) a través del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), desarrollaron, en el municipio de Ana Margarita, en Nuevo León, un proyecto piloto integral de aprovechamiento de energías renovables para el beneficio de granjas porcinas. El proyecto fue diseñado para que los productores locales se pudieran beneficiar mediante el uso de las excretas de los cerdos para la generación de biogás y su posterior uso. Aunque el biogás generado se utiliza en forma directa para la calefacción en los cuartos con lechones y animales destetados, también se usa para la generación de electricidad mediante un motor y un generador.

En la granja se implementó un motor acoplado a un generador para producir energía eléctrica para las instalaciones de la granja. Este tipo de motores-generadores tienen una potencialidad de generación de energía eléctrica mensual 43,200 KW/h (60 KW x 24 horas x 30 días). Lo que en teoría implica que para utilizar esta capacidad, debe tener una alimentación constante del combustible para mantener su operación. Estos motores tienen un nivel promedio de consumo de de biogás de 22 m<sup>3</sup>/hora. Partiendo de la hipótesis de que el motor trabaje las 24 horas, para dichos niveles de consumo de biogás, se requiere una fuente de abastecimiento mínima de 528.03 m<sup>3</sup>/día de biogás o bien 15,841.00 m<sup>3</sup>/mes. Esto significa que para aprovechar el potencial de este tipo de moto generadores, el digestor debe tener una producción diaria de biogás que por lo menos tenga esa cantidad. La granja tiene una capacidad de 20500 m<sup>3</sup>/día, por lo que sobradamente se genera el biogás necesario para el consumo del motor funcionando ininterrumpidamente. De tal éxito fue la implementación del motor para generación de energía eléctrica que el mismo sistema se replicó posteriormente en Guanajuato, Puebla, Yucatán y Jalisco (SEMARNAT, 2007).

- **Delicias, Chihuahua**

Agrícola Ganadera Los Luján, empresa dedicada a la crianza de ganado, producción de leche y venta de forraje, cuenta con una planta de generación de biogás que se considera la más grande de América Latina en su tipo. La empresa cuenta en total con 14,500 vacas, lo que implica una alta generación de desperdicios y demanda energética. Para aprovechar estos desperdicios se recurrió a la implementación de un sistema de aprovechamiento de biogás, el cual se destina a la generación de energía eléctrica usando un motor de combustión interna. La generación de energía eléctrica de la planta es de 1000 KW mientras que el consumo interno es de apenas 350 KW, así que el excedente de producción se vende a la Comisión Federal de Electricidad (Núñez, 2009).

### **3.1.2 Internacionales**

Aunque por mucho tiempo se mencionó que el uso de energías renovables a partir de la biomasa podría beneficiar, principalmente a países en vías de desarrollo, la verdad es que muchos países industrializados han puesto gran atención en éstas tecnologías por los beneficios económicos y sociales que presentan. El aumento de los precios de los combustibles fósiles, en especial del petróleo, han motivado aún más el uso de dichas tecnologías.

Como ejemplo, Alemania, en donde existen más de 4,000 plantas de biogás siendo la mayoría de ellas pequeñas, es decir, con una potencia instalada comprendida entre 50 y 500 kW y con una potencia eléctrica instalada total de unos 1,500 MWh. Esto supone una creación de 10,500 puestos de trabajo y una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, de 6.4 millones de toneladas en el año 2007. En las plantas de biogás alemanas, más del 75% de los sustratos empleados están formados por cultivos energéticos (silo de maíz, cereal, ensilado de hierba...), los cuales presentan unos elevados rendimientos de producción de metano. Por otra parte, el negocio del biogás en Alemania está mucho más desarrollado debido a las elevadas primas y retribuciones de venta de la energía eléctrica (existen primas por el uso de cultivos energéticos). Asimismo, también se incentiva económicamente la incorporación del biogás ya depurado, es decir biometano (biogás con más del 97% de metano), a la red de gas natural (Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

Otro factor detonante del uso de tecnologías renovables es la poca estabilidad económica de muchos países en los que es imperante depender cada vez menos de un factor tan variable como lo son los barriles de petróleo. Algunos ejemplos de los sistemas de conversión de biogás a energía eléctrica en el mundo son los siguientes:

- **Masterton, Nueva Zelanda**

En una granja de cerdos, localizada en el extremo sur de la isla norte en Nueva Zelanda, se instaló en 1995, una planta de biogás para resolver los problemas asociados a los desechos de los cerdos, los cuales habían sido reglamentados para su tratamiento apropiado. Las excretas de 6000 cerdos son separadas, de tal forma que los sólidos y los líquidos se separan con el fin de maximizar la eficiencia del proceso.

Los sólidos entran en el primero de dos tanques el cual es calentado a una temperatura de 35°C. Luego de catorce días, salen del tanque y se envían al otro tanque de menores dimensiones, en el cual, luego de unos cuantos días de residencia, los lodos residuales son extraídos y separados para su uso como nutriente para pastura. Por otra parte, los líquidos separados al inicio del proceso, se envían a otro tanque en el cual, luego de ocho días, se mandan al sistema de riego para cumplir el mismo propósito que los sólidos. El biogás que se produce es almacenado, inicialmente en una bolsa flexible que sirve como almacén intermedio previo a un lavado. Posteriormente el gas es enviado periódicamente a un cilindro. Para el último paso se utiliza un compresor. El gas comprimido es usado para alimentar un motor Caterpillar el cual genera 190 kWe, el cual genera la mitad de la energía consumida en la planta.

- **Perth, Australia**

Existe una planta de tratamiento de aguas residuales localizada en el oeste de Australia. Dicha planta se encarga del tratamiento de las aguas negras de cerca de 600,000 personas. Aproximadamente al día se reciben 125,000 m<sup>3</sup> de agua los cuales inicialmente pasan por filtros para la remoción de objetos grandes, mientras que los demás restos sólidos se depositan en un tanque. En ésta parte del tratamiento de las aguas, cerca del 55% de los sólidos se depositan como lodos. El resto de los desechos se mandan hacía el mar a lo largo de una tubería de 20 km de largo. Los sólidos que no se mandan al mar se transportan a dos digestores que tienen una altura de 38 m de alto y una capacidad de 8,000 m<sup>3</sup> conocidos como “huevos”.

Los sólidos se inyectan a los digestores por la parte inferior a una velocidad de 3m<sup>3</sup> cada 5 minutos. Esto, con la intención de no sobrecargar los digestores. A su vez, existe una recirculación de la carga en los digestores con el fin de mantener activas a las bacterias que dan paso al biogás. Los dos digestores se mantienen a una temperatura controlada de 36°C para mantener a las bacterias vivas.

La forma de los digestores se pensó de tal manera que no existan puntos en los que no se mezclen bien las bacterias, además de que permite una distribución uniforme en el sistema de control de

temperatura. En la Figura 3.2 se muestra uno de los digestores de la planta de tratamiento. Se observan las tuberías que van hacia la parte superior del digestor son para la recirculación y para la captación de biogás, mientras que la que corre a lo ancho del diámetro es para la inyección de materia orgánica al digestor.



*Figura 3.2 Uno de los digestores de la planta de Perth (Sims, 2002).*

El tiempo de residencia en el digestor es de 26 días aunque puede estar tan sólo 20 días en caso de una demanda excesiva. El biogás producido se envía a un contenedor de 3000 m<sup>3</sup> a presión constante y de ahí se purifica para extraer el H<sub>2</sub>S para así enviarse, finalmente a dos motores Waukesha de 16 cilindros en “V” de combustión interna. Cada uno de los motores genera 600kWe a un voltaje de 415 V el cual, posteriormente, se eleva hasta los 22 kV para ser enviado a la red eléctrica (Sims, 2002).

### **3.2 Ejemplo de la conversión de motores de diferentes combustibles a biogás**

Los motores de combustión, ya sean de gasolina o diesel, pueden modificarse de tal forma que puedan usar biogás. La ventaja del uso de biogás en los motores de combustión interna, radica en su capacidad para realizar la conversión entre los combustibles de funcionamiento, además de que sus refacciones tienen una alta disponibilidad. Los motores de gas también pueden usarse para utilizar biogás como combustible ya que estos son, básicamente, modificación de motores de gasolina o diesel.

Para realizar una conversión en los motores de combustión interna se tiene a continuación la descripción de cómo realizar dicha conversión.

### ○ **Motores de gasolina**

El motor a gasolina puede ser operado con biogás realizándole una adaptación, que consiste en colocar, entre el filtro del aire y el carburador, una sección “T”, que sirve de mezclador y por donde se suministra el gas al motor. Se deben, también, hacer las siguientes adaptaciones al motor:

- Evitar el paso de gasolina cuando el motor está operando con biogás. Esto debido a que el motor podría “ahogarse” o generar un consumo indeseado de combustible. Para evitar el paso de gasolina se coloca una válvula en la línea proveniente del depósito.
- Se debe de garantizar un flujo de biogás a presión constante.
- No se debe de remover el filtro de aire y éste debe de permanecer limpio con el fin de mantener una mezcla de aire constante para un adecuado funcionamiento del motor.
- Colocar una válvula para la admisión de gas al mezclador.

Al ser alimentado con biogás, directamente al múltiple de admisión el motor no permite una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe de realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión. Al aumentar la carga del motor, se debe de aumentar el flujo de biogás al mismo. Para el caso de cargas variables, el flujo de gas hacia el motor se debe regular con un sistema de control especialmente diseñado, que garantice que el flujo del gas que se inyecte en el motor pueda responder a las diferentes demandas de potencia debido a las variaciones de carga eléctrica, provocada por el constante entrar y salir de cargas.

### ○ **Motores diésel**

Los motores a diésel, se pueden operar con una sustitución del diesel por biogás hasta un 70%, y un consumo de diésel del 30% restante por lo que el motor no sufre ninguna alteración al consumir los dos tipos de combustible al mismo tiempo. Para realizar estas adaptaciones se debe de colocar una “T” entre el filtro y el sistema de admisión del aire, donde se conecta la tubería del biogás. Se debe de instalar una válvula en esta tubería para regular el suministro del biogás y ajustarlo al porcentaje requerido de operación.

En estos motores la mezcla de diésel y biogás se realiza directamente en la cámara de combustión del motor. Cuando el motor recibe el biogás por la entrada de aire, este se acelera, por lo que el

governador de la bomba de inyección reduce la cantidad de diésel suministrado a la cámara de combustión, logrando una estabilidad en la aceleración y potencia del motor. Estos motores soportan las variaciones de carga sin tener que operar la válvula de regulación del biogás, permitiendo operar en un rango más amplio de carga.

Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diésel, una vez arrancado el motor se realiza la transferencia de biogás gradualmente, hasta alcanzar el 70%. No es recomendable la sustitución mayor a un 70% de biogás debido a que puede dañar el motor (Ramírez, 2004).

### **3.3 Conversión de motores usados en el transporte urbano de gasolina a gas natural**

En la actualidad es común que muchos vehículos utilicen fuentes de combustible alternativas a la gasolina o al diésel. Lo anterior, en parte, debido a los elevados costos de la gasolina y el diésel, y por otro lado, debido a los beneficios que implica el uso de combustibles alternos como son los beneficios económicos en algunos lugares por la implementación de motores con bajas emisiones de contaminantes.

El caso de Brasil es un ejemplo de una sustitución a gran escala de combustibles para el funcionamiento de los vehículos. En su caso, los combustibles usados mayoritariamente son los provenientes del alcohol, lo cual repercute en beneficios económicos y ambientales.

En el caso de los combustibles gaseosos, las ventajas de su uso también se aprecian en su costo y en la cantidad de vehículos en los que se pueden implantar los combustibles de éste tipo. Los combustibles gaseosos que se usan para los sistemas de vehículos son, gas L.P. vehicular, y de gas natural vehicular (GNV). El GNV, sin embargo, es más utilizado que el gas L.P. y son distintos en el aspecto de que el GNV tiene una composición de cerca del 95% de metano. Mientras que el gas L.P. vehicular es un compuesto de butano y propano con un elevado contenido de humedad, lo cual disminuye la vida útil del motor.

Al tener una composición mayoritaria de metano, las conversiones en los motores para el uso de GNV pueden ser las mismas que para biogás purificado y comprimido. Un vehículo al que se le pretende realizar una conversión, normalmente (aunque con notorias excepciones) ya ha tenido una vida de servicio usando gasolina exclusivamente. Lo anterior es debido a que los dueños de los vehículos, principalmente de transportes concesionados, no consideran que el gasto de una conversión de gasolina a GNV sea necesario en los primeros años de vida de un motor. Sin embargo, los vehículos, una vez que se

ha implementado la conversión a GNV, pueden seguir utilizando gasolina. A esto se le conoce como sistema dual.

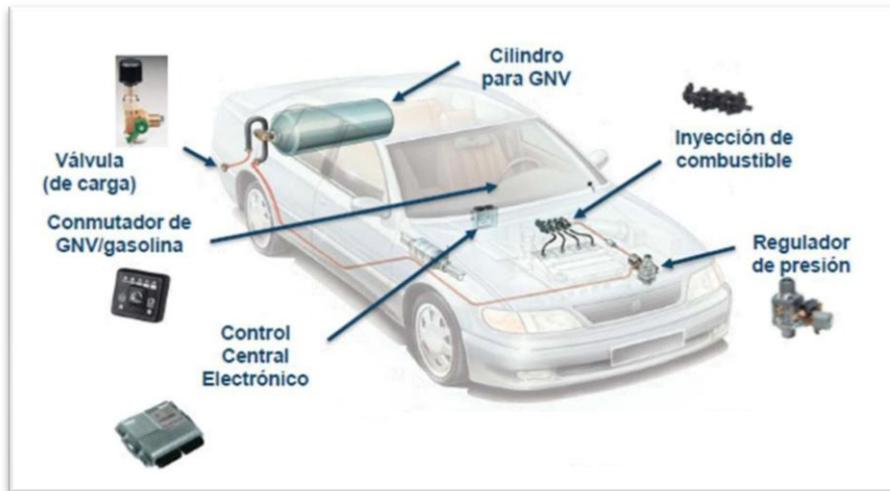
Para la conversión de un motor para su uso a GNV se deben de satisfacer dos requerimientos:

- Adecuada compresión del motor, la cual se logra si el motor está en buen estado.
- Un sistema eléctrico sin fallas.

Al cumplir éstos requerimientos se puede proceder a la conversión del motor. La conversión consiste principalmente en la implementación de un sistema de admisión de gas a los cilindros y la instalación de los componentes de almacenamiento y distribución. A continuación los elementos que componen un sistema de funcionamiento con GNV:

- **Cilindro de almacenamiento.-** Contiene al GNV a alta presión (3,000 PSI), es blindado.
- **Tubería de cobre.**
- **Regulador de presión.-** Hace disminuir la presión proveniente del tanque a una presión cercana a la atmosférica.
- **Conmutador.-** Sirve para controlar el combustible que ingresa al motor, ya sea gasolina o GNV.
- **Inyectores.-** Se encargan de introducir el gas en los cilindros
- **Válvula de carga.-** Es donde se carga el gas en las estaciones de servicio.
- **Emulador electrónico.-** Dispositivo que le permite al vehículo seguir trabajando con GNV sin sufrir problemas en las computadoras o sistemas electrónicos.

En la Figura 3.3 se muestran algunos de los elementos que se añaden para el uso de GNV en un automóvil.



**Figura 3.3** Elementos que componen el sistema de funcionamiento de un motor con GNV  
(ABAgas, 2006)

El uso de GNV implica ahorros entre 25 y 40% con respecto a gasolinas de bajo octanaje, además de que los servicios y cambios de bujías se reducen. El aceite, cuando el motor trabaja con GNV no tiene el desgaste que cuando usa gasolina. También, el uso de sistemas de GNV es más seguro que el usar gasolina ya que al existir una fuga, el gas inmediatamente se libera a la atmósfera debido a su densidad y a válvulas de seguridad que existen en los tanques de almacenamiento que se abren al existir una fuga.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS**

#### **4.1 Caso de estudio**

En las instalaciones de Ciudad Universitaria se encuentra la cafetería, El Cibarium, localizada a un costado de la Facultad de Ingeniería y a medio camino de ésta con la Torre de Ingeniería. En dicho establecimiento se vende comida “corrida” de lunes a viernes, generando una cantidad considerable de desechos orgánicos. Normalmente los desechos, como en cualquier otro establecimiento de bebidas y alimentos preparados, serían separados entre orgánicos e inorgánicos para, de ahí, ser enviados a los recipientes de recolección de basura y finalmente a su disposición final en un tiradero o relleno sanitario.

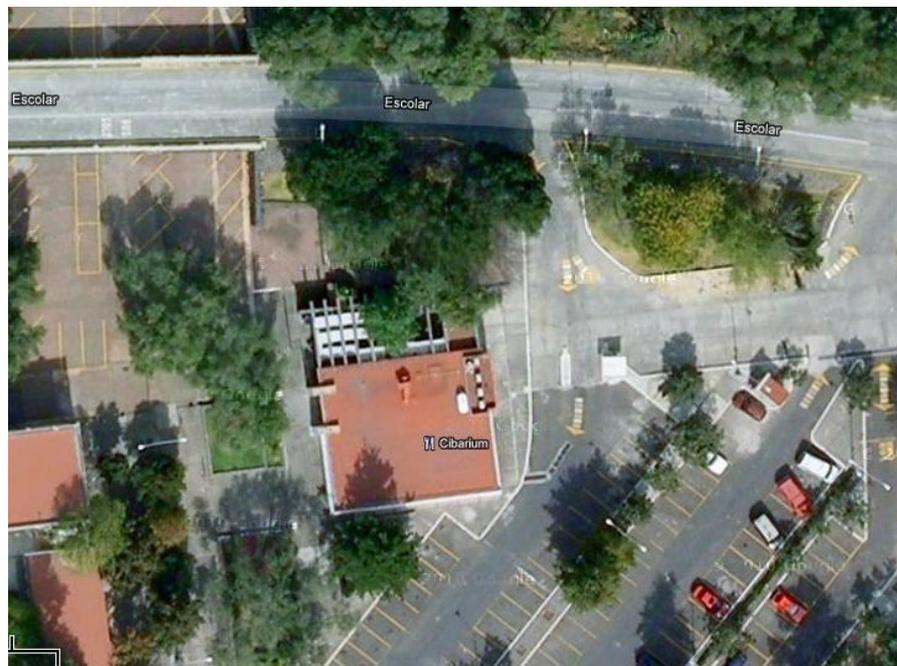
Sin embargo, se construyó una planta en la cual los desechos de comida y materia orgánica se transforman en biogás. El biogás generado puede ser utilizado para dos fines:

- Combustión directa en quemadores. Los alimentos se sirven, tanto en el interior de la cafetería, como en el exterior, ya que es ahí donde los consumidores eligen los guisados de su preferencia. Para mantener la temperatura de los alimentos en la parte exterior de la cafetería se usan calentadores que funcionan con vapor de agua, por lo que se requiere de una fuente de gas para los calentadores. La planta de biogás tiene conexiones hacia los calentadores. De esa forma se puede usar el biogás de la planta de forma directa en los calentadores.
  
- Uso del biogás en un moto-generador. Como se mencionaba anteriormente, la producción de biogás trae consigo componentes indeseables, principalmente el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S. Este último es particularmente dañino para las instalaciones de la planta, además de que resulta nocivo para la salud. Respecto al uso de biogás en el motor, si el H<sub>2</sub>S alcanza el mismo, producirá, más que afectaciones en el rendimiento, un desgaste en los componentes metálicos los cuales afectan gravemente el comportamiento del mismo, disminuyendo dramáticamente su vida útil. La planta de biogás, sin embargo, cuenta con un sistema de retención de H<sub>2</sub>S el cual hace posible la instalación del motor y un generador eléctrico para la producción de energía eléctrica mediante biogás. El moto-generador puede funcionar de forma independiente a los calentadores de comida los cuales también están acoplados a las instalaciones de la planta, por lo que es viable su instalación sin afectar otros usos de la planta de biogás. Con el motor en funcionamiento se podría generar parte de la energía eléctrica de la planta o de la cafetería. Además, el uso de un motor que consume biogás como

combustible, es una manera responsable de manejar los desechos, que de otra forma, terminarían en un tiradero o convertidos en gases nocivos para la salud humana y el medio ambiente.

#### **4.1.1 Planta de biogás en restaurante de Ciudad Universitaria**

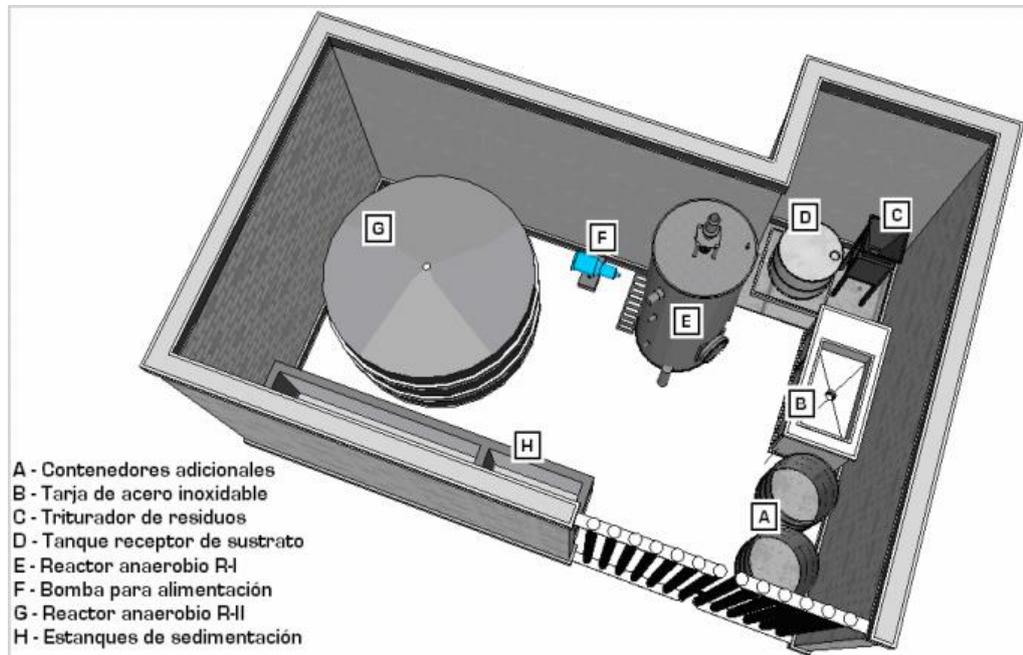
La planta de biogás de la cafetería está compuesta de diferentes equipos, los cuales, en conjunto, son utilizados para la recepción y procesamiento de los residuos comestibles, así como para la generación, almacenamiento, purificación y control del biogás generado. La planta se localiza en un espacio posterior a la cafetería. Está separada de la cafetería por un muro de tal forma que, desde el interior de la cafetería, no hay forma de acceder a la planta. Para entrar se debe de ingresar por la misma planta la cual tiene su acceso a un costado del estacionamiento de entrenamiento de futbol americano. En la Figura 4.1 se aprecia una vista aérea de la cafetería y su ubicación.



**Figura 4.1** Cafetería El Cibarium

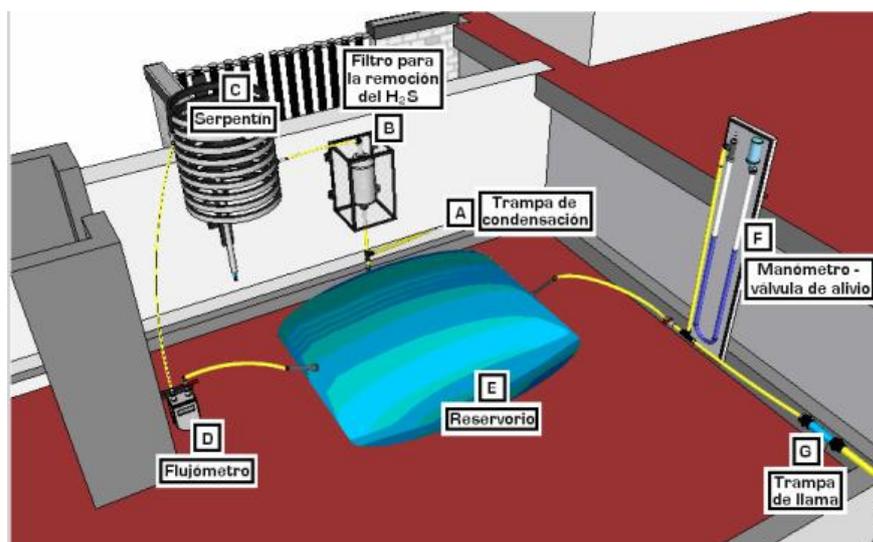
Los equipos que se utilizan en la planta de biogás están distribuidos, tanto en el interior de la planta, como en el techo de la cafetería. Lo anterior es debido a que la planta de biogás no cuenta con un techo de cemento ya que para la instalación de los contenedores y el mantenimiento del motor del mezclador se requiere trabajar sobre el mismo. Además, sobre el techo de la cafetería existe la posibilidad de acceder más fácilmente, y es mayor la cercanía a los quemadores. En la parte inferior de la planta se encuentra, los contenedores de biomasa, una tarja, el triturador de alimentos, un tanque receptor de sustratos, una bomba y los estanques de sedimentación. En la Figura 4.2 se puede observar la

disposición de los equipos en el área de la planta. Los otros equipos se localizan en el techo de la cafetería como se verá más adelante.



*Figura 4.2 Equipos de la planta de tratamiento (Juárez, 2012)*

A su vez, en el techo de la cafetería se encuentra el condensador, condensador, el purificador, el medidor de gas, las bolsas de almacenamiento de biogás, el manómetro de agua y la válvula anti retorno. Su disposición es tal y como se muestra en la Figura 4.3.



*Figura 4.3 Equipos para el almacenamiento y manejo de biogás (Juárez, 2012)*

Para su funcionamiento, la planta cuenta con las siguientes operaciones unitarias:

- **Triturador de alimento.** Los residuos que se mandan al digestor son todos aquellos que quedan en los platos de los consumidores, así como los residuos de la preparación de la comida. Muchos de los residuos son cáscaras duras y podrían atorarse en la tubería o en el digestor. Por lo mismo, todos los alimentos que se usan para la generación de biogás tienen que triturarse antes de iniciar el proceso de generación de biogás. El triturador funciona con un motor eléctrico y es el primer paso para la generación de biogás en la planta. En la Figura 4.4 se muestra el triturador de la planta.



*Figura 4.4 Triturador de alimento (Juárez, 2012)*

- **Tanque digestor.** Depósito de 6 m<sup>3</sup> de volumen en el que entran los alimentos después de pasar por el triturador. En el tanque se deposita la comida y se mezcla con agua para que el proceso de la generación de biogás inicie. Aquí los residuos se quedan antes de pasar al tanque de almacenamiento. Este tanque está construido con acero inoxidable y fijado en el suelo de las instalaciones. En la Figura 4.5 se aprecia el tanque digestor.



*Figura 4.5 Tanque digestor (Juárez, 2012)*

- **Mezclador.** Consiste en un motor eléctrico que está situado en la parte superior del tanque fermentador. En su eje de trabajo se acopla un juego de aspas que van dentro del tanque fermentador y mezclan los desperdicios con agua. El mezclador, aunque de gran potencia, funciona a bajas revoluciones por minuto para evitar afectar a las bacterias que inician el proceso de generación de biogás.

- **Condensador.** Después de pasar por el tanque de almacenamiento, el gas, ya separado del resto de los desechos de comida y agua, pasa por mangueras localizadas en la parte superior del tanque mencionado y llega al condensador, colocado en la azotea de la cafetería. El condensador es un tubo de acero inoxidable de ½” en forma de resorte (serpentín) por el cual, al paso del gas, se “atrapan” los condensados que aún vienen con el gas. El condensador está colocado en forma vertical como se puede apreciar en la Figura 4.6 para que el condensado se pueda extraer por la parte inferior del serpentín.



*Figura 4.6 Condensador (Juárez, 2012)*

- **Purificador.** El biogás está compuesto principalmente por metano, sin embargo, tiene contenidos de otras sustancias como el azufre en forma de ácido sulfhídrico. Esto genera problemas en las mangueras, válvulas y principalmente en el motor, por lo que se usa un purificador con la intención de retener los elementos que pueden causar daños. El purificador consta de varias piezas de óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) parecidas a resortes en las cuales, al pasar el ácido sulfhídrico, se retiene de forma que no alcance secciones más avanzadas en la tubería, especialmente al motor y los quemadores de las estufas. En la Figura 4.7, parte del purificador.



*Figura 4.7 Rollos de óxido férrico del purificador (Juárez, 2012)*

- **Medidor de flujo de gas.** Instrumento de medición que mide el volumen de gas generado en la planta. En la Figura 4.8, el medidor de gas con las tuberías ya conectadas.



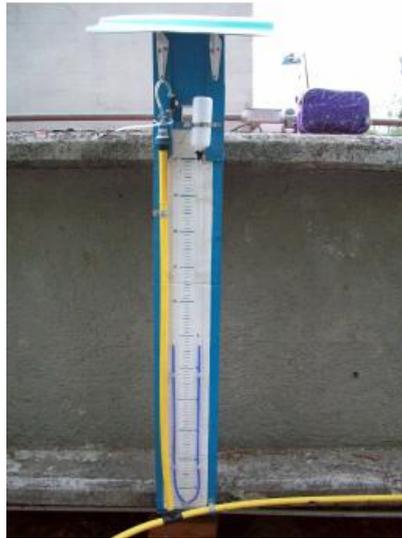
*Figura 4.8 Medidor de gas (Juárez, 2012)*

- **Bolsas contenedoras de biogás.** Al no ser requerido el biogás de forma permanente, se utilizan bolsas de PVC o de polietileno en las que se va depositando el biogás generado. En los extremos de las bolsas hay válvulas para retener o hacer que el gas siga fluyendo. En la Figura 4.9 se aprecia una bolsa de polietileno cargada de biogás.



*Figura 4.9 Bolsa contenedora de biogás (Juárez, 2012)*

- **Manómetro.** Instrumento usado para medir la presión de biogás a la salida de las bolsas. Es un manómetro de columna de agua. En la Figura 4.10 se aprecia el manómetro de agua con las conexiones que vienen del sistema de las bolsas de almacenamiento de biogás.



*Figura 4.10 Manómetro de agua (Juárez, 2012)*

- **Válvula anti retorno.** Es una válvula de seguridad que impide que el gas regrese en dirección al digester. Esto con la finalidad de que una flama no alcance el digester generando un accidente. En la Figura 4.11 se observa la válvula anti retorno con todos sus componentes



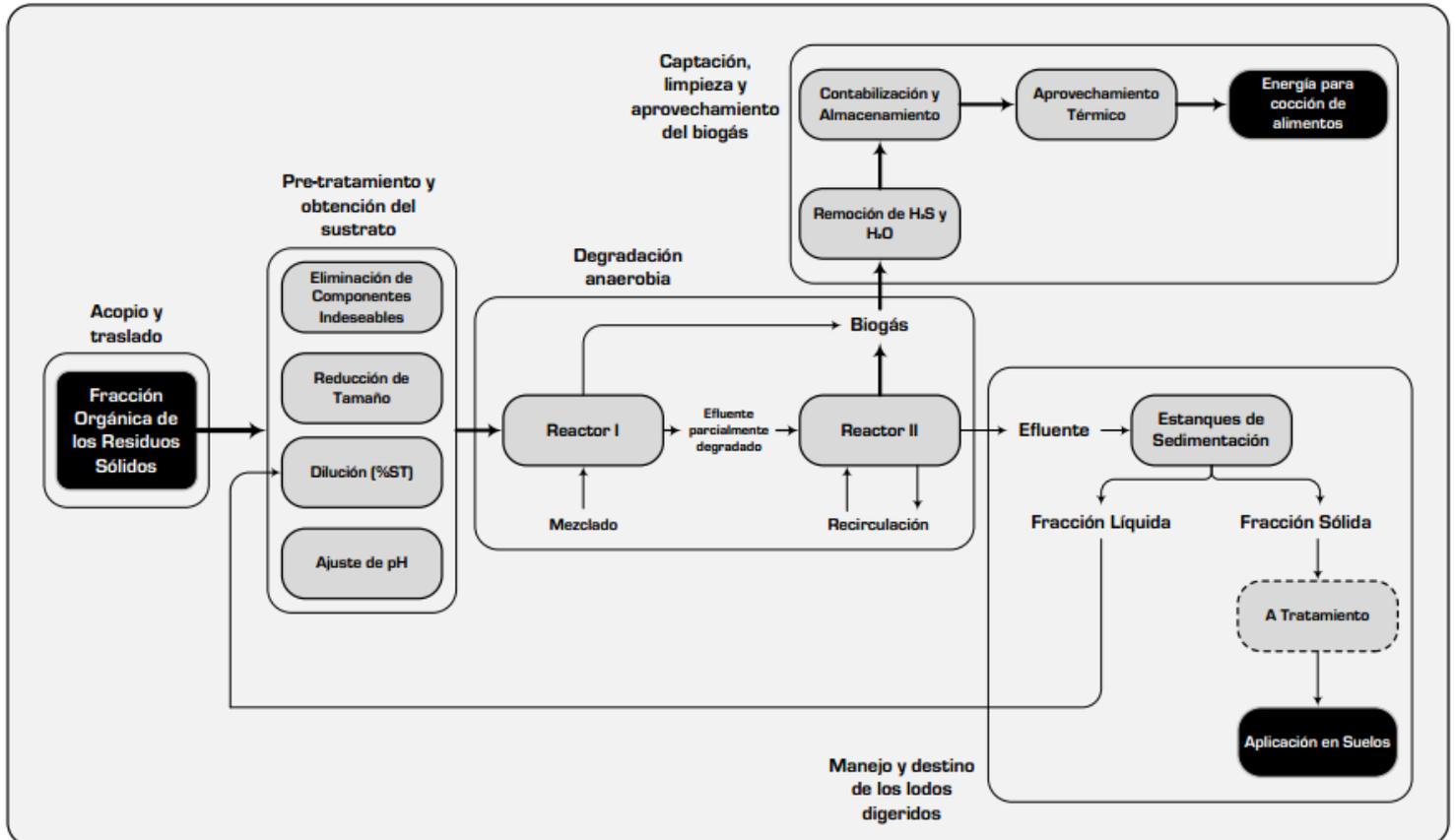
*Figura 4.11 Componentes de la válvula anti retorno (Juárez, 2012)*

- **Pileta de composta.** Construida con cemento, es un contenedor de los lodos digeridos que salen del tanque digester. De aquí se requiere de un vehículo que extraiga esos lodos para su disposición final.

La planta no tiene un sistema de calefacción para los tanques, por lo cual, el tiempo de retención de los desechos varía con respecto a la temperatura ambiente. Mientras más baja sea la temperatura, el mayor tiempo de retención aumenta.

## 4.1.2 Diagrama de flujo de los componentes y procesos en la planta de biogás de la cafetería El Cibarium

La secuencia de procesos realizados para la producción de biogás mediante residuos comestibles en la cafetería El Cibarium está dada mediante los componentes presentados en el apartado anterior. El flujo, a su vez, se muestra en la siguiente figura.



*Figura 4.12* Secuencia de tratamiento en la planta de biogás (Juárez, 2012)

Para la realización del proceso es necesario recolectar de forma manual los restos de alimentos, los cuales son transportados hacia el punto de acopio. Posterior a eso inicia el tratamiento de los residuos, aunque en este punto el transporte de la biomasa se realiza mediante una bomba la cual se encarga de realizar la distribución de la biomasa a lo largo de las diferentes etapas de de la producción de biogás. Una vez que el biogás se produce, este se trasporta utilizando tuberías elevadas en las cuales se impide un transporte indeseado de condensados.

El motor propuesto para el uso de biogás se colocaría en la etapa final del proceso. En el diagrama de la figura 4.12, estaría colocado en el apartado que dice “Aprovechamiento térmico”. Y es justo en ese lugar donde se colocaría, debido a que es ahí donde el biogás se encuentra lo más limpio posible de contaminantes. A continuación se presenta un diagrama de flujo con los procesos ideales para la planta, el cual difiere ligeramente del proceso establecido originalmente en la planta. Los cambios

radican, además del evidente uso del motor para generar energía eléctrica, principalmente en el triturado, la residencia e ingreso de material en el segundo reactor y en la compresión que recibe el biogás antes de entrar al motor.

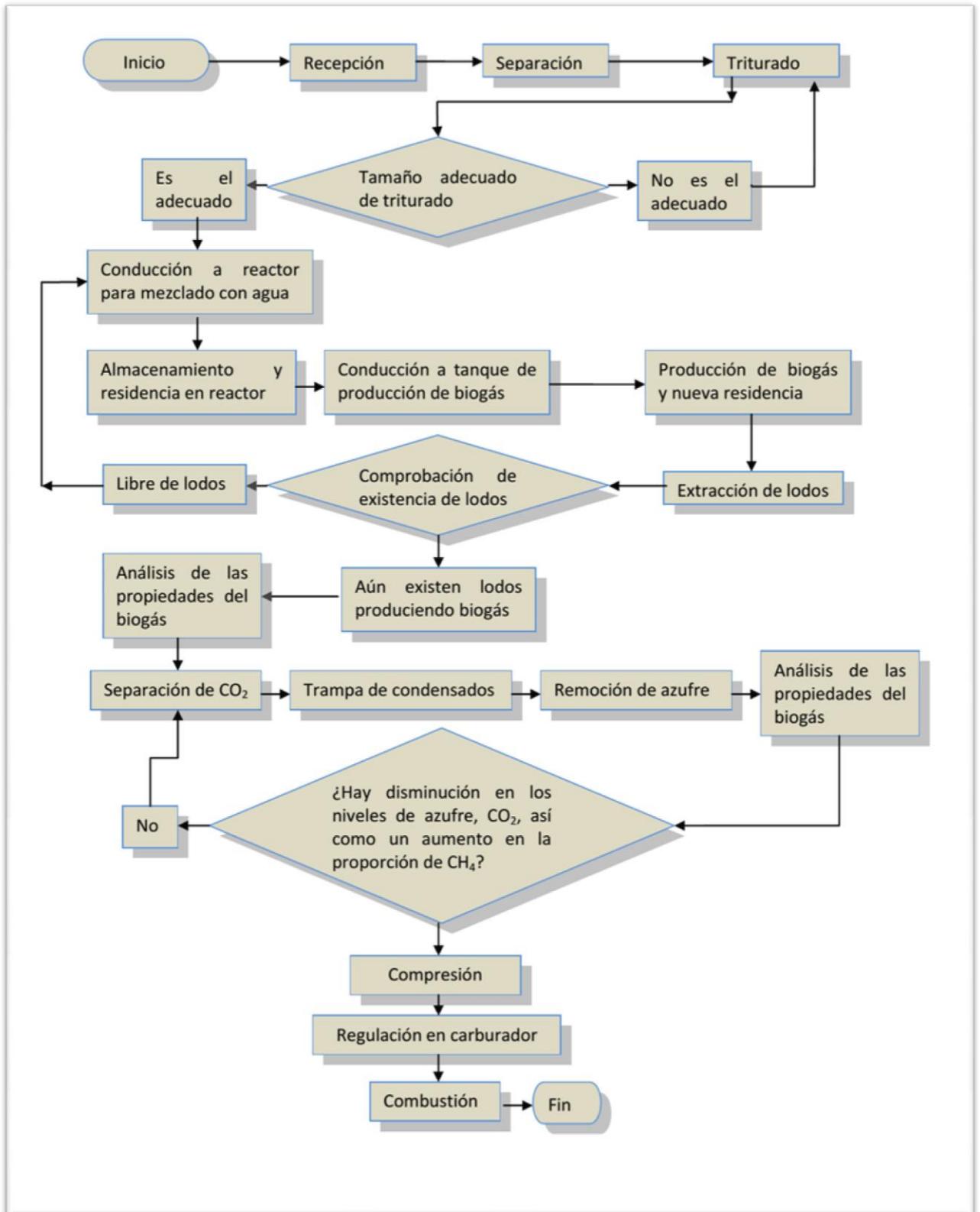
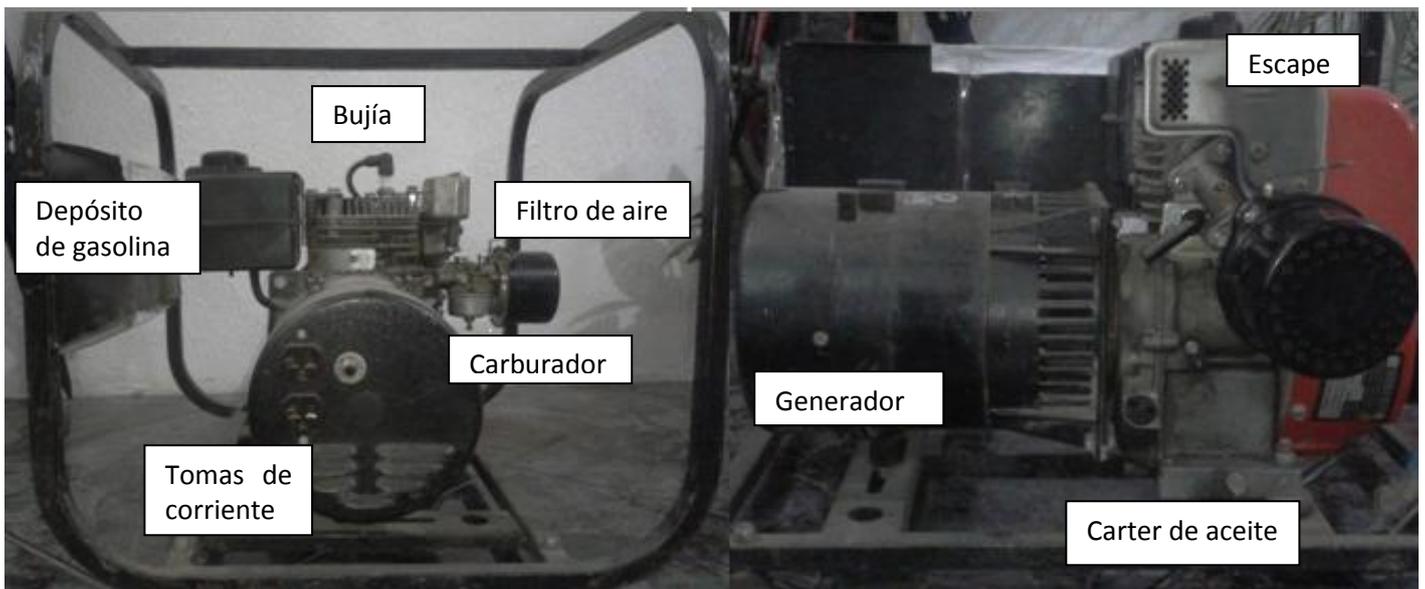


Figura 4.13 Diagrama de flujo ideal de procesos para el uso de biogás en el motor

### 4.1.3 Planta de gasolina para generación de electricidad

El motor que se usa en la propuesta de implementación de la planta de gasolina a biogás es un moto-generador marca Evans de 2 kVA, el cual es accionado por un motor Tecumseh. Originalmente el moto-generador era usado como planta de emergencia en apagones. Sin embargo, debido a sus características de tamaño y potencia se considera apropiado para la conversión de su uso de gasolina a biogás y su implementación en la planta de la cafetería El Cibarium. En la Figura 4.14 se aprecian dos vistas del motor propuesto para la conversión y algunos de sus componentes.



*Figura 4.14 Vista frontal y lateral del motor*

Las características del motor y del generador son las siguientes:

- **Motor**

Marca	Tecumseh
Modelo	HS-40 55609M
Combustible	Gasolina
Capacidad de gasolina	1.2 L
Potencia	2.5 kW- 4hp @ 3200 rpm
Tipo de aceite	SAE 30
Capacidad de cárter	0.62 l
Tipo de lubricación	Salpicado
Desplazamiento	171.33cc

Enfriamiento	Aceite-aire y con aletas para la cubierta del pistón
Número de cilindros	1
Número de tiempos	4
Encendido	Eléctrico manual (cordón)
Número de bujías	1
RPM máximas	4000
Peso (aproximado)	11 kg
Carburador	De tipo “flotador” con esprea de regulación
Filtro de aire	Redondo de poliuretano con cubierta de plástico

A su vez, el motor está contenido en un marco de metal y el movimiento es amortiguado por unos separadores de caucho entre el motor y la estructura. Para los detalles completos del motor revisar el ANEXO.

- **Generador**

Marca	Evans
Número de tomas de corriente	2
Voltaje de tomas de corriente	127 V
Potencia máxima	2 kVA (F.P.- 0.8)
Peso (aproximado)	9 kg
Carcasa	Aluminio con rejillas

Está acoplado de forma directa al eje del motor por lo que no tiene ninguna unión a la estructura de soporte. El generador funciona a las mismas revoluciones del motor ya que no hay ningún juego de engranes de distribución de potencia.

## **4.2. Cambios propuestos para el motor**

Las modificaciones realizadas al motor para el uso de biogás consisten en la implementación de un mezclador de aire-biogás, el cual se coloca después del filtro de aire del motor y antes del carburador. El filtro es una “T” fabricada con PVC y en la que en cada una de las tres secciones se coloca una válvula.

El mezclador de aire-biogás se construye con los siguientes elementos:

- Tubería de PVC de ½" grado sanitario
- Válvulas de PVC de ½" sin rosca
- Pegamento de PVC
- Pieza maquinada para adaptar el filtro y el carburador al mezclador

El filtro de aire debe permanecer en el motor para impedir que la suciedad y el polvo alcancen los cilindros del motor. El carburador, por su parte, se mantiene en su lugar para seguir usando gasolina cuando se requiera. El carburador, cuando el motor está trabajando con biogás, lleva la mezcla de aire-biogás hacia el cilindro. A la línea de gasolina se le debe de colocar una válvula para que se impida el paso de combustible líquido una vez que se ponga en marcha el motor con biogás.

Para encender el motor se deberá de hacer con la válvula de biogás completamente cerrada, usando gasolina de forma normal. Una vez que el motor esté en marcha, se abrirá parcialmente la válvula de biogás para que el motor lo empiece a succionar hacia el cilindro. Hecho eso, se debe de cerrar, paulatinamente, la llave de gasolina para que el motor comience a usar biogás solamente. Se espera que en este paso el motor disminuya sus revoluciones ya que, en lo que termina de consumir la gasolina del carburador no tendrá combustible. Entonces se procede a abrir y regular la llave de paso de biogás hasta que el motor comience a trabajar de forma adecuada. En la Figura 4.15 se aprecia la sección que va entre el filtro de aire y el carburador y en la cual se debe de instalar el mezclador para la admisión de la mezcla biogás-aire.



**Figura 4.15** Lugar en el que se debe de colocar el mezclador biogás-aire para la conversión

Cuando el motor esté funcionando con biogás, eso quiere decir, con la válvula de biogás y aire abiertas solamente, se podrá acelerar y desacelerar usando la válvula de acceso de biogás. Sin embargo, cada que se manipule la válvula de biogás, se deberá de manipular, igualmente, la válvula de aire, para que siempre se alcance una mezcla adecuada. También puede regularse la cantidad de mezcla que entra al motor mediante la esprea localizada en la base del carburador, la cual corresponde al flotador.

La potencia generada por el motor funcionando con biogás será alrededor de un 30% menos que si el motor funcionara con gasolina. Eso significa un mayor consumo de combustible para una carga determinada. Los sistemas de escape, enfriamiento, lubricación, arranque y el generador eléctrico se quedan sin alteraciones.

Para la instalación del motor, al ser en el techo de la cafetería, se propone que se construya una cabina o cubierta para protegerlo de la lluvia.

El motor se debe de encender de forma manual, con el cordón de arranque. Por lo que una persona debe de subir al techo de la cafetería a realizar el proceso de arranque y para apagarlo. Se recomienda colocar una escalera retráctil o con algún candado para el acceso al techo.

Aunque el mantenimiento del motor es muy simple, requiere que periódicamente se revise el nivel y calidad de aceite, la bujía y que la eficiencia sea aproximadamente la misma que al momento de la instalación. Hay que recordar que un motor que funciona con biogás genera más calor debido a la eficiencia de su combustión, además, aunque existe un proceso de purificación de biogás, difícilmente se limpia a niveles que no perjudiquen la estructura metálica del motor; así que en las revisiones es recomendable abrir la cubierta del motor para inspeccionar si hay corrosión en el pistón y otros componentes. El mantenimiento del generador es muy esporádico ya que no tiene componentes que estén en contacto directo con el biogás, y por tanto no sufren de la corrosión que sufre el pistón. Sin embargo, las revisiones propias del generador eléctrico deben de realizarse.

### **4.3 Propuesta para la medición de eficiencia**

Para medir la eficiencia, el moto-generador debe de estar instalado y funcionando con biogás. Una vez instalado y conectado a algún aparato de trabajo se sigue este procedimiento para realizar las mediciones:

- Determinar la cantidad de combustible consumido por el generador en una hora. Esto se hace tomando las mediciones del medidor de gas de la planta durante determinado tiempo a la carga deseada. Por ejemplo, el consumo de litros de biogás durante un intervalo de tiempo determinado.

- Determinar la carga total de energía eléctrica consumida durante una hora. Esto puede realizarse conectando un medidor de kilovatios por hora en la salida del generador, o utilizando un multímetro. Se sabe que el voltaje de salida es constante, por lo que, si se conoce la corriente se puede usar la ecuación:

$$P=VI \quad (4.1)$$

Donde:

P = Potencia (W)

V = Voltaje

I = corriente (A)

El multímetro se conecta en serie en el circuito de trabajo y se mide la corriente. De esa forma se conoce la potencia de trabajo. Con la potencia obtenida se estima el consumo de energía en una hora, esto es Wh, o en su forma más usada, kWh. Por ejemplo, si se consumen 100 W, entonces en una hora se consumen 0.1 kWh.

- Convertir la cantidad de combustible en unidades de energía. Esto significa que si se sabe cuánto biogás consume el motor en determinado tiempo, se puede conocer la cantidad total de energía que consume el motor. Eso es bajo la condición de que la composición de biogás y la carga en el motor se mantengan constantes durante el tiempo en el que se estima el trabajo del motor. Como ya se conoce el poder calorífico del biogás, el cual es, en promedio, de 20 MJ/m<sup>3</sup>, y sabiendo que 1 m<sup>3</sup> es igual a 1,000 litros, entonces se puede saber la cantidad de energía suministrada entre un determinado tiempo, lo cual da como resultado una potencia.

De igual forma que en el punto anterior, si se conoce la potencia que suministra el combustible en una hora, entonces se conocen los kWh de energía suministrada.

Si se sabe que el poder calorífico del biogás es de 20 MJ/m<sup>3</sup>, pero además se conoce la densidad del biogás la cual es aproximadamente 1.2 kg/m<sup>3</sup>, entonces:

$$\frac{20 \frac{MJ}{m^3}}{1.2 \frac{kg}{m^3}} = 16.6 \text{ MJ/kg} \quad (4.2)$$

Si en promedio la gasolina de bajo octanaje tiene cerca de 40 MJ/kg, entonces, eso quiere decir que la proporción de biogás que requiere el motor para generar una potencia en iguales condiciones que si se usara gasolina, es mayor. Sin embargo, la cantidad de combustible, ya sea biogás o gasolina, usada por el motor, está limitada por las características del mismo. En especial del volumen del pistón y del carburador, el cual regula la entrada de mezcla combustible aire al motor. Como se ha mencionado, el carburador no se removió con el fin de que el motor pudiera seguir utilizando gasolina en forma parcial o completa. Entonces, si la cantidad biogás que consume el motor está limitada, la potencia a la salida del generador se reducirá en proporción a la potencia calorífica del biogás. Esto quiere decir que el generador podrá ofrecer menos de la mitad de la potencia a que si usara gasolina.

Si la capacidad máxima del generador usando gasolina es de 2 kVA, pero se tiene un factor de potencia de 0.8, entonces:

$$2 \text{ kVA} * 0.8 = 1.6 \text{ kW} \quad (4.3)$$

La potencia máxima que genera el motor es de 1.6 kW. Pero el poder calorífico del biogás es menor que el de la gasolina, de tal forma que su proporción se da por:

$$\frac{16.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{40 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 0.415 \quad (4.4)$$

Por lo que el poder máximo que se alcanzará con el motor utilizando biogás es:

$$0.415 * 1.6 \text{ kW} = 0.664 \text{ kW} \quad (4.5)$$

- Se sabe que la eficiencia efectiva está determina por la relación que existe entre la potencia efectiva y la potencia calorífica suministrada; o, en este caso, la energía que produce el generador entre la energía que consume el motor. Dicha relación se muestra a continuación.

$$\eta_e = \frac{\text{potencia eléctrica}}{\text{potencia calorífica suminitrada}} = \frac{\text{energía a la salida del generador (kWh)}}{\text{energía suministrada por el combustible al motor (kWh)}} \quad (4.6)$$

Es importante recalcar que las mediciones se deben de hacer con una carga constante, ya que de lo contrario los valores de la eficiencia serán considerablemente distintos al verdadero.

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES**

En relación a los objetivos propuestos al inicio del presente trabajo, se concluye que la conversión de un motor de combustión interna, el cual funciona originalmente con gasolina, para que funcione con biogás, y sea instalado en la cafetería “el cibarium”, localizada en ciudad universitaria, es viable.

La viabilidad de dicha propuesta radica en los beneficios del uso de un combustible renovable, producido por una fuente de materia prima, la cual, en otras circunstancias sería un desecho; además, la factibilidad técnica de la conversión está basada en la economía y disponibilidad de los elementos de la misma.

El uso del motor funcionando con biogás implica un ahorro en el uso de energía eléctrica, así como una disminución en el volumen de desperdicios orgánicos que se envían a la basura.

En relación a los requerimientos necesarios para la implementación del motor, se establece que en las instalaciones de la planta de biogás, es posible adaptar el motor debido a que se cuentan con las condiciones adecuadas, tanto por las características propias del biogás, así como por los recursos necesarios para la conversión del motor.

El motor, ya utilizando biogás como combustible se estima que pueda ofrecer un máximo de 0.664 kw de potencia. Lo anterior, si se compara con los 1.6kw de potencia, ofrecidos mediante el uso de gasolina, implica una reducción de potencia importante. Lo anterior es resultado del menor poder calorífico del biogás con respecto a la gasolina. Sin embargo, considerando que el beneficio energético para este caso en particular no radica en la potencia del motor, sino en la versatilidad energética, entonces también resulta en una ventaja que propicia la viabilidad del proyecto.

Se ha mencionado sobre la urgente necesidad de que el ser humano modifique sus hábitos energéticos en beneficio del medio ambiente y de sí mismo. De seguir como lo ha hecho hasta ahora, el futuro de la humanidad está seriamente comprometido debido a los problemas de diferentes índoles que se están provocando por una mala conciencia de consumo. Las naciones más poderosas acaparan los recursos naturales para ellos mismos, mientras que los países menos desarrollados son sólo importantes debido a la cantidad de recursos con las que cuentan. Lo anterior implica que en muy poco tiempo los problemas asociados a la falta de combustibles y a los elevados precios de éstos, generará problemas sociales como los que ya se han visto en algunas ocasiones, sólo que a mayor escala.

Sin embargo, existen tecnologías basadas en los recursos naturales renovables, las cuales le permitirían al ser humano tener una mejor convivencia con su entorno. Fuentes de energía como el sol, el viento y el agua son sólo algunas de las energías renovables. El caso de la biomasa es un ejemplo de

energía renovable ya que tiene una reinsertión a la naturaleza de forma veloz. El ser humano ha utilizado la biomasa a lo largo de muchos años como fuente de energía y a lo largo del siglo pasado desarrolló nuevas formas de aprovechar las plantas y los desechos orgánicos.

En la actualidad, la biomasa se puede transformar varios tipos de energía para beneficio del ser humano, ya sea en combustibles para los vehículos, como fuente de energía en plantas de cogeneración, en estufas rurales, etc.

El biogás, que es uno de los productos de la biomasa, puede ser utilizado en muchas formas para la generación de energía, ya sea eléctrica o bien, energía térmica. Para la generación de energía eléctrica se usan motores de diferentes tipos y no necesitan ser motores con características complejas o muy costosas, prácticamente todos los motores pueden ser usados para el uso de biogás. Esa es una de las ventajas importantes del biogás como combustible para los motores.

Ahora bien, la Universidad Nacional Autónoma de México se ha caracterizado por la responsabilidad social que tienen para con el país, por lo que la implementación de tecnologías que resulten en beneficio de las personas y el ambiente es algo que siempre se debe de procurar.

En la cafetería El Cibarium es posible instalar un motor que funcione con el biogás generado en la planta. Es un proyecto en el cual se invierte poco dinero y que es redituable en muchas maneras y con beneficios notables. Es por eso que la implementación del motor se plantea como algo viable. Además puede ser referencia de que en otros lugares se implementen motores de características parecidas a los de esta propuesta.

En México, el uso de motores para aprovechar el biogás ya ha sido implementado aunque en escala muy pequeña. Básicamente en granjas de animales. Sin embargo, el potencial que existe para una implementación a mayor escala de motores que funcionen con biogás es aún muy grande. Más aún debido a las características del país, el cual es aún, una nación rural en muchos aspectos.

Es intención de este trabajo servir como medio de motivación a la implementación de sistemas de biogás a nivel nacional.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ ABAGas. 2006. Manual del instalador. Conversión de vehículos a GNC. Buenos Aires, Argentina.
- ✓ Bennett, S. 2010. Diesel engines. ED. Delmar, Cenegage Learning. Pág. 46. Nueva York, EE.UU.
- ✓ Berkowitz, N. 1997. Fossil hydrocarbons. Ed. Academic press. Pág. 121-124. California. EE.UU.
- ✓ Carmona, A. y Orozco, J. 2003. Utilización de biogás como combustible para el funcionamiento de motores de combustión interna. Tesis de Licenciatura para Ingeniería Agrónoma. Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica.
- ✓ ONU, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Nueva York. EE.UU.
- ✓ CONAE, 2008. Seminario Internacional de Políticas Públicas y Mecanismos para el Fomento de la Eficiencia Energética en Países Latinoamericanos. Publicación de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. México, D.F. México.
- ✓ CONAFOR, 2006. La bioenergía en México, un catalizador del desarrollo sustentable. Publicación de la Comisión Nacional Forestal. México, D.F. México.
- ✓ Dell, R. y Rand, D. 2004. Clean Energy. Ed. RSC Clean technology monographs. Pág. 117-122. Cambridge, Inglaterra.
- ✓ Fernández, J. 2010. Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. Ed. A. MADRID VICENTE, EDICIONES. Pág. 39-41, 169-174. Madrid, España.
- ✓ Foster, R., Ghassemi, M. y Cota, A. 2010. Solar energy. Ed. Taylor & Francis Group. Pág 73-80, 99-103, 115. Florida, EE. UU.
- ✓ Giacosa, D. 1986. Motores endotérmicos. Ed. Ediciones Omega. Pág. 4-9. Barcelona, España.
- ✓ Golden, F., De la Vega, L. y Terrones, G. 1989. Termofluidos, turbomáquinas y máquinas térmicas. Ed. Compañía editorial continental. Pág. 14-22, 30-32. México, D.F. México.
- ✓ González, J. 2009. Energías renovables. Ed. Reverté. Pág. 164-166. Barcelona, España.
- ✓ IEA, 2012, CO<sub>2</sub> Emissions from fuel combustion, Ed. EIA, Pág. 7-12. París, Francia.
- ✓ IIE, 2003. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. Publicación del Instituto de Investigaciones Eléctricas. México, D.F. México.
- ✓ IEA. 2003, World Energy Overview: 1993-2003, Energy Information Administration (EIA), U.S. Department of Energy. EE.UU.
- ✓ Juárez, S. 2012. Planeación, diseño e instalación de un prototipo para la conversión de desechos orgánicos a energía térmica. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- ✓ Kaltschmitt, M., Streicher, W. y Wiese, A. 2007. Renewable energy. Ed. Springer. Pág. 103-105, 123-127. Berlín, Alemania.
- ✓ Kiely, G. 1999, Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Ed. McGraw-Hill/interamericana de España. Pág. 909-914. Madrid. España.

- ✓ Lee, S., Speight, J. y Loyalka, S. 2007. Handbook of alternative fuel technologies. Ed. Taylor & Francis Group. Pág 3-7, 377-385. Londres, Inglaterra.
- ✓ Madrid, A. 2009. Energías Renovables. Ed. A. MADRID VICENTE, EDICIONES. Pág. 113-116. Madrid, España.
- ✓ Mataix, C. 1973. Turbomáquinas térmicas. Ed. Dossat. Pág. 33-38. Madrid, España.
- ✓ Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010. El sector del biogás agroindustrial en España. Publicación del Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, España
- ✓ Núñez, O., 2009. Utilización del biogás como fuente de energía. En: Memorias del I Foro de análisis del potencial energético renovable. Instituto Tecnológico de Cd. Juárez. Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
- ✓ Panagiotis, G. 2011. Solid biofuels for energy. Ed. Springer. Pág. 153-156. Berlín. Alemania.
- ✓ Pérez, J., Chávez, P. y Cebada, B. 1986. Evaluación técnico-económica de dos alternativas de aprovechamiento de biogás en un relleno sanitario. México, D.F. México.
- ✓ Polo, M. 1980. Turbomáquinas hidráulicas. Ed. Limusa. Pág. 13-16, 18-20. D.F. México.
- ✓ Polo, M. 1984. Turbomáquinas de fluido compresible. Ed. Limusa. Pág. 19-22. D.F. México.
- ✓ PSE PROBIOGAS, 2010 a. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación de biogás. Capítulo 1. Caracterización, purificación y control del biogás. Publicación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España.
- ✓ PSE PROBIOGAS, 2010 b. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación de biogás. Capítulo 2. Motores de cogeneración. Publicación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España.
- ✓ PSE PROBIOGAS, 2010 c. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación de biogás. Capítulo 5. Nuevos usos del biogás. Publicación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España.
- ✓ PSE PROBIOGAS, 2010 d. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación de biogás. Capítulo 6. Microturbinas. Publicación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España.
- ✓ Ramírez, L., 2004. Generación eléctrica por medio de biogás. Tesis para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- ✓ Sans, R. y de Pablo, J. 1989. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Ed. Marcombo boixareu. Pág. 14-17. Barcelona. España.
- ✓ Sarkar, S. 2009. Fuels and combustión. Ed. Universities Press. Pág. 5-9, 177, 337-239. Hyderabad, India.
- ✓ Seifried, D. y Witzel, W. 2010. Renewable energy – the facts. Ed. Energieagentur. Pág. 152-153. Freiburg, Alemania.
- ✓ SEMARNAT, 2007. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.
- ✓ Serrano, J. 2002. Procesos y tecnologías de máquinas y motores térmicos. Ed. Universidad politécnica de Valencia. Pág. 33-36. Valencia, España.

- ✓ Siles, F., 2012. Generación de energía eléctrica a partir de producción de biogás. Tesis de licenciatura para Ingeniería en Control y Automatización. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional. México, D.F., México.
- ✓ Sims, R. 2002. The Brilliance of bioenergy. Ed. James & James (Science Publishers) Ltd. Pág. 1-5. Londres, Inglaterra.
- ✓ Sørensen, B. 2011. Renewable energy. Ed. Academic press. Pág. 875-877. Londres, Inglaterra.
- ✓ Talayero, A. y Telmo, E. 2008. Energía eólica. Ed. Prensas universitarias Zaragoza. Pág. 13-15, 70-73. Zaragoza, España.
- ✓ Worldwatch Institute, 2007. Biofuels for Transport: Global Potential and Implications for Sustainable Energy and Agriculture. Ed. Worldwatch Institute. Pág. 260-261. Virginia, EE.UU.

## ANEXO. Características completas de motor HS 40

<b>Especificación</b>	<b>HS 40 (mm)</b>
<b>Desplazamiento (cc)</b>	171.93
<b>Carrera</b>	49.225
<b>Diámetro</b>	66.7
<b>Juego de válvula</b>	0.102
<b>Asiento de válvula</b>	1.143
<b>Guía de válvula</b>	7.155
<b>Juego de Cigüeñal</b>	0.666
<b>Diámetro de camisa del pistón</b>	66.573
<b>Ajuste de abertura de aire</b>	0.3175
<b>Punta de bujía</b>	0.762
<b>Ángulo de posición de válvula</b>	46°