



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

"ENERGÍAS RENOVABLES: BIOGÁS, HIDRÓGENO Y METANOL".

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

FALCÓN ARELLANO BERENICE ITZEL

SÁNCHEZ APARICIO OLIVIA

ASESOR: M. EN C. MÁRQUEZ VÁZQUEZ MARJORIE

MÉXICO 2015

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

“Mucho mejor atreverse a hacer cosas grandes, a obtener triunfos gloriosos, aun cuando matizados con fracasos, que formar en las filas de aquellos pobres de espíritu que ni gozan mucho ni sufren mucho porque viven en el crepúsculo gris que no conoce la victoria ni la derrota.”

Theodore Roosevelt

Hoy estoy sentada frente a esta hoja en blanco recordando todo lo que tuve que pasar para llegar a este momento, y estas cuantas líneas son única y exclusivamente para agradecer a todas las personas que me acompañaron en esta aventura. Primeramente quiero agradecer a mis padres ya que sin su educación, su cariño y su apoyo incondicional no sería la mujer que soy; gracias a mis hermanos por su compañía, sus consejos y su alegría que siempre me sube el ánimo.

Después me gustaría agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas desde el bachillerato y proveerme de los recursos necesarios para que mi educación fuera integral, creo que le debo demasiado y no solo a la Universidad en general sino también a la Facultad de Estudios Superiores Aragón que me recibió con las puertas abiertas y se convirtió en mi hogar durante casi cinco años. Hablando de la Facultad de particular no puedo dejar de agradecer a todas las personas que encontré a lo largo de mi camino, a mis maestros, compañeros y amigos. En especial al Ing. José Antonio Dimas Chora (mi tutor) gracias por su apoyo no solo en el ámbito profesional sino también en el personal, a la Ing. Marjorie Márquez Vázquez por sus enseñanzas y por inculcarme el interés por la ingeniería ambiental, que junto con el Ing. Sergio Alfonso Martínez todo su apoyo se vio reflejado en nuestro trabajo de tesis, gracias a ambos por su paciencia.

En cuanto a mis demás profesores podría escribir párrafos y párrafos mencionando las lecciones que cada uno me ha dejado, algunos con sabores no tan dulces pero que a final de cuentas son experiencias que seguramente me

servirán de algo de manera profesional, gracias por todo lo enriquecedor de cada uno de ellos.

Por último y no por eso menos importantes muchas gracias a mis amigos, Olivia sin ti todo este trabajo no hubiera sido lo mismo, gracias por tu amistad, Joana gracias también por ser mi amiga durante todo este tiempo (mira que soportarme no es fácil), Ulises no solo eres mi amigo, eres mi compañero de vida, mi apoyo, consuelo y demás cosas, sin tu cariño, paciencia, apoyo y amor me hubiera desesperado en múltiples ocasiones, gracias por estar conmigo siempre y quererme así.

A las basuras de mis amigos: Osvaldo, Orlando, Miguel, Joel, Ricardo, Benjamín y José Luis, ¿Qué hubiera sido mi estancia en la escuela sin sus tonterías? Gracias por las risas, los tragos, el baile, los regaños, los abrazos, las charlas, pero sobre todo gracias por siempre creer en mí. A mi Amigo el Ing. Oniel García Balanzar que es una persona estupenda de la cual aprendí muchas cosas, gracias por todas las lecciones, el café, el apoyo y la confianza, también eres una parte importante de mi formación como profesional y como persona.

Seguramente olvide a alguien, pero ¿Qué quieren? Así soy, distraída y olvidadiza, sin embargo espero que sepan que lo mucho o poco que su presencia haya contribuido y ayudado a alcanzar un objetivo más en mi vida, es muy valioso para mí.

Sé que siempre al terminar algo, comienzan nuevos retos, por eso sostengo que las cosas se hacen una a la vez, paso a paso, para ir alcanzando metas y continuar formándome profesionalmente, las cosas llegan a su debido tiempo y son de quien las trabaja.

Atte: Berenice. =P

Agradecimientos

*El ajedrez nos recuerda que
el mundo es un conjunto de
posibilidades casi infinitas
y que hay que decidirse
por una.*

Luis Ignacio Helguera

Ha pasado el tiempo y no imaginaba hace algunos años el llegar hasta este momento en el que he dado el paso más grande en mi vida profesional, haber estudiado esta carrera me ha dejado la más grande satisfacción y experiencias inolvidables.

Este trabajo está dedicado a aquellas personas que me han ayudado a lograr esta meta; de una manera especial para mi familia que es el pilar más fuerte para mí, ya que me han brindado su apoyo incondicional en todo momento, su cariño y ese ánimo que me motiva a seguir adelante a pesar de las adversidades que se han presentado: gracias a mis padres Agustina y Gregorio por su enorme esfuerzo y perseverancia, por su cariño, por su dedicación, por sus cuidados; a mis tíos Yolanda, Marcia y Rosalino (mis segundos papás) por haber estado presentes en cada etapa de mi vida brindándome su ayuda; a mis abuelitos Enedina y Constantino, en especial a mi abuelita que siempre estará cuidándome en todo momento; finalmente a mis hermanos pues su ejemplo ha sido una constante de motivación: a Javier por trazar el camino, a Fabiola por su gran cariño y a Gerardo por todo el apoyo.

A mis asesores de tesis Marjorie Márquez Vázquez y Sergio Martínez González, por sus enseñanzas, experiencias y sus aportaciones que han sido muy enriquecedoras, gracias a ellos por sembrarme esa inquietud de indagar más en este camino de la ingeniería ambiental donde aún hay mucho por hacer.

A mis grandes amigos de la universidad ya que sin ellos no hubiese sido tan entretenida la escuela, todo aquello no se olvidará: los desvelos, las tareas en equipo, las salidas... quedarán plasmadas entre las mejores vivencias.

Gracias a Bere, una divertida e inteligente persona ya que con su paciencia, apoyo y perseverancia logramos terminar este proyecto; gracias a Joana por su confianza y comprensión en todo momento; a Mijail por brindarme su valiosa amistad, por sus ánimos de seguir preparándonos y continuar, y a mis otros amigos que no olvidaré por su gran compañerismo: Marco, Arturo, Neidy, Chino, Matus, Sonia y finalmente a los cometas Benjamín, Osvaldo y Jacobo que siempre me hacían reír con sus ideas tan peculiares.

Al maestro José Antonio Dimas Chora por brindarme la gran oportunidad de laborar con él, de la cual estoy muy agradecida, cada día aprendo cosas nuevas, gracias por la paciencia, amistad, apoyo y por ser tan cálido y amigable (aunque confieso que al principio me daba miedo); al maestro Mario Sosa Rodríguez y al Ing. Sakaguchi por alentarme a seguir preparándose cada vez más.

Finalmente a mis nuevos amigos: Itzel, Alex, Josué, ha sido una grata experiencia convivir todo este tiempo, no sería lo mismo si no estuvieran presentes cada día con sus ocurrencias.

Olivia

Se agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el proyecto otorgado para la realización del proyecto PAPIME PE101514

“ENERGÍAS RENOVABLES: BIOGÁS, HIDRÓGENO Y METANOL.”

Índice

INTRODUCCIÓN	10
CAPITULO 1 ENERGÍAS RENOVABLES.....	12
1.1 ¿QUÉ SON LAS ENERGÍAS RENOVABLES?	15
1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES.	17
1.3. PERSPECTIVA GENERAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO.	18
1.3.1. <i>Una comparativa global entre las fuentes de energía renovables.</i>	21
1.4. PANORAMA GENERAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO.	23
1.4.1. <i>México y su situación geográfica</i>	23
1.4.2. <i>El sector eléctrico mexicano.</i>	25
1.4.3. <i>Combustibles fósiles en México.</i>	27
1.4.4. <i>Instituciones, leyes y políticas mexicanas que apoyan el uso de energías renovables.</i>	28
1.4.5. <i>Visualización de un México usando energías renovables.</i>	34
1.5. ENERGÍA EÓLICA	40
1.5.1. <i>El viento</i>	41
1.5.2. <i>Impactos del uso de energía eólica</i>	44
1.5.2.1. Económico y social.	44
1.5.2.2. Ambiental.....	47
1.5.3. <i>Potencial de energía eólica en México</i>	47
1.6. ENERGÍA SOLAR	52
1.6.1. <i>Energía solar Térmica</i>	53
1.6.1.1. Tipos de plantas solares térmicas.	55
1.6.1.1.1. Plantas de energía con colectores cilindro-parabólicos o de canal parabólico	56
1.6.1.1.2. Plantas de energía solar de torre.	57
1.6.1.2. Plantas de energía con colectores de plato-parabólico.	59
1.6.1.3. Centrales de colectores Fresnel.	60
1.6.1.4. Plantas de energía chimenea solar.	60
1.6.2. <i>Energía Solar Fotovoltaica</i>	62
1.6.2.1. Ventajas y desventajas del uso de generación de energías fotovoltaicas.....	66
1.6.2.2. Aplicaciones y perspectivas del uso de energía fotovoltaica.	68
1.6.3. <i>Potencial de la energía solar en México</i>	69
1.7. HIDRÁULICA.....	71
1.7.1. <i>Generación de energía renovable con grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas</i>	72
1.7.1.1. Desarrollo potencial hidroeléctrico de México	75

1.7.1.2. Mecanismos de generación	76
1.7.2. Energía oceánica	79
1.7.2.1. Energía Mareomotriz.	79
1.7.2.1.1. Mecanismos de generación.....	82
1.7.2.1.2. Potencial de energía mareomotriz en México	84
1.7.2.2. Energía de las olas	85
1.7.2.2.1. Mecanismos de generación y tecnologías.	87
1.7.3. Generadores de energía a partir de las corrientes marinas	90
1.7.3.1. Mecanismos de generación y tecnologías	91
1.7.3.2. Potencial de la generación de energía eléctrica por medio de las corrientes marinas en México	93
1.7.4. Geotérmica	94
1.7.4.1. Geotermia y tipos de sistemas geotérmicos	94
1.7.4.2. Impacto ambiental de la energía geotérmica	100
1.7.4.3. Escenarios mundial y nacional de potencial geotérmico	101
1.7.4.4. Usos directos de la energía geotérmica	105
1.7.4.5. Líneas futuras de investigación	106
CAPITULO 2 GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA	108
2.1 BIOMASA	112
2.1.1 <i>Clasificación de la Biomasa</i>	113
2.1.2 <i>Propiedades De La Biomasa</i>	120
2.1.3 <i>Ventajas De La Biomasa</i>	124
2.1.4 <i>Desventajas De La Biomasa</i>	125
2.1.5 <i>Combustibles generados a partir de la biomasa</i>	127
2.1.6 <i>Riesgos Que Enfrenta La Biomasa</i>	129
2.1.6.1 Almacenamiento De La Biomasa	129
2.1.6.2 El Transporte De La Biomasa.....	130
2.2 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA.	130
2.2.1 <i>Procesos de transformación de la biomasa</i>	132
2.2.1.1 Pretratamientos termoquímicos	132
2.2.1.1.1 Secado	132
2.2.1.1.2 Peletización	134
2.2.1.1.3 Torrefacción	135
2.2.1.2 Procesos termoquímicos de conversión de energía	135
2.2.1.2.1 Procesos de combustión directa.	136
2.2.1.2.2 Pirólisis	138
2.2.1.2.3 Gasificación.....	144
2.2.1.2.4 Producción de carbón vegetal.....	149
2.2.1.3 Pretratamientos bioquímicos	150
2.2.1.4 Procesos bioquímicos de conversión de energía	152

2.2.1.4.1 Esterificación	152
2.2.1.4.2 Fermentación (producto alcohol)	153
2.2.1.4.3 Digestión Anaerobia	154
2.3 PROCESO DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIO	155
2.3.1 <i>Bacterias que intervienen en el proceso de biodigestión.</i>	156
2.3.1.1 Bacterias de la hidrólisis	158
2.3.1.2 Bacterias de la acidogénesis	158
2.3.1.3 Bacterias de la acetogénesis	158
2.3.1.4 Bacterias de la metanogénesis	159
2.3.2 <i>Descripción de las fases del proceso.</i>	160
2.3.2.1 Hidrólisis	161
2.3.2.2 Acidogénesis	163
2.3.2.3 Acetogénesis	164
2.3.2.4 Metalogénesis	164
2.4. EL BIOGÁS	166
2.4.1 <i>Componentes del biogás</i>	166
2.4.2 <i>Usos Del Biogás</i>	167
2.4.3 <i>Impacto del uso del biogás</i>	169
2.4.2.1 Impacto económico	170
CAPITULO 3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR.....	171
3.1 TIPOS DE BIODIGESTORES	172
3.1.1 <i>La planta flotante con cúpula o campana flotante</i>	172
3.1.2 <i>La planta con cúpula o campana fija</i>	173
3.1.3 <i>La planta balón o biodigestor tubular.</i>	174
3.1.4 <i>Biodigestor de desplazamiento horizontal</i>	175
3.1.5 <i>Biodigestores de mezcla completa.</i>	176
3.1.6 <i>Reactor con retención de biomasa, sin recirculación</i>	177
3.1.7 <i>Biodigestores de dos etapas.</i>	180
3.2 CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR	181
3.2.1 <i>Parámetros ambientales.</i>	181
3.2.2 <i>Parámetros operacionales.</i>	183
3.2.3 <i>Otros factores</i>	188
3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR	189
3.3.1 <i>Volumen del biodigestor.</i>	190
3.3.2 <i>Construcción del biodigestor.</i>	193
3.4 RECOMENDACIONES	219
3.5 CONCLUSIONES	224
CAPITULO IV REFERENCIAS	226
4.1 REFERENCIAS DE IMÁGENES	243

INTRODUCCIÓN

Debido al consumo prolongado de combustibles fósiles en el mundo, éstos han ido decreciendo a consecuencia de una sobre explotación de energía incontrolable, éste fenómeno ha dado pauta para generar nuevos proyectos alternativos e innovadores de carácter sustentable que frenen a dichos combustibles, el objetivo primordial es, la generación de nuevas energías limpias para su aprovechamiento y brindar una mejor calidad de vida a generaciones futuras y lograr en mayor porcentaje la sostenibilidad que se requiere en el mundo para mejorar el medio que nos rodea.

La creación de biodigestores representa una opción viable para la producción de “biogás” este biocombustible es generado por componentes orgánicos fácil de

encontrar en la naturaleza. Proyectos de esta índole representan una alternativa sustentable, económica ya que se genera un gas rico en metano, logrando así hacer uso de él. Para la obtención de biogás ocurren una serie de procesos biológicos que contribuyen a que el gas pueda ser forjado. Este tipo de tecnologías nos permite eliminar grandes volúmenes de residuos que a diario son generados por una población en desarrollo, consiguiendo así la disminución de ellos y una reducción de gases tóxicos emitidos en la atmósfera, dando como resultado un equilibrio de reducción-producción.

Para la elaboración de este trabajo en el primer capítulo se describe el panorama de las energías renovables en el mundo, los distintos tipos de proyectos realizados para la obtención de energía utilizando la eólica, solar e hidráulica por mencionar las más sobresalientes. Organizando nuevas formas de planeación y gestión que ofrezcan el desarrollo sustentable para las generaciones venideras y se procure condiciones de vida prósperas.

En el capítulo dos se menciona a gran detalle la importancia que asume la biomasa en la producción de biogás, se relata el manejo adecuado de ésta, el procedimiento y técnicas para el proceso de conversión de biomasas en energía.

Finalmente se desarrolla paso a paso el diseño y construcción del biodigestor a escala banco de laboratorio, en base a lo establecido a este trabajo se deriva en el capítulo cuatro resultados, recomendaciones y conclusiones como parte de dicho trabajo.

CAPITULO 1 ENERGÍAS RENOVABLES

La energía es uno de los problemas que definirán el destino de México y el mundo en el siglo XXI. Como se sabe, las fuentes primarias de energía que dominan en el mundo son los hidrocarburos. En la actualidad representa 80% de toda la energía primaria que es producida y consumida. En México la dependencia es mayor, pues en 2007 el 92% de la producción de energía primaria correspondió a combustibles fósiles (71.4% a petróleo, 19.2% a gas y 1.9% a carbón) (Estrada, 2010).

La demanda energética mundial está en continuo aumento, a un ritmo de crecimiento anual del 2%. A medida que crecen la población y las economías,

millones de personas en todo el mundo disfrutan de los beneficios de un estilo de vida que requiere cantidades de energías cada vez mayores. Según la agencia internacional de energía, en su escenario de referencia, la demanda mundial de petróleo aumentará de 84 millones de barriles al día en 2005, a 116 millones de barriles diarios en 2030; es decir, se incrementará en 38% durante ese periodo. Se trata de un reto colosal en términos de inversiones, en particular si se toma en cuenta que las reservas y las plataformas de producción de petróleo está en declive. Los descubrimientos de nuevos yacimientos de fuentes energéticas suelen darse principalmente en lugares donde los recursos son difíciles de extraer, ya sea por motivos físicos, económicos e incluso políticos. (Estrada y Arancibia, 2010).

Adicionalmente, es común decir que la producción de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, debido al uso intensivo de los hidrocarburos, es la causa del incremento de la temperatura media global, y consecuentemente del llamado “cambio climático”, con todas las consecuencias para los seres humanos que ello implica. (Estrada y Arancibia, 2010). El sector eléctrico es responsable de, al menos, la tercera parte del total de emisiones de CO₂ en el país (Islas y Manzini, 2003; Islas *et al*, 2004, citado por: Cancino *et al*, 2010). Los procesos de industrialización y económicos en el gobierno, requieren energía (Denny E., 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). Los combustibles fósiles son en el mundo, las fuentes centro de energías más demandadas (Akdag y Dinler; 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). Sin embargo las reservas de combustibles son limitadas, y a gran escala son asociadas con el deterioro del medio ambiente (Sebitosi y Pillay; 2008, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). Esto ha engrandecido el uso de energías renovables en el mundo (Cárdenas, Pena, *et. al*; 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010), incluyendo el uso de la biomasa, energía mareomotriz, energía solar y la energía eólica (Denny y O'Malley; 2006, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). Por todo lo anterior, es urgente una utilización más

racional de la energía y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energéticos. (Hernández-Escobedo, *et al*, 2010).

Ante esta situación energética mundial y nacional, México requiere un cambio de paradigma energético. Es inevitable preguntarse: ¿Con cuáles fuentes energéticas se puede enfrentar el agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles, conservando al mismo tiempo el ambiente para un desarrollo sustentable? Esto se debe lograr sin tensiones geopolíticas dramáticas por el control de los yacimientos de los hidrocarburos, y sin degradar irreversiblemente el medio natural, particularmente debido a emisiones de gas de efecto invernadero. Se cree que el uso racional y eficiente de las actuales fuentes energéticas y las energías alternativas, energías renovables y la energía nuclear son la solución a este problema. (Estrada, 2010). Según los datos de la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico el potencial de México para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero llega a 81,000,000 toneladas equivalentes de CO₂ anuales. A un precio de 12.13\$/t de CO₂. Esto generará ingresos alrededor de 98 millones de dólares procedentes de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) como se ve en el Protocolo de Kyoto.

A continuación se muestra una tabla que compara las diversas fuentes de energía, la cantidad de energía producida si éstas fueran explotadas y el impacto que tendría en cuanto a la reducción de las emisiones de CO₂

Tabla 1.1. Potencia de emisiones evitadas con el uso de fuentes renovables en el sector eléctrico
(Cancino- Solorzano, et, al.2010)

Energía renovable	Energía (MW)	Generación (GWh/año)	Reducción de emisiones de Metano y CO2 /año
Proyectos gubernamentales			
Eólica	591	2098	1.29
Geotérmica	125	1020	0.63
Hidráulica	3988	5494	4.33
Solar	30	53	0.03
Proyectos de inversión privada			
Eólica	1076	3829	2.16
Biomasa	495	3035	1.11
Biogás	42	197	0.05
Mini hidráulicas	172	571	0.2

1.1 ¿Qué son las energías renovables?

Para hablar de energías renovables primeramente se debe entender un concepto importante llamado desarrollo sostenible, el cual puede ser pensado como el desarrollo económico que ofrece una calidad de vida para todos dentro de la capacidad de la naturaleza, haciendo hincapié en cómo las actividades humanas se ven limitadas por los límites económicos, sociales y ambientales (Assefa y Frostell, 2007; Zoellner, *et al*, 2008, citado por: Stigka, et, al. 2014). También se puede describir como la sostenibilidad total para la satisfacción de las necesidades humanas, a través de sistemas tecnológicos socialmente aceptadas, políticas adecuadas y los instrumentos políticos (Assefa y Frostell, 2007, citado por: Stigka, et, al. 2014).

Dentro del marco del desarrollo sostenible existen diversos medios a partir del cual, dicho desarrollo puede llevarse a cabo; son lo que se conoce como fuente de **energía renovable**, para las cuales se encuentran las siguientes definiciones:

Twidell y Weir (2006, p.3) definen FER (fuente de energía renovable) como: *“La energía obtenida de las continuas o repetitivas corrientes de energía que se producen en el medio ambiente natural”*. El Diccionario de la Energía editado por Cleveland y Morris (2006, p.371) dice de la energía renovable es *“cualquier fuente de energía que se regenera de forma natural a través de una escala de tiempo corto y, o bien deriva directamente de la energía solar (energía solar térmica, fotoquímica y fotoeléctrica), indirectamente del sol (energía eólica, la energía hidráulica y la energía fotosintética almacenado en la biomasa), o de otros flujos naturales de energía (geotérmica, de las mareas, de las olas, y la energía actual).”* IPCC-GTIII (2007, p.814, Glosario) combina las anteriores dos citas: *“La energía renovable se obtiene de las corrientes continuas o repetitivas de energía que ocurren en el medio natural, e incluye tecnologías que no son de carbono, como la energía solar, la energía hidráulica, eólica, de mareas y las olas y el calor geotérmico, así como carbono - tecnologías neutras, como la biomasa.”* Esta definición puede ser aún más completa, mediante la adición de la idea de que algunas fuentes renovables pueden ser agotadas por la sobreexplotación (Verbruggen, et al, 2010).

Una FER se puede definir como: *“un simple recurso sostenible disponible en el largo plazo a un costo razonable que se puede utilizar para cualquier tarea sin efectos negativos”* (WWS, 2001; Dincer, 1999, citado por: Manzano, et al, 2013). Otros autores consideran una FER como: *“una fuente de energía limpia y que el uso óptimo de este recurso minimiza los impactos ambientales, produce residuos secundarios mínimos y es sostenible, basado en las necesidades*

económicas y sociales actuales y futuras” (Panwar, *et al*, 2011,citado por: Manzano, *et al*, 2013).

Las fuentes renovables de energía son aquellas que por su cantidad, en relación con los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas, son virtualmente inagotables, y su propio consumo no afecta el ambiente. (Estrada y Arancibia, 2010).

Las definiciones anteriormente citadas tienen distintos enfoques, mientras que algunos autores consideran las fuentes de energía renovable como un recurso propio de la naturaleza que se regenera por sí solo, otros mencionan que la sobre explotación podría causar su desaparición; así mismo otro enfoque que se le da a la definición de fuente de energía renovable es la de energía limpia, es decir, amigable con el ambiente en el que se desarrolla, lo que posteriormente atraerá muchas ventajas no sólo ambientales, sino económicas y sociales, un futuro sostenible para las generaciones venideras.

1.2 Ventajas y desventajas del uso de energías renovables.

Las tecnologías de energía renovables tienen tanto ventajas como desventajas. Las ventajas de en el uso de este tipo de recursos como productores principales de energía eléctrica incluyen los siguientes: (Longo, *et al*, 2008; Economou, 2010; del Río P, Burguillo M., 2009; Mourelatos, *et al*, 1998; Bakos, 2009 ; Zografakis, *et al*, 2010, citado por: Stigka, *et al*, 2014).

- Abordar las preocupaciones ambientales.
- Disminuir los costos de operación (que, a diferencia de los combustibles convencionales, no se ven afectados por el estado de la economía mundial).
- Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, seguridad energética.
- Confiabilidad de los sistemas eléctricos.
- Energía de calidad.
- Prestaciones para el turismo.
- Mejor calidad de vida.
- Conservación de los recursos naturales.
- Desarrollo local y la creación de nuevos puestos de trabajo.

En lo que corresponde a las desventajas se incluyen: (Zoellner, *et al* 2008; SK Varun, 2007; Zografakis, *et al*, 2010, citado por: Stigka, *et al*, 2014)..

- Cambios en la estética del paisaje y la intrusión visual de las instalaciones.
- Impactos en la flora y la fauna.
- Contaminación acústica.
- Altos costos de instalación

1.3. Perspectiva general de las energías renovables en el Mundo.

Los procesos de industrialización y desarrollo económico requieren de energía (Hernández, *et al*, 2010) (Citado por: Manzano, *et al*, 2013). Se espera que la demanda de energía aumente a un ritmo más rápido en los próximos años

(Tolón, *et al*, 2011; Manzano y Carrillo, 2011, citado por: Manzano, *et al*, 2013), en parte debido al crecimiento exponencial de la población mundial (Demirbas, 2008, citado por: Manzano, *et al*, 2013). Con este crecimiento poblacional, los requerimientos de energía primaria en el mundo deberán casi duplicarse hacia el año 2020. Para esta fecha más de 80% de la población mundial radicará en países de desarrollo. Las actuales inversiones en la materia no son consistentes con los retos que el sistema de suministro de energía está enfrentando. El enfoque centralizado para su generación no será capaz de suministrar a la mayor parte de la población mundial en forma económica. (Ruiz, 2010). Los recursos energéticos se han dividido en tres categorías: los combustibles fósiles, los recursos renovables y nucleares (Demirbas, 2000, citado por: Manzano, *et al*, 2013).

Los combustibles son el recurso principal de energía del mundo y son el centro de las demandas mundiales de energía (Cruz *et al*, 2012, Citado por: Manzano, *et al*, 2013). Sin embargo, las reservas de combustibles fósiles son limitados y su uso a gran escala está asociada con el deterioro del medio ambiente (Manzano, *et al*, 2010; Manzano, *et al*, 2012, citado por: Manzano, *et al*, 2013). Efectos negativos conocidos de la utilización de combustibles fósiles incluyen (Kalogirou, 2004, citado por: Manzano, *et al*, 2013), la lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono y el cambio climático global, (Manzano, *et al*, 2013) El protocolo de Kioto, firmado por México, convoca a la comunidad internacional a reducir la emisión de gas de efecto invernadero y promueve acciones públicas encaminadas hacia la transición a las energías renovables. En todo el mundo, el aumento del consumo, la liberalización de los mercados y la necesidad de adoptar medidas para combatir el cambio climático están generando nuevos desafíos para el sector energético. (Ruiz, 2010).

Hoy en día el crecimiento de los mercados en materia de energía renovable está dominada por unos pocos países a saber, Alemania, España, Estados Unidos, India, China, y Japón (REN21, 2009, citado por: Douglas, *et al*, 2011).

Por lo menos 56 países, incluyendo 21 países en desarrollo, tienen algún tipo de política de promoción de las energías renovables. Al menos 36 países y 10 estados/provincias han adoptado primas en las políticas; y por lo menos 38 estados de EE.UU. o provincias canadienses han promulgado políticas estándar de cartera renovable (RPS). Hay más de 4 millones de consumidores de energía verde en los Estados Unidos, Canadá, Australia, Japón y Europa. (Douglas, *et al*, 2011).

Los enfoques de políticas para las Tecnologías de energía renovable o de la energía en general y el cambio climático son multifacéticos, que van desde mecanismos de apoyo a la innovación a través del mercado. (Fischer y Newell 2008; Komor y Bazilian, 2005; Popp, 2010; Martinot *et al.*, 2007, citado por: Douglas, *et al.* 2011), son ejemplos en los que los autores articulan el amplio conjunto de enfoques que se han utilizado y pueden ser considerados para abordar tanto elementos tácticos como estratégicos, como la innovación, los derrames de conocimiento, desempeño, normas, cuotas y mecanismos fiscales. Mientras que la amplitud de políticas ha sido articulada integralmente, el centro se encuentra en los atributos necesarios para dichas políticas, como son: la previsibilidad, el nivel de campo de juego, y la inclusión de los impactos materiales dentro de las mismas (Douglas, *et al*, 2011).

Desde el punto de vista de las diversas perspectivas con las que se visualizan las energías renovables se pueden mencionar las siguientes: la primera es el posible hecho de que las energías renovables tomen un curso de crecimiento y desarrollo

y con el tiempo desplacen la producción de energía convencional, es decir, con la quema de combustibles fósiles. Otra perspectiva sugiere un avance mucho menos alentador para el mundo de las energías renovables e incluso señala el posible deterioro del suelo donde se implanten los sistemas de bioenergía o alteración a la flora y fauna de ciertos lugares, lo que hace que las políticas que apoyen este tipo de energías no se desarrollen y así su implantación sea dificultosa.

Por último, las energías renovables en todos los escenarios son impulsados por la demanda del consumidor, entre más flexibles, más conveniente, y más limpia será la energía. Pero los consumidores de energía tienen que ser plenamente conscientes de las necesidades y posibilidades si se ha de lograr un camino hacia el desarrollo sostenible. Eso debe de implantarse con la educación y una comunicación eficaz. Sin éstas, los consumidores de energía, como electores, serán incapaces de insistir en la necesaria voluntad política para el cambio. Como clientes, no pondrán el ingrediente esencial para la toma de decisiones para un negocio apropiado.

1.3.1. Una comparativa global entre las fuentes de energía renovables.

Según el informe de la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2011, citado por: Manzano, *et al*, 2013), la generación de electricidad a partir de fuentes renovables en todo el mundo en 1990 fue de 19.5% y creció en un promedio del 2.7% anual, mientras que la generación total de electricidad aumentó en un 3 % anual, y en 2008, el porcentaje de electricidad producida a partir de fuentes renovables fue del 18.5 %. (Manzano, *et al*, 2013).

En 2010, se estimó que la contribución de las diferentes fuentes de energía renovables a la producción total de energía fue: 16.6% de energía hidroeléctrica (grandes y pequeñas), 2.56% eólica, biomasa 1.95%, 0.67% geotérmica, 0.13% solar (fotovoltaica y solar térmica) y 0.01 % marino. (Glasnovic, 2011; EREC, 2006, citado por: Manzano, *et al*, 2013).

La figura 1.1, presenta los porcentajes de todas las revistas científicas en la base de datos ISI (Information Sciences Institute) relacionado con las investigaciones enfocadas al uso de energías renovables durante el período de 1979 a 2009. Cabe señalar que en los últimos 30 años, más de la mitad del esfuerzo global de investigación (56 %) se ha producido en relación con el uso de la biomasa como energía renovable, seguida de la energía solar, que fue más del doble (26 %) de la energía eólica (11%).

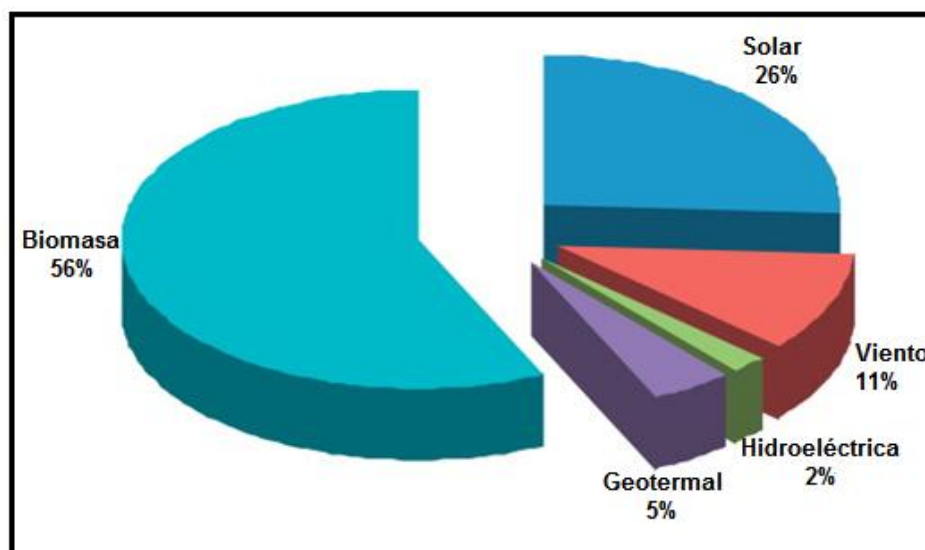


Figura 1.1. Distribución de las publicaciones científicas (1979-2009) por las energías renovables. (Manzano, *et al*, 2013)

A pesar de la gran variedad de energías renovables existentes, actualmente únicamente se les da particular importancia al uso de energía eólica, energía de

biomasa y energía solar; las energías solares en sus dos aplicaciones tecnológicas, han demostrado ser las más económicas para aplicaciones a gran escala comercial y por lo tanto la energía eléctrica puede ser generada a partir de energía solar, ya sea mediante el uso de energía fotovoltaica, o las tecnologías termo solares. Ambas son comercialmente viables.

También se han producido avances en la mejora de la tecnología y la reducción de los costos de algunas formas de energías renovables, como es la biomasa moderna, energía solar, energía fotovoltaica y eólica en particular, pero el ritmo es demasiado lento (16° Consejo Mundial de Energía, 1996). Esta lentitud se debe principalmente a que a pesar de las mejoras tecnológicas, éstas no están disponibles para cualquiera, lo que hace que el desarrollo se vea disminuido y aletargado.

1.4. Panorama general de las energías renovables en México.

1.4.1. México y su situación geográfica

En principio es importante hablar sobre la situación geográfica del país, pues a partir de ella, se pueden también identificar la gran cantidad de fuentes de energía renovable con las que cuenta, así como evaluar la disponibilidad y así determinar la manera en la que pueden aprovecharse.

México se encuentra entre los paralelos $21^{\circ} 43' 06''$ N, $14^{\circ} 32'27''$ S y las longitudes $86^{\circ} 42' 36''$ E $118^{\circ} 22'00''$ W. Limita al norte con los Estados Unidos, en el sureste con Guatemala y Belice, y al este y al oeste con el Océano Pacífico y el Golfo de México, respectivamente.



Figura 1.2. Ubicación de México en el mundo. (Cancino- Solorzano, et, al.2010)

Su situación geográfica la sitúa en una de las franjas de tierra con mayor radiación solar en el planeta. Del mismo modo, las corrientes en el Golfo de México y el Océano Pacífico influyen en las corrientes de aire que cruzan la parte más estrecha del Istmo de Tehuantepec, lo que es beneficioso para los importantes recursos eólicos.

El país tiene una gran diversidad de climas, desde el caliente (45°C en el desierto de Sonora) a lo muy frío (-20°C en algunas zonas de Chihuahua), aunque la mayoría de las temperaturas oscilan entre 15°C y 26°C . Otra de las características del país es su relieve "rugoso", con zonas montañosas, los puntos focales volcánicos, valles, llanuras y mesetas. Hay gran actividad tectónica y volcánica que da lugar a los depósitos hidrotermales para energía geotérmica y riqueza

mineral. Del mismo modo, ríos de corriente rápida y grandes lagos es significado de un importante potencial hidráulico. (Cancino, *et al*, 2010).

1.4.2. El sector eléctrico mexicano.

En México, el mercado de la electricidad está dividido en cinco regiones. El noroeste comprende los estados de Baja California Norte y Sur, Sonora y Sinaloa, al noreste los de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango y Tamaulipas. El centro-oeste está formado por los estados de Michoacán, Nayarit, Colima, Querétaro, Jalisco, Zacatecas, San Luís Potosí, Aguascalientes y Guanajuato. Los estados de México, Morelos, Hidalgo, D. F. Puebla y Tlaxcala son el centro. En el sur y sureste son Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Veracruz, Yucatán y Tabasco.



Figura 1.3. División del mercado eléctrico (Cancino-Solorzano, et.al. 2010)

El sistema eléctrico está basado en un *alto costo de combustibles fósiles con un suministro deficiente* (Cancino, *et al*, 2010). El sector eléctrico es responsable de al menos la tercera parte de emisiones de CO₂ en el país (Islas, *et al*, 2003) (Islas, *et al*, 2004). El uso de fuentes de energía renovable las cuales no ponen en peligro el balance ambiental, es una manera de resolver muchos de los problemas ambientales causados principalmente por el uso excesivo de combustibles fósiles. (Manzini, 1997, citado por: Ramírez, *et al*, 2000)

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), provee de energía eléctrica a la mayor parte del territorio nacional. El área central de México (incluyendo la Ciudad de México y su área metropolitana, con cerca de un quinto de la población del país) era servida por Luz y Fuerza del Centro (LFC), otra empresa estatal de electricidad (desaparecida en el año 2009). Estas dos empresas formaban el Sistema Eléctrico Nacional (NES), que actualmente suministra electricidad al 95% de la población. La población faltante es en su mayoría población rural que vive en zonas remotas, en pequeñas y dispersas comunidades de difícil acceso y que no tienen acceso a la red. (Huacuz, 2005).

La industria es el principal consumidor de electricidad y se puede dividir en las grandes industrias y las empresas de tamaño medio. Éstas últimas están autorizadas a producir su propio suministro eléctrico. Por subsectores, el consumo de la más alta a la más baja es la siguiente: vidrio, acero, cemento, química azúcar, minería, papel y celulosa, petroquímica, cerveza, agua embotellada, construcción, automóvil, plástico, aluminio, fertilizantes, tabaco y otros. En 2007, el consumo de electricidad fue de 106.62 TWh/año, 67.79TWh para las empresas medianas y 38.83 TWh para las grandes industrias.

El sector agrícola ocupa el 4.3% del consumo nacional de electricidad y se utiliza principalmente para las actividades relacionadas directamente con la agricultura y la ganadería. (Cancino, *et al*, 2010).

1.4.3. Combustibles fósiles en México.

México es uno de los exportadores de petróleo y sus derivados. La excesiva dependencia por las energías derivadas del petróleo crea muchos problemas ambientales. (Ramírez *et al*, 2000). Las actividades de exploración, perforación y extracción de petróleo crudo pertenecen a la nación, y son un monopolio nacional, Petróleos Mexicanos (PEMEX) es la empresa encargada de la explotación del recurso. En relación con el sector eléctrico, existen tanto las empresas públicas como privadas. Esto último se hizo posible gracias a los cambios introducidos en el marco regulatorio del sector eléctrico, lo que permitió la participación de la inversión privada, introduciendo así en la generación de electricidad factores tales como los productores independientes (IP), cogeneración, autoabastecimiento, importación y exportación. (Cancino, *et al*, 2011).

Entre 2000 y 2004, la producción anual de petróleo promedio (crudo, naftas y condensados) fue de más de 3,000 barriles por día. A partir de 2005 se produjo una ligera reducción en la producción de petróleo crudo y en 2008 se había reducido a 2,793 barriles por día, una caída de 8.3% respecto a la registrada en el año anterior (Secretaría de Energía, 2008). Al ritmo actual de producción de las reservas conocidas de petróleo se agotarán en 9.2 años y las de gas natural en 9.7 años. (Cancino, *et al*, 2010)

1.4.4. Instituciones, leyes y políticas mexicanas que apoyan el uso de energías renovables.

La combinación de el gran potencial de México en materia de energías renovables, junto con el deseo del sector industrial y los ciudadanos han llevado al gobierno a proponer un plan especial a gran escala de explotación de esas fuentes de energía. (Huacuz y Jorge M. 2001; Solórzano y Bernat 2007, citado por: Cancino, *et al*, 2010).

Las áreas con mayores aplicaciones para las energías renovables en México son la energía solar, fotovoltaica, eólica, energía geotérmica, materiales para energía renovable, planificación y economía energética, y últimamente los nuevos programas que usan el hidrógeno como fuente de energía para las celdas combustibles. En México hay muchas instituciones importantes, como universidades, centros de investigación, e industrias que trabajan en el desarrollo de la investigación y análisis de las fuentes de energía renovable. Las instituciones de mayor importancia involucradas en esto son:

- Centro de investigación de Energía, Universidad Nacional Autónoma de México (CIE-UNAM), Temixco, Morelos, México.
- Instituto de Investigación Eléctrica (IIE), Cuernavaca, Morelos, México que investiga la generación específica de energía no convencional e investiga el desarrollo de herramientas de ayuda a estas tecnologías no convencionales. (Cancino, *et al*, 2011)
- Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), Ciudad de México, México.
- Instituto Mexicano del Petróleo - División de Hidrógeno y Biogás (IMP), Ciudad de México, México
- Instituto de Física (IF-UNAM), Ciudad de México, México.

- Instituto de Ingeniería (II- UNAM), Ciudad de México, México.
- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Ciudad de México, México.
- Comisión Nacional de Ahorro de Energía (CONAE), Ciudad de México, México.
- Instituto Tecnológico Occidental para Estudios Superiores (ITESO) (Ramírez *et al*, 2000).
- El Comité Nacional para el uso eficiente de la energía (CONUEE) encargado de promover el uso de energías renovables y el ahorro energético.
- El Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), que ofrece orientación y apoyo técnico y ofrece servicios financieros para el ahorro de energía.
- El Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), que apoya los programas de desarrollo rural que integren el uso de estas tecnologías para las actividades agrícolas y económicas. (Cancino, *et al*, 2011).

Se ha generado en los últimos años un marco institucional favorable para las energías renovables tanto en los sectores público y privado. La Secretaría de Energía de México (SENER), ha construido instrumentos de política y de planificación para facilitar la introducción a gran escala de las energías renovables. Por ejemplo, se están elaborando planes de tecnología de energía renovable, mientras que las negociaciones con el FMAM (Fondo para el Medio Ambiente Mundial) y el Banco Mundial para establecer un "fondo verde" para promover el desarrollo de proyectos de energía verde están en sus etapas finales. Las nuevas organizaciones, como el Consejo Nacional para Fuentes de Energía Renovables (COFER) dentro del sector de la energía y el Consejo Mexicano para la Infraestructura Municipal (COMIA) en el sector del medio ambiente, han creado iniciativas público-privadas para asesorar al Gobierno sobre las estrategias para fomentar las energías renovables (Huacuz, 2004).

El Instituto de Investigación Eléctrica está trabajando en un programa especial con el objetivo de desarrollar una base de datos que incluya toda la información y contribuciones hechas en el campo del desarrollo de la energía renovable en el país. (Ramírez *et al*, 2000).

Las instituciones responsables de coordinar el trabajo del sector de la energía son:

- La Secretaría de Energía (SENER), el departamento de la energía es la institución gubernamental encargada de regular las políticas energéticas.
- El Consejo Regulador de la Energía (CRE): Comisión de Regulación de Energía es el principal organismo de regulación en el sector eléctrico y de gas.
- La Junta Federal de Electricidad (CFE): Empresa que genera, transporta, distribuye y suministra electricidad al Servicio Nacional de Electricidad (SENER, 2010; citado por: Cancino 2011)

Con la situación de los hidrocarburos que se ha planteado, lo importante para México son dos aspectos cruciales. Por un lado, el país no puede depender de un recurso que está declinado, y que el día de mañana haya que importar masivamente a precios altos. Las consecuencias económicas, financieras y sociales para el país serían devastadoras. Por otro lado, el país tiene la oportunidad de sacar provecho de los altos precios del petróleo para hacer inversiones inteligentes en el sector petrolero, en investigación y desarrollo, que prolonguen los beneficios de este recurso y permitan transitar hacia un matriz energética sustentable que contribuya al desarrollo nacional, basado en las fuentes renovables de energía que, como ya se dijo, existen abundantemente en México.

En 1992 se aprobó un nuevo reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, que en un principio no permite la libre compra de energía entre las instituciones privadas, pero esta modificación permitió la participación del sector privado destinada a aumentar la capacidad instalada en ciertos modos: productores independientes, de autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción, importación y exportación. Los primeros fueron los que recientemente han desarrollado proyectos en relación con las energías renovables.

La política energética está regulada por la Secretaría de Energía (SENER). Su departamento ha elaborado varias leyes relativas a la energía: la Ley Orgánica de Administración Pública Federal, la Ley de la Comisión de Regulación de la Energía, Reglamento Interno de la Secretaría de Energía, resoluciones Interiores para la Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía y de las normas de las autoridades mexicanas con respecto a los asuntos de la electricidad, la eficiencia energética, el gas natural, la eficiencia térmica y la seguridad nuclear (Comisión reguladora de energía, 2008; citado por: Cancino 2010)

En este contexto, el gobierno mexicano empieza a dar los primeros pasos hacia un cambio de paradigma energético. En noviembre de 2008 publicó la Ley para el aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. Obligado por esta ley, en julio de 2009 se publicó la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, y más recientemente, en septiembre de 2009, el Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables. Hay que reconocer que aunque estas iniciativas llegan tarde y son limitadas, si se comparan con lo que otros países están haciendo, representan un primer paso en la dirección de generar una visión del estado en la materia. Dicha visión del Estado debe incluir necesariamente el diseño de un plan estratégico de investigación, desarrollo

tecnológico y formación de recursos humanos en el sector, que esté a la altura de los retos del país. (Estrada, 2010).

En la actualidad también se trabaja con proyectos enmarcados dentro del concepto “Mecanismo de Desarrollo Limpio” (MDL). El Mecanismo de Desarrollo Limpio es un procedimiento contemplado con el protocolo Kioto en donde países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de países en desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables a cumplir con su compromiso de reducción propio.

El mecanismo de Desarrollo Limpio es regulado y supervisado por el Consejo Ejecutivo de MDL de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Hasta a mediados de octubre del 2007 la cartera de proyectos del COMEGEI, con cartas de no objeción y cartas de aprobación, consiste en los siguientes proyectos mexicanos del MDL con Cartas de Aprobación:

Tabla 1.2. Proyectos mexicanos del MDL. (COMEGEI, 2007. SUBSECRETARIA DE PLANEACION Y POLITICA AMBIENTAL, SEMARNAT)

Tipo de Proyectos	Núm. de Proyectos	Ubicación	Reducciones de CO ₂ equivalente (kt/año)
Manejo de residuos en granjas de porcinos	88	Aguascalientes, Chihuahua, Chiapas, Coahuila, Durango,	2 507

Tabla 1.2. Proyectos mexicanos del MDL. (COMEGEI, 2007. SUBSECRETARIA DE PLANEACION Y POLITICA AMBIENTAL, SEMARNAT) (CONT.)

Tipo de Proyectos	Núm. de Proyectos	Ubicación	Reducciones de CO ₂ equivalente (kt/año)
Manejo de residuos en granjas de porcinos	88	, Edo. México, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nuevo León, Nayarit, Puebla, Querétaro, Sinaloa, San Luis Potosí, Sonora, Oaxaca, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán	2 507
Manejo de residuos en establos de ganado vacuno	54	Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Guanajuato, Durango, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Querétaro, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala	941
Manejo de aguas residuales	1	Sonora	10
Energía eólica	8	Baja California, Oaxaca	2216
Hidroeléctricos	4	Guerrero, Jalisco, Michoacán, Oaxaca	161
Incineración de HCF-23	1	Nuevo León	2 155
Mitigación de N ₂ O en la industria química	1	Veracruz	103
Cogeneración y eficiencia energética	9	Edo. México, Hidalgo, Michoacán, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Quintana Roo, Veracruz	703
Emisiones fugitivas	2	Coahuila, Veracruz	665
Transporte	1	Distrito Federal	24
Total	178		10 595

El número de organizaciones no gubernamentales que promueven las energías renovables está aumentando. Ellos están ayudando a crear conciencia entre la sociedad e inducir a las generaciones más jóvenes a considerar las energías

renovables como una ruta de energía alternativa. ANES, el capítulo mexicano de la Sociedad Internacional de Energía Solar (ISES), representa un caso especial, ya que ha estado activo en el campo por más de 25 años. Un creciente número de agencias extranjeras, incluidas las organizaciones bilaterales y multilaterales, también trabajan en la promoción de las energías renovables en México. Varias Instituciones mexicanas participan en el desarrollo de las energías renovables. La implementación de los Acuerdos de la Agencia Internacional de la Energía y colaborar con el Grupo de Trabajo de Energía Renovable. México es también un miembro activo de los grupos de trabajo de la energía renovable del Foro Asia-Pacífico (APEC), el Grupo de Trabajo de Energía de América del Norte (NAEWG) y el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Acuerdos bilaterales de cooperación Sur-Sur y Norte-Sur sobre las energías renovables han sido firmados con varias naciones.

En la actualidad, la CFE está analizando la posibilidad de instalar alrededor de 3.2 GW de fuentes renovables (eólica, hidráulica y geotérmica). Para la modalidad de auto-consumo con respecto al uso industrial y alumbrado público, ya hay proyectos eólicos e hidráulicos, así como para la obtención de biogás producido por la digestión anaerobia de los residuos sólidos urbanos y el estiércol (Cancino, *et al*, 2010). Sin embargo, a pesar de lo ya dicho y del reciente debate nacional sobre la llamada “reforma energética”, sigue existiendo en el país una gran ignorancia en el tema, particularmente de los desarrollos y la investigación que se realiza en México. (Estrada, 2010).

1.4.5. Visualización de un México usando energías renovables.

En 2008 la producción de energía primaria era 10,522 PJ (SENER y SIE, 2008 y 2010) la generada de aceite constituía un 89.9%, la energía hidráulica un 4.4%, la biomasa un 3.3% y por carbón un 2.4%.

Solo como un ejemplo de la abundancia de las fuentes de energías renovables, basta decir que la energía solar recibida cada diez días sobre la superficie de la tierra equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas. En México hay un potencial energético de energías renovables realmente enorme, particularmente la solar. Con solo una superficie aproximada de 4, 225 km², que bien podría ubicarse en los Estados de Sonora o Chihuahua (los de mayor insolación), y usando tecnologías termo solares de potencia y celdas fotovoltaicas existentes, considerando factores de planta del 25%, se podrían instalar aproximadamente 50 GW que actualmente tiene el país para satisfacer las necesidades del fluido eléctrico. Después del solar, el eólico, la biomasa, la geotermia y la oceánica, son los recursos que se consideran más abundantes en el país.

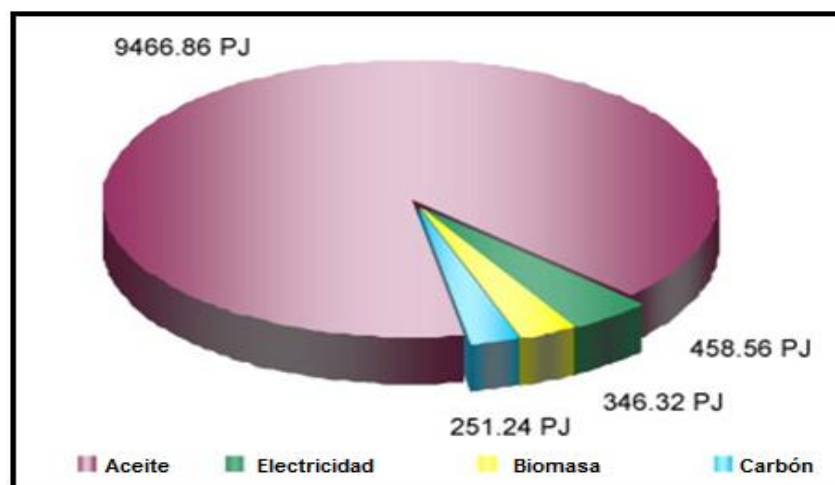


Figura 1.4. Producción de energía primaria en México en 2008 (Cancino et al, 2010)

Varios países del mundo han reconocido lo anterior y ya desde hace varias décadas vienen haciendo investigación científica y tecnológica para aprovechar las energías renovables, y trabajando en la implementación de políticas y programas para uso masivo. Gracias a ello, el costo de las tecnologías que usan las fuentes de energías renovables se han reducido significativamente y se ha generado un mercado mundial creciente de dichas tecnologías que en el 2008 fue de 120 millones de dólares, y continúa creciendo.

Se realizó un estudio en el que se muestran tres panoramas o alternativas distintas para México con el fin de reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera, y seguir generando la energía que el país requiere tanto en la actualidad como en el futuro; la primera de ella es el uso de aceites combustibles, el segundo sugiere el uso de gas natural como fuente de energía y el tercero está más enfocado al uso de energías renovables.

Tabla 1.3. Hipótesis empleando el escenario 3 que muestra el uso de las energías renovables usado por cada sector y su tasa de crecimiento anual. (Manzini e Islas, 2001)

Sector	Tasa de crecimiento anual
Residencial	
Colectores solares de placa plana	18%
Hidrógeno	20%
Transporte	
Metanol	26%
Hidrógeno	24%
Industrial	
Foto térmica solar	17%
Metanol	19%
Hidrógeno	22%

Tabla 1.3. Hipótesis empleando el escenario 3 que muestra el uso de las energías renovables usado por cada sector y su tasa de crecimiento anual. (Manzini e Islas, 2001) (Cont.)

Sector	Tasa de crecimiento anual
<i>Auto-consumo de energía</i>	
Foto térmica solar	15%
Fotovoltaica solar	23%
Hidrógeno	28%
Metanol	28%

Tabla 1.4. Hipótesis empleando el escenario 3, que muestra el uso de energías renovables usando su tasa de crecimiento anual en el sector energético. (Manzini e Islas, 2001)

Sector energético	Tasa de crecimiento anual
Metanol	26%
Hidroelectricidad	2.90%
Micro-Hidroelectricidad	43%
Fotovoltaica solar	24%
Foto térmica solar	39%
Residuos sólidos municipales	39%
Biomasa	39%
Celdas combustibles de hidrógeno	40%

El estudio fue analizado desde 1995 y proyectado a 2025 en éste puede observarse que los mejores resultados para alcanzar el objetivo de producir la menor cantidad de emisiones contaminantes a la atmósfera fue el enfoque número 3. El consumo de energías renovables cuenta con una tasa de crecimiento anual de 7.2% y el uso de hidrógeno incrementa con una tasa de crecimiento anual de 22%, así las energías renovables cuentan con el 31% del total de la energía en el

sistema contribuyendo con el 43.5% de la capacidad instalada. (Manzini e Islas, 2001).

Ahora bien en cuanto a las emisiones producidas en cada alternativa para fines de mejora ambiental la tercera opción sigue siendo la más factible puesto que la producción del metano es de 17% menos que el escenario, mientras que las emisiones del CO₂ son 32% menores considerando el mismo escenario base (del año de 1995) (Manzini e Islas, 2001).

Lo que significa que con el escenario 3 (uso de energías renovables) es posible tener un crecimiento económico y alcanzar un nivel constante de emisiones en menos años, y continuando con la misma tasa de crecimiento económico y fuentes renovables también las emisiones del nivel de CO₂ pueden disminuir. (Manzini e Islas, 2001).

A pesar de que las emisiones de productos que favorecen a la lluvia ácida como son el monóxido de nitrógeno (NO_x) y el óxido de azufre (SO_x) nos son totalmente óptimos con el uso de energías renovables, esto no impacta tanto como la reducción de los principales gases que producen el efecto invernadero.

El resultado favorable mostrado en el escenario 3 muestra que el uso de energías renovables es la mejor elección de política energética para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero. El resultado sugiere realizar una revisión técnica y económica del potencial de los recursos de energía renovable en México, y es necesario realizar y mejorar las políticas con respecto a energía y ambiente, las cuales pueden permitir un desarrollo sustentable. (Manzini e Islas, 2001).

El hecho más importante que limita el crecimiento y utilización de sistemas con fuentes de energía renovable son la no tan buena situación económica del país, ausencia de buena planeación y transferencia de tecnología y el sector de la inversión privada. (Ramírez et al, 2000).

La energía verde ofrece beneficios potenciales a México, más allá de kW y kWh, y las buenas perspectivas para el desarrollo sostenible. La energía verde es ambientalmente adecuada y puede ayudar a resolver los difíciles problemas recurrentes locales en el ámbito ambiental, por ejemplo, el uso de los residuos sólidos urbanos como combustible, lo que reduce el problema de la disposición final, o recuperar tierras ya deforestadas para la producción de cultivos energéticos. En la dimensión social, las energías renovables son a menudo la única posibilidad razonable de la prestación de servicios con base en la electricidad a comunidades remotas, mejorando la calidad de vida y facilita el desarrollo económico local a través de proyectos productivos. En los sectores urbanos e industriales, las energías renovables pueden constituir una "fuerza democratizadora" alejarse de formas centralizadas de suministro de energía: donde los individuos y las empresas puedan generar su propia energía y por lo tanto contribuir financieramente a la creación de la infraestructura energética. Proyectos de energía verde más grandes pueden atraer nuevos capitales privados para construir nueva capacidad de generación. Las tecnologías de energía verde se encuentran dentro de las capacidades existentes de la industria mexicana y representan una buena oportunidad para que la participación en este nuevo mercado de la tecnología de energía. Esto significa nuevos puestos de trabajo, nuevas formas de negocio de la energía y la reactivación de las industrias estancadas.

El uso de las energías renovables puede ayudar a prolongar la vida útil de las reservas de petróleo y de gas natural nacionales, reduciendo al mismo tiempo el

índice de intensidad de carbono de la economía. Esto pondrá a México en una buena posición para cumplir las obligaciones ambientales internacionales y beneficiarse de los mecanismos económicos derivados del Protocolo de Kyoto, el cual a su vez puede pagar en beneficios políticos, tanto en casa como en el extranjero. La cuestión es cómo avanzar de una manera estratégica para que todos estos beneficios potenciales se hagan realidad (Huacuz, 2005)

A continuación se tratarán con más detalle cada una de las energías renovables existentes, y el papel que juegan en nuestro país.

1.5. Energía Eólica

La utilización de la energía del viento es muy antigua. La historia se remonta al año 3,500 antes de nuestra era cuando los sumerios armaron las primeras embarcaciones de vela. Los egipcios construyeron barcos hace al menos cinco mil años para navegar por el Nilo, y más tarde por el Mediterráneo. Después los griegos construyeron máquinas que funcionaban con el viento. Así, desde la antigüedad éste ha sido el motor de las embarcaciones.

La información más fehaciente sobre la utilización de la energía eólica en la molienda apunta a Persia, en la frontera Afgana, en el año 640 de esta era. Otras fuentes históricas, fechadas unos cuantos años más tarde, muestran que los chinos también utilizaban la energía del viento en ruedas con paletas y eje vertical para irrigar o drenar sus campos de arroz. Algunos países de Europa utilizaban molinos de viento, pero de eje horizontal, tales molinos se empleaban ya en el año de 1980 en Normandía (Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

Alrededor de 1900, los molinos de viento se utilizaban típicamente para molienda y bombeo de agua. Por primera vez en dicha fecha el inventor danés Poul la Cour realizó experimentos con molinos de viento típicos de Dinamarca para generar electricidad. Así la electrificación rural de Dinamarca creó el primer mercado de generación eléctrica a partir del viento (Burton *et al*, 2001; Maxwell *et al*, 2002; Haus, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

Si bien los sistemas de generación eoloeléctrica presentaron un desarrollo importante durante las primeras décadas del siglo XX. Actualmente, entre las fuente renovables de energía, la eólica es la de mayor crecimiento (Manwell *et al*, 2002, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

1.5.1. El viento

La energía eólica es consecuencia de la energía que irradia el Sol hacia la Tierra: alrededor de 174 billones 423 mil millones de kWh por día. Es decir, en una hora la Tierra recibe 1.74×10^{17} watts de potencia, que equivale aproximadamente en promedio a 680 watts por metro cuadrado en la región iluminada. Tan solo 1% de dicha energía se transforma en energía eólica, y esto supone una energía alrededor de 50 a 100 veces superior a la que todas las plantas de la Tierra convierten en biomasa.

La rugosidad del terreno y los obstáculos adyacentes influyen en la velocidad del viento, tanto en su rapidez como en su dirección. Un parámetro para caracterizar la topología del terreno, además de que sea plano o escarpado, es su factor de

rugosidad, que describe que tan fácilmente pasa el viento sobre el terreno (AWS Scientific, 1997, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

Para cualquier proyecto de desarrollo eólico se necesita de la evaluación del recurso disponible. Para realizar esto se emplean anemómetros y veletas, para registrar tal rapidez y dirección del viento, respectivamente. Estos dispositivos de medición son colocados a diferentes alturas respecto al nivel del terreno, desde 10 hasta 80 metros de altura. Es práctica común utilizar los datos tomados cada segundo y promediados cada 10 minutos, ya que las variaciones en la rapidez del viento con períodos mayores que un segundo y menores que 10 minutos presentan un carácter aleatorio, y se considera que son turbulencia. Para las aplicaciones de la energía eólica, las fluctuaciones de turbulencia en el flujo deben ser cuantificadas para diseñar la turbina sobre la base de consideraciones de carga máxima, fatiga estructural, control, operación del sistema y calidad de la potencia generada (AWS Scientific, 1997, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

Los datos de vientos observados en una estación anemométrica se pueden extrapolar a una región a través de metodologías de evaluación de escala media (meso escala) que son probadas y validadas con mediciones puntuales. La misma metodología, aplicada inversa, permite la estimación de sistemas de micro escala. Si no se cuenta con datos anemométricos de alta calidad, el comportamiento regional se determina mediante los modelos de meso escala en una red regular de puntos con espaciamiento de 2 a 5 kilómetros.

El área de tales modelos puede ser de 500 por 500 kilómetros cuadrados. Los modelos de gran escala (macro escala) son importantes para determinar las condiciones de grandes zonas ventosas. Estos modelos se han utilizado para generar mapas eólicos de cobertura mundial o continental que permiten

desarrollar modelos de circulación general de la atmósfera, ignorando los efectos de factores locales como topografía, naturaleza y uso del suelo, efectos de temperatura local, etc. Los modelos de macro escala también se han utilizado para estimar la magnitud del viento en micro escala, utilizando los datos medidos disponibles y aplicando la ley de arrastre geostrófico. Se dice que una de las ventajas de este método es que se puede aplicar a cualquier área, ya que las bases de datos son mundiales. Así mismo, se dice que otra ventaja es que la base de datos tiene más de 15 años de información. La gran desventaja de este método es que su resolución es del orden de cientos de kilómetros, y no resulta confiable para la estimación puntual del recurso eólico en una determinada localidad.

En la práctica, la energía producida por un aerogenerador se estima sobre un año típico de funcionamiento. La estimación implica la reducción estadística de los datos de viento a través de la función de densidad de probabilidad de WEIBULL (Burton *et al*, 2001, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010), o algún otro tipo de distribución que sea representativo. Es importante indicar que las distribuciones de las velocidades del viento en la mayoría de los casos son sesgadas; es decir no son simétricas. A veces tendrá velocidades muy altas, pero son muy raras. Así que la distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro globo. Por tanto, la distribución de Weibull o alguna otra pueden variar tanto en la forma como en el valor medio (AWS Scientific, 1997, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

La mayoría de las turbinas de viento instaladas hoy en día tienen tres rotores en forma de pala, debido a que con este diseño es más fácil controlar las cargas mecánicas y porque la gente percibe los tres rotores con un mejor balance visual que si únicamente tuviera una o dos. Los rotores son usualmente hechos de plástico y tienen más de 60 metros de longitud a lo largo de las turbinas.

Tres conceptos diferentes están disponibles, para la regulación de la potencia de salida del aire. Sus cuchillas fijas rígidamente causan una regulación de la velocidad del rotor por pérdida aerodinámica con turbinas diseñadas para pararse por encima de una determinada velocidad del viento. Incluso si la velocidad del viento aumenta aún más, el rendimiento del rotor se mantendrá casi constante. En el rango de megavatios, está el diseño de la turbina cuchilla controlada (también se conoce como control de paso). En estos sistemas, las palas de rotor son capaces de girar alrededor de su eje longitudinal. Aunque las turbinas de paso controlado son más complicadas de construir, su eficiencia de energía es mayor, con menos estrés en rotores que en el caso de las turbinas de puesto regulado. Controles de puesto activo es un compromiso entre los dos conceptos, en los que las palas del rotor se pueden ajustar ligeramente según la velocidad del viento después de alcanzar su potencia nominal o máxima. Mediante el ajuste de la velocidad del rotor para que coincida con la aerodinámica del mismo, una turbina de viento puede ser operado con una eficiencia óptima en un amplio rango de velocidades del viento. Dado que el control y la consistencia de la salida de potencia son de gran importancia particularmente para las grandes turbinas, el número de turbinas con una velocidad variable del rotor se ha incrementado significativamente en los últimos años (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011)

1.5.2. Impactos del uso de energía eólica

1.5.2.1. Económico y social.

Del costo de inversión de una central eoloeléctrica, cerca del 75% corresponde al de los aerogeneradores (máquina eólica y torre), 14% al sistema eléctrico, la obra civil corresponde al 6% y el resto a licitaciones y permisos 1%, desarrollo en ingeniería 1%, gestión 1% e imponderables 2%. Actualmente, los costos e inversión de las grandes centrales eólicas es de 1,200 a 1,800 dólares por kW de potencia instalada (Burton *et al*, 2001; Manwell *et. al*, 2002; Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010). Durante los últimos cinco años los precios aumentaron considerablemente; así mismo, la demanda comercial se incrementó al grado que los tiempos de entrega de aerogeneradores para nuevos proyectos superan los tres años. La actual crisis económica mundial está ocasionando que haya mayor disponibilidad comercial de aerogeneradores, aunque aún no se observa que los precios están disminuyendo.

El mayor beneficio económico por la construcción de centrales eólicas está asociado con la producción industrial de los subsistemas, componentes e integración de los mismos. El mayor beneficio social, la generación de nuevos empleos, está supeditado a que el país desarrolle una industria eólica propia. El número de empleos directos en la fabricación de aerogeneradores para una central eoloeléctrica típica de 25 MW es de alrededor de 125 y por cada empleo directo se crean entre cinco y siete empleos indirectos.

El costo nivelado de producción de electricidad depende del factor de planta (la relación entre la energía eléctrica generada y la energía que el sistema hipotéticamente generaría si opera el 100% del tiempo a su capacidad nominal) y los costos asociados a su operación y mantenimiento (Burton *et al*, 2001; Manwell *et al*, 2002; Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010). Para algunos proyectos, este costo de producción resulta competitivo en comparación con los costos de algunos sistemas convencionales de energía; por supuesto, la competitividad económica entre proyectos sólo puede determinarse caso por caso.

Los aerogeneradores modernos están diseñados para trabajar alrededor de 120,000 horas de operación a lo largo de su tiempo de vida de diseño, que es de 20 años. Esto supone mucho más que un motor de automóvil, que dura generalmente alrededor de 4,000 a 6,000 horas. Durante su vida útil producen entre 40 y 80 veces la cantidad de energía usada en su construcción (Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

La figura 1.5, muestra cuatro tipos de plantas o centrales eoloeléctricas conocidas también como “granjas de viento”. Las centrales eoloeléctricas se desarrollan, ya sea tierra adentro en superficies planas, cerca de la costa, fuera de la costa o bien tierra adentro en lugares escarpados. Los costos asociados a cada una de estas configuraciones son diferentes. Los mayores costos corresponden a las granjas de viento fuera de la costa, y los que resultan con menores costos asociados son los de tierra adentro con superficies planas donde se puede construir una retícula bien definida y la inversión de obra civil no resulta muy alta.



Figura 1.5. Plantas eoloeléctricas: 1) Tierra adentro en superficies planas; 2) Tierra adentro en lugares escarpados; 3) Cerca de la costa; 4) Fuera de la costa, (Jaramillo y Borjas; 2010).

1.5.2.2. Ambiental

El uso de la energía eólica reduce la emisión de gases de efecto invernadero y permite mitigar el calentamiento global por la disminución de dióxido de carbono (CO₂). Las centrales eólicas consumen muy pequeñas cantidades de agua y no emiten óxidos de nitrógeno, ozono, partículas ni otros tipos de sustancias dañinas al medio ambiente.

Además el uso de suelo de una central es aproximadamente de 1, por lo que las actividades agropecuarias pueden proseguir su curso sin mayor inconveniente (Burton *et al*, 2001; Manwell *et al*, 2002; Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010). .La contaminación por ruido es poco significativa, ya que típicamente un aerogenerador a 350 metros de distancia produce el mismo nivel de ruido que una noche en el campo abierto, entre 35 y 40 decibeles audibles (Burton *et al*, 2001; Manwell *et al*, 2002; Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010). Con respecto al impacto visual, las centrales eólicas son visibles a varios kilómetros de distancia, y para algunos países existen marcos regulatorios, para evitar la contaminación visual sobre todo en zonas turísticas (Burton *et al*, 2001; Manwell *et al*, 2002; Hau, 2005, citado por: Jaramillo y Borjas, 2010).

1.5.3. Potencial de energía eólica en México

En materia de energía eólica, se publicaron en diciembre de 2006 el Reglamento Oficial Mexicano la NOM-151- SEMARNAT- 2006. Establecen las especificaciones técnicas para la protección del medio ambiente durante la construcción, operación y abandono de instalaciones de energía eólica, de ganado

y terrenos baldíos en zonas agrícolas (DOF, 2006, citado por Cancino, *et al*, 2011).

La energía eólica y de acuerdo a los nuevos avances tecnológicos y las investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE), México tiene un potencial eólico, estimado de la energía que ocupa entre 3000 y 5000 MW, lo que representaría 10% de la capacidad instalada actualmente en todo el país (CONUEE, 2010, citado por Cancino, *et al*, 2011).

Evaluar las fuentes de energía eólica, es una meta importante en países que necesitan crecimiento energético (Nielsen *et al*, 2007, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010) El mayor problema de la energía eólica es su improductividad y la variabilidad de energía que puede ser aprovechada en un determinado momento. Estos han causado problema para los operadores en los sistemas eléctricos (Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). En suma a que la topografía y las diferentes áreas donde el viento podría ser más favorable, su aprovechamiento puede ser variado. (Ammari y Maaitah, 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010).

El territorio mexicano cuenta con áreas donde las fajas de tierra se vuelven estrechas y como resultado están rodeados por grandes masas de agua. Por lo tanto, hay zonas donde la diferencia de presiones entre las bolsas de aire frío de los mares y las bolsas de aire caliente sobre la tierra seca se originan las ráfagas de viento con velocidades óptimas y densidades que se utilizarán de manera eficiente como una fuente de energía renovable (Cancino, *et al*, 2011).

Hasta la fecha diez áreas han sido identificadas donde el recurso eólico es bastante abundante. Los estudios llevados a cabo por el Laboratorio de Energía Renovable del Departamento de Energía, la CFE EE.UU. y varias instituciones mexicanas han estimado el potencial eólico de más de 40,000 MW en México, distribuidos a lo largo de la península de Baja California, en la región central, región de la costa del golfo, la península de Yucatán y el Istmo de Tehuantepec. (Cancino, *et al*, 2011).

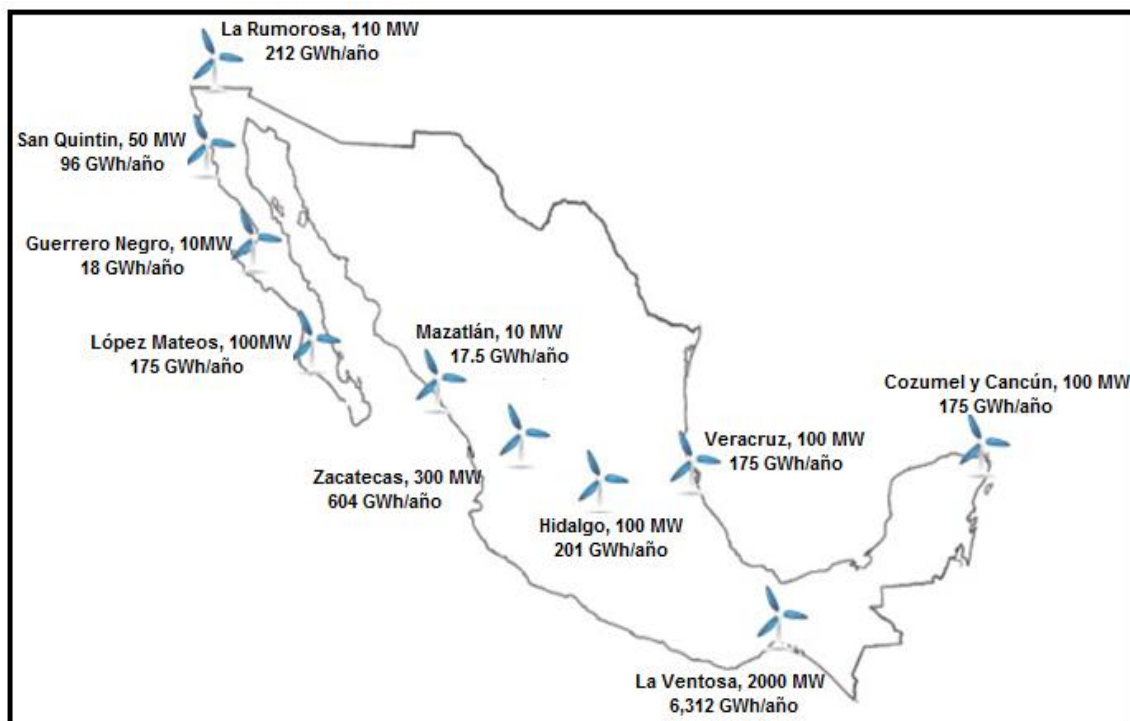


Figura 1.6. Zonas con alto potencial de viento en México. (Cancino, *et al*, 2011).

Numerosos estudios en energía eólica han estado concentrados en la velocidad del viento y en el número de horas en que el viento pueda producir energía eléctrica (con una velocidad de 3 a 21 m/s). Ciertamente las áreas eólicas necesitan ser instaladas en áreas que produzcan más que 1,700 horas de utilidad eólica por año. (Albadi y Blanco, 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). En México los estudios de estado (más bien nacionales) la escala examinada se basa en la velocidad del viento, por ejemplo, un estudio estadístico

acerca de la velocidad del viento para el año 2007 y 2008 fue realizado por el estado de Veracruz (Cancino y Bernat, 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010), y un estudio para predecir la velocidad y dirección del viento en Enero de 2008 fue realizado por el estado de Oaxaca utilizando datos obtenidos para un periodo de 7 años. (Cadenas y Rivera, 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010). El promedio de las velocidades del viento se ha estado produciendo al Norte de México, en la región del Istmo de Tehuantepec, es una de las mejores regiones a escala mundial para la generación de electricidad a partir del viento (Cancino, *et al*, 2010), el cual ha sido medido diariamente con velocidades de 7 m/s, esto estimó que las turbinas pueden generar arriba de 2000 kW por año (Denver Colorado, 2009, citado por: Hernández-Escobedo, *et al*, 2010),.

Actualmente la CFE cuenta con tres parques eólicos que se encuentran en operación. El más grande es **La Venta II**, con una potencia de 83 MW. El segundo es el **parque Guerrero Negro** ubicado en el sur de Baja California, con una capacidad de 0.6 MW y la tercera es **La Venta I** con 1.5 MW. (Cancino, 2011). La Venta II se compone de 98 aerogeneradores con 83 MW fue la mayor contribución de este tipo de energía en 2007 en México. Es hoy el parque eólico de mayor potencia en el conjunto de Iberoamérica (Gobierno Federal, 2008, citado por Cancino, 2011). Lo que coloca a México como el segundo país en América Latina en energía eólica instalada (402 MW) sólo por detrás de Brasil con 600 MW (WWEA, 2010; Gobierno Federal, 2007; Cancino y Bernat, 2007; Cancino, *et al*, 2008; GWEC, 2007, Citado por: Cancino, *et al*. 2011)

Actualmente en México ya han iniciado las aplicaciones comerciales de la generación eoloeléctrica, particularmente en la modalidad de centrales eólicas interconectadas a red, como es el caso de la central eólica la Venta II, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Se anticipa que el crecimiento de la capacidad eoloeléctrica que se instalará en los próximos cuatro a cinco años será superior a

2,500 MW; la gran mayoría de ellos a instalarse en la zona eólica del Istmo de Tehuantepec. En la figura 1.7 se muestra las centrales eoloeléctricas La Venta I, con una capacidad de 1.5 MW, y la central la Venta II, con capacidad de 83.3 MW.



Figura 1.7. La venta I, La venta II (Jaramillo y Borjas; 2010).

El recurso eólico de México aún no ha sido cuantificado con precisión; sin embargo, con base en mediciones de superficie y en algunos mapas eólicos, se sabe que el recurso eólico del país es abundante y que pueda superar al de varios de los países que hoy son líderes en generación eoloeléctrica. Diversas fuentes citan cantidades diferentes en relación al potencial eoloeléctrico de México (es decir, la cantidad de potencia eólica en megawatts que podría instalarse; o bien, la

cantidad de energía eléctrica que podría generarse para contribuir a la demanda de electricidad en todo el país). En realidad en un momento dado, el potencial eoloeléctrico de cualquier país es una combinación entre el recurso eólico disponible y el aprovechable en términos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

La Figura 1.8, muestra un mapa de México en el cual se representan las medidas tomadas de la velocidad del viento superiores a 3m/s, la cual se considera la velocidad mínima para instalar un parque eólico.

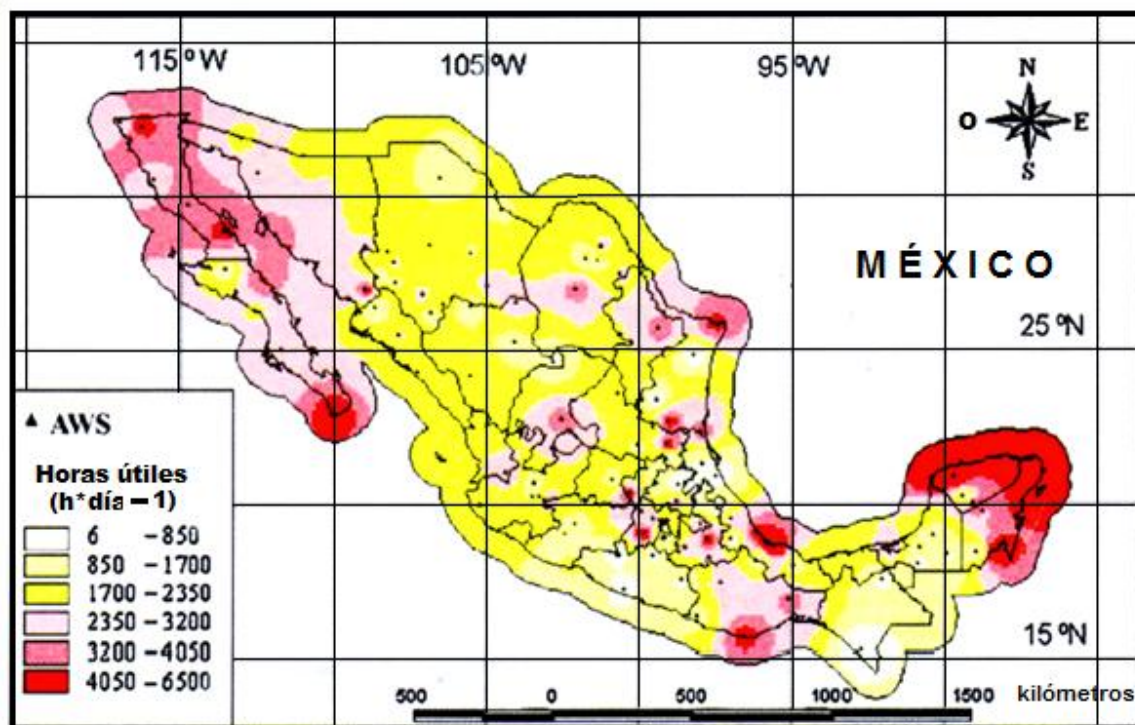


Figura 1.8. Generación de horas (Hernández-Escobedo et al; 2010)

1.6. Energía Solar

Lejos de ser una alternativa ingenua y poco costeable, la energía solar es una de las pocas opciones realistas cuya utilización no implica la destrucción del entorno. (Arancibia y Best, 2010)

El sol es la fuente de energía que mantiene vivo al planeta Tierra. Emite continuamente una potencia de 62,600 kilowatts por cada metro cuadrado de su superficie. Esto ha venido ocurriendo a lo largo de 4,500 millones de años, y se estima que continuará así por otros 5,000 millones más, lo cual, en términos de la existencia que ha tenido la humanidad, prácticamente ilimitado. De hecho, en un período de tan sólo dos días, el planeta recibe una cantidad de energía equivalente a todas las reservas probadas que existen de petróleo, gas y carbón. Esto equivale a cerca de 60 veces el consumo anual de la sociedad humana, lo cual da una idea del potencial impresionante que tiene la energía del sol para satisfacer las demandas energéticas del mundo.

Los primeros registros escritos de la utilización de la energía solar provienen de los antiguos griegos, romanos, y chinos. (Arancibia y Best, 2010). En el renacimiento, la idea de usar el calor solar para la industria química y la cerámica despertó mucho interés (Arancibia y Best, 2010). En términos generales, las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar pueden clasificarse en solares térmicas y solares fotovoltaicas (Arancibia y Best, 2010).

1.6.1. Energía solar Térmica

La “caja caliente” es un invento del siglo XVIII cuya herencia en la tecnología solar ha perdurado hasta la actualidad. Desde antaño se conocía la capacidad del vidrio para retener el calor en habitaciones e invernaderos. En 1767

un científico francés llamado Horace de Saussure decidió construir un dispositivo experimental pequeño para estudiar este fenómeno. Su modelo consistía en una caja con fondo negro, aislada con lana por sus costados y cubierta por arriba con una tapa de vidrio. De manera sorprendente, al poner este dispositivo al sol pudo medir temperaturas interiores de hasta 120°C. Se alcanza una temperatura tan alta debido a que el vidrio es transparente a la luz solar; ésta lo atraviesa y calienta el interior de la caja, pero a la vez evita el escape del calor, provocando algo similar al “efecto invernadero”. El vidrio actúa de dos maneras: en primer lugar, no permite que el aire caliente del interior de la caja ascienda a la atmósfera y se lleve energía; en segundo, reduce el escape de energía en forma de radiación infrarroja emitida por la superficie caliente, ya que el vidrio no es transparente a este tipo de radiación. (Arancibia y Best, 2010)

El concepto de la caja caliente es también la base del funcionamiento del dispositivo solar más usado en el mundo actual: el calentador solar plano para agua. Como se muestra en la figura 1.9. (Arancibia y Best, 2010).

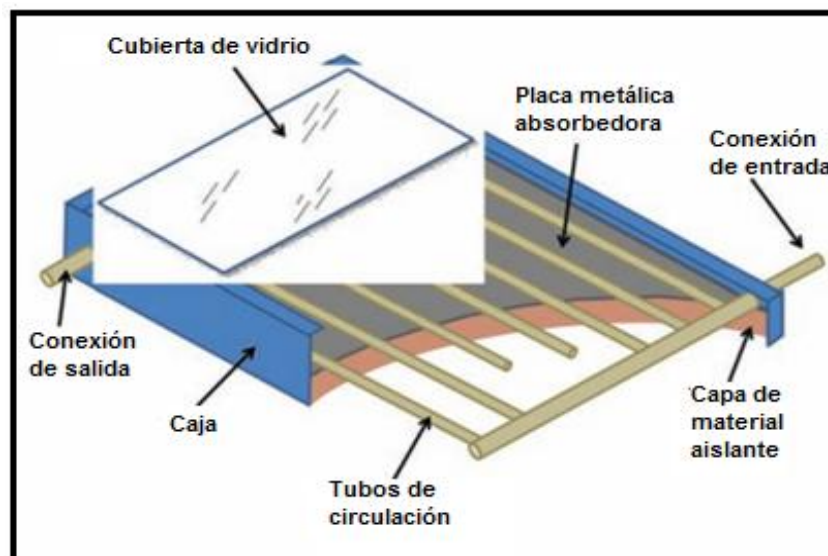


Figura 1.9. Componentes principales de un calentador solar de agua (Arancibia y Best; 2010)

El país que más destaca a nivel internacional en la aplicación de esta tecnología es Chipre, donde en promedio hay cerca de 600 m² de calentadores por cada mil habitantes; es decir, más de medio metro cuadrado por habitante. Esto implica un grado casi total de penetración en el mercado. Por otro lado, en cantidad de colectores instalados, China es el líder mundial indiscutible, con 164 millones de m². En México la cantidad instalada es pequeña, con alrededor de tan solo 8 m² por cada mil habitantes. Sin embargo, el clima de la mayor parte del territorio nacional es muy favorable para estas aplicaciones, las cuales pueden llegar a ahorrar entre 50 y 60 por ciento del consumo total de gas (Arancibia y Best, 2010).

Otra aplicación de la energía solar de baja temperatura es el secado de productos agrícolas. Tradicionalmente este secado se hace a cielo abierto. Sin embargo, en un secador solar el producto se encuentra detrás de una cubierta transparente, dentro de un colector solar especialmente diseñado. (Arancibia y Best, 2010)

La producción de agua potable a partir del agua de mar utilizando energía solar puede llegar a ser de mucha importancia en los años por venir. A nivel mundial el agua potable es cada vez más escasa; una manera de obtenerla es usando el calor solar para destilar el agua salada. Actualmente existen diferentes tecnologías solares bajo investigación que buscan mejorar los procesos y proveer agua potable con costos razonables. (Arancibia y Best, 2010)

1.6.1.1. Tipos de plantas solares térmicas.

Probablemente, el ejemplo más destacado de la utilización de tecnologías de concentración solar sea la producción de electricidad en las plantas termo solares de potencia eléctrica. En muchas plantas termoeléctricas la electricidad se

produce haciendo pasar vapor a presión a través de turbinas, las cuales generan electricidad. El calor requerido para producir este vapor puede ser suministrado mediante la quema de combustible como petróleo, gas o carbón, o bien mediante reactores nucleares o por su puesto mediante radiación solar concentrada. Existen diferentes tipos de plantas de concentración solar para la producción de electricidad, (Arancibia y Best, 2010) a continuación se tratan algunas de ellas.

1.6.1.1.1. Plantas de energía con colectores cilindro-parabólicos o de canal parabólico

Este concepto utiliza espejos parabólicamente curvos que son de hasta 6 m de ancho y 150 m de largo para concentrar la luz solar. El receptor donde se enfoca la energía es un tubo que corre a lo largo del foco del concentrador. En este receptor la energía solar es absorbida y transformada en calor, (aproximadamente 400°C) el cual se transfiere a un fluido que circula al interior del tubo. Este fluido puede ser un aceite térmico, sales fundidas o algunas otras sustancias con buena capacidad para retener calor, buena estabilidad a alta temperatura y con la suficiente fluidez para poder ser bombeada a lo largo de grandes longitudes de tubo donde es usado para producir vapor. Este vapor es conducido a un generador convencional de turbina de vapor. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

La energía solar calienta los colectores a temperaturas muy altas por lo que la energía solar puede ser generada incluso si el sol no está brillando. En el futuro se espera un bajo costo en la producción de energía eléctrica si este tipo de colector es mejorado, en cuanto a su operación y si el aceite térmico es reemplazado por una generación directa de vapor. Además se está investigando el trabajar a mayores temperaturas de operación y la integración de las turbinas de gas. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

En México se ha llevado a cabo una investigación sobre la tecnología del canal parabólico desde principios de los años ochenta, con la planta solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM. (Arancibia y Best, 2010).

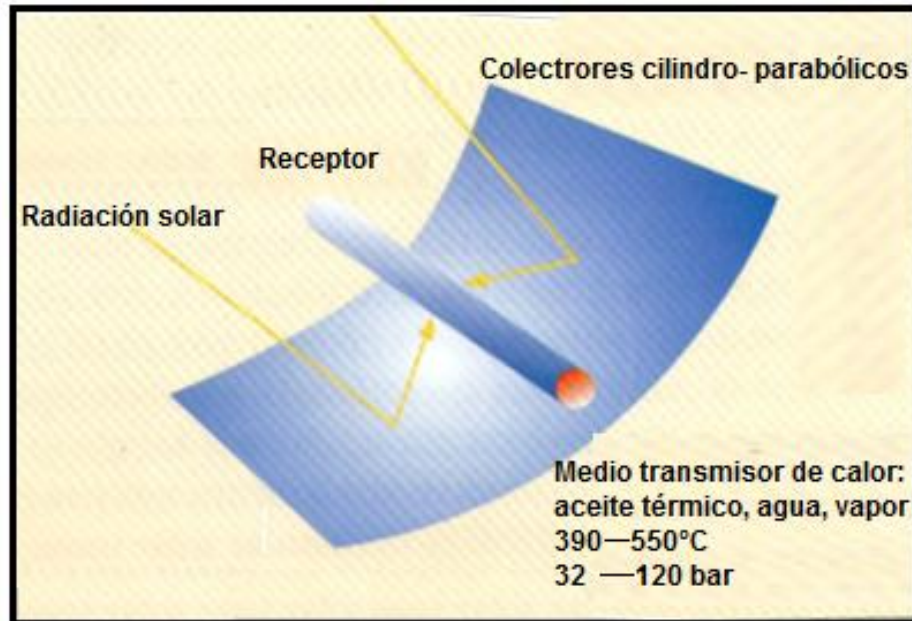


Figura 1.10. Colector cilindro-parabólico o de canal parabólico. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

1.6.1.1.2. Plantas de energía solar de torre.

Una planta de este tipo consiste de un gran campo de helióstatos que concentran la radiación solar en lo alto de una torre como se muestra en la figura 1.11. Los helióstatos son espejos planos que se mueven continuamente para dirigir el reflejo solar hacia la torre, y cuyos tamaños máximos llegan a ser de alrededor de 120 m² (Arancibia y Best, 2010). Se alcanzan Temperaturas de 1000°C o más con este tipo de colector. Un amortiguador en la punta de la torre convierte la radiación en calor el cual después es liberado al medio. El líquido caliente es conducido hacia la turbina. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).



Figura 1.11. Planta solar de Torre Central PS-10 en operación (frente) y planta PS-20 en construcción al fondo. Fotografía: Abengoa Solar (Arancibia y Best; 2010).

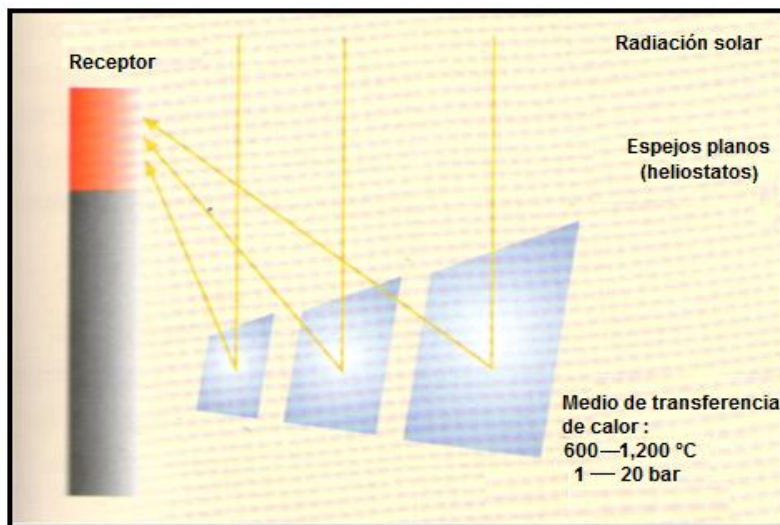


Figura 1.12. Esquema de un colector de energía solar de torre (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

Idealmente las plantas solares de potencia deben ser instaladas en sitios donde el sol brille prácticamente todos los días del año; es decir, en zonas desérticas o

semidesérticas. Por otro lado, en la actualidad una de las aplicaciones más interesantes para estas plantas es satisfacer el pico de demanda eléctrica que ocurre en las primeras horas de la noche. En ambas situaciones, para que una planta pueda operar en ausencia de luz solar, es necesario almacenar parte del calor generado con el sol para usarlo como respaldo en esos momentos. La manera más común de hacerlo es almacenando el mismo fluido que se ha calentado (aceite, sales fundidas) en un gran tanque bien aislado. De esta manera, se puede operar varias horas en ausencia de luz solar. También es posible operar una planta solar de potencia de manera híbrida, respaldándola con quemadores de gas. En el futuro esto podría hacerse *utilizando como combustible hidrógeno* producido a partir de energía solar, en vez de gas natural. (Arancibia y Best, 2010)

1.6.1.2. Plantas de energía con colectores de plato-parabólico.

La tercera tecnología de generación eléctrica, que se diferencia de las anteriores por su menor escala, es la de disco o plato parabólico. La generación de electricidad con este tipo de concentradores se basa en el uso del motor Stirling, inventado por el escocés Joseph Stirling en 1816. En este motor se calienta un gas que se expande, y al hacerlo empuja un pistón conectado a un alternador eléctrico; luego, al enfriarse, se contrae. En esta tecnología ya no es necesario transportar un fluido caliente por tuberías, pues la electricidad sale directamente del motor a través de cables eléctricos. (Arancibia y Best, 2010).

También conocidos como sistemas de disco solar, son particularmente adecuados para aplicaciones descentralizadas. Este colector implica un espejo parabólico (plato) que se mueve alrededor de dos ejes para seguir el sol y concentrar la energía solar directamente sobre el absorbente suspendido en el punto focal del

espejo. En el absorbente, un gas de trabajo (helio o aire) se calienta a temperaturas de más de 900 °C, y puede entonces accionar una turbina de motor de Stirling o de gas situada directamente al lado del absorbente.

Las plantas de energía con colectores de plato parabólico tienen un exitoso porvenir en la maduración de su técnica, durante muchos años se han ensayado la operación de este tipo de sistemas con valores de eficiencia de más del 30% teniendo así la mejor eficiencia demostrada en las plantas solares, el siguiente paso es la construcción de una serie de productos que incluyen este sistema y reducir los costos.

1.6.1.3. Centrales de colectores Fresnel.

A principios de 2001, se presentó el diseño de un colector el cual consiste en un gran número de tiras reflectoras colocadas paralelamente ya que, la luz es concentrada con menor intensidad por este sistema que por el anteriormente mencionado, un concentrador secundario se coloca por encima de la tubería absorbente para concentrar la luz una vez más. El agua se convierte directamente en vapor de agua en el tubo absorbente. El sistema se caracteriza por su simplicidad y su buena relación costo-efecto, además de que el diseño puede escalarse a capacidades de varios cientos de megawatts.

1.6.1.4. Plantas de energía chimenea solar.

En contraste con los sistemas de recolección de energía solar anteriormente mencionados en este último sistema la energía solar no es reflejada o concentrada. El sol calienta el aire bajo un colector masivo de techo hecho de vidrio o una lámina de plástico, el aire caliente flota por una chimenea localizada en el centro del techo del colector y posteriormente asciende. El aire caliente se conduce a unas turbinas instaladas en la base de la chimenea generando así energía. En dicho proceso se combinan tres fenómenos físicos bien conocidos:

- El efecto invernadero, simulado al calentar los gases que se encuentran bajo el techo de vidrio.
- El efecto chimenea, haciendo que el aire caliente bajo el techo de vidrio ascienda a través de una chimenea.
- El efecto turbina, el cual extrae la energía del aire que flota a través de la chimenea y lo convierte en energía eléctrica por medio de un generador.

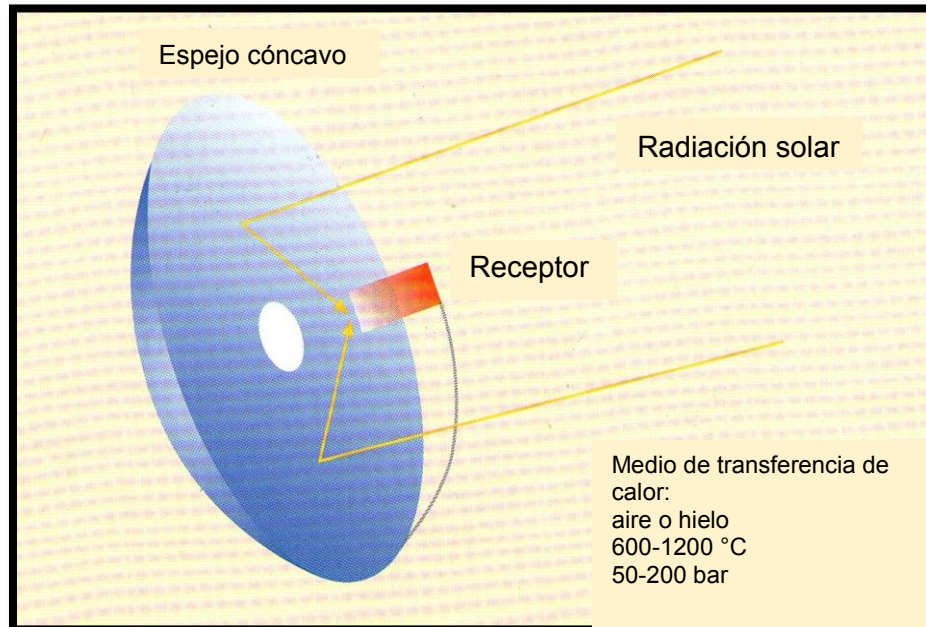


Figura 1.13. Esquema de un colector de energía solar de plato parabólico (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

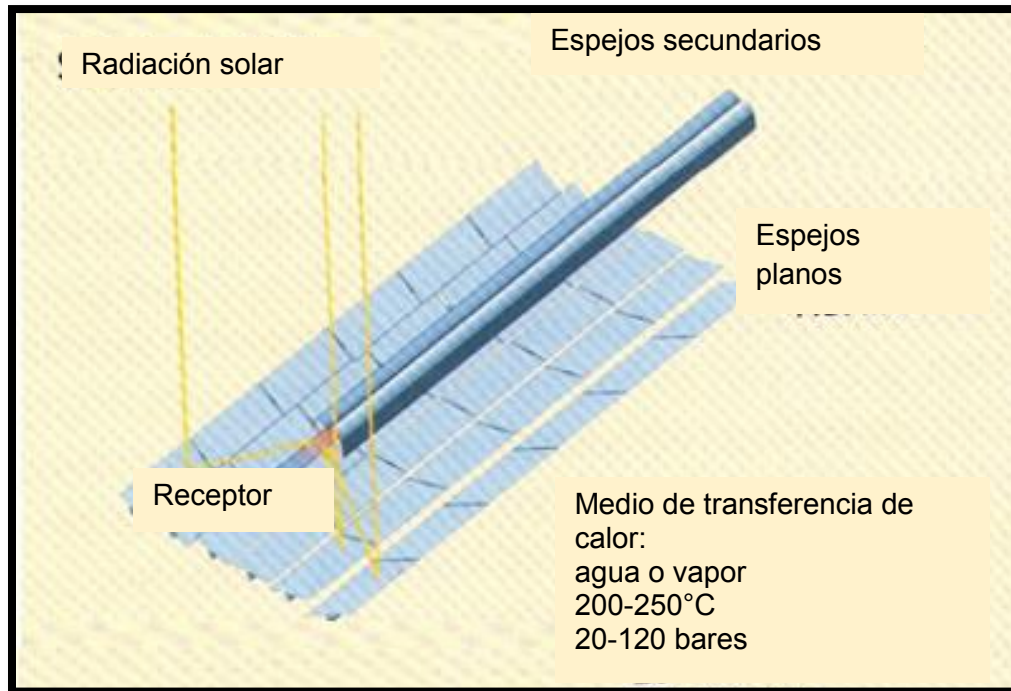


Figura 1.14. Esquema de un colector de energía solar tipo Fresnel(Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

La factibilidad técnica de este tipo de colectores ha sido demostrada en España con una planta experimental con muchos años de operación. Existen muchos proyectos que han llegado a desarrollar a gran escala las plantas de energía con chimenea solar con capacidades de 50 a 400 MW en Namibia China, España y Estados Unidos. La planta con 200 MW cuenta con 1000 metros de sistema de chimenea instalados en Australia y es un gran avance aunque el proyecto aún está muy lejos de obtener un apoyo financiero. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

1.6.2. Energía Solar Fotovoltaica.

A diferencia de las aplicaciones anteriores, en las celdas solares, la radiación solar no se transforma en calor, sino que se transforma directamente en electricidad, mediante el llamado efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico consiste en que la luz pueda generar una corriente eléctrica al iluminar ciertos materiales. Descubierta en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel, fue hasta la década de los años 50's del siglo XX que se encontró un material que presentaba el efecto fotovoltaico de manera eficiente: el silicio (Arancibia y Best, 2010).

El efecto fotovoltaico se basa en el uso de materiales semiconductores. Éstos se caracterizan porque conducen la electricidad mejor que un aislante y menos efectivamente que un metal, pero sobre todo porque mejoran su capacidad para conducir la electricidad al ser iluminados. Cuando incide la luz sobre un semiconductor, la energía suministrada ayuda a darle mayor movilidad a algunos de los electrones presentes en el material, por lo que su capacidad para conducir la electricidad aumenta.

Sin embargo, para producir el efecto fotovoltaico no basta con liberar electrones. Es necesario que aparezca un voltaje que mueva estos electrones en una dirección preferencial, generando una corriente eléctrica. La forma más común de lograr esto es unir dos materiales semiconductores de características electrónicas diferentes: uno de ellos debe ser capaz de ceder parte de sus electrones con facilidad (se llama material tipo N, mientras que el otro acepta fácilmente electrones adicionales (material tipo P). El efecto fotovoltaico se produce precisamente al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes tipos de materiales.

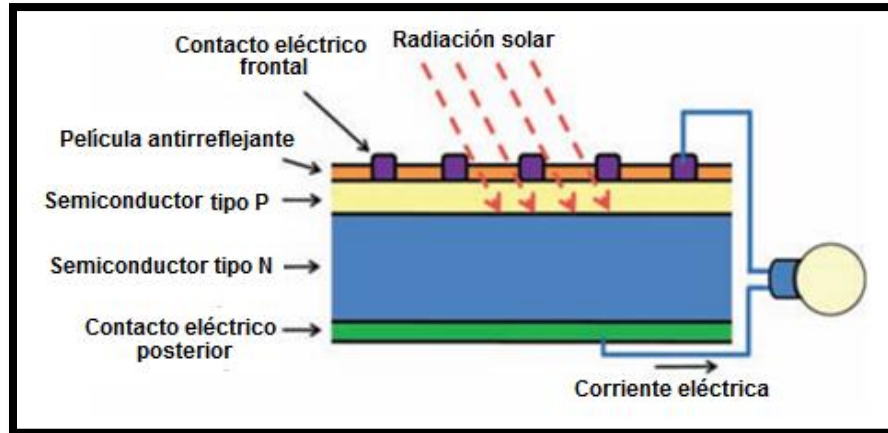


Figura 1.15. Estructura básica de una celda fotovoltaica (Arancibia y Best; 2010).

Dado que la potencia que genera una celda solar es pequeña, lo que se hace es conectar varias entre sí para aumentar el voltaje o la corriente. Generalmente se fabrican para producir voltajes de 12 a 24 volts de corriente directa. A un conjunto de varias celdas conectadas entre sí se le llama panel o módulo fotovoltaico (Arancibia y Best; 2010).



Figura 1.16. Acercamiento frontal de un panel fotovoltaico de Silicio poli cristalino. Se puede observar las diferentes celdas del panel (vetadas en tonos azul) y los contactos eléctricos centrales (líneas plateadas) (Arancibia y Best; 2010).

La industria fotovoltaica es una de las de más rápida expansión alrededor del mundo, con tasas de crecimiento entre el 40 y 50 por ciento anual en la última década; es decir, que su producción se está duplicando cada dos años.

La investigación en celdas fotovoltaicas es un área muy activa de la ciencia de materiales. Se investigan varios materiales distintos al silicio, y se busca reducir el costo de las celdas y mejorar su eficiencia. En México existe trabajo de investigación muy prometedor en diversas instituciones, como la UNAM, el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Universidad Nacional Autónoma Metropolitana (UAM), entre otras, por lo que hay buenas expectativas de contar con una tecnología nacional a mediano plazo si se le da el apoyo necesario a estos desarrollos (Arancibia, Best y Brown, 2010).

Muchos diferentes tipos de materiales semiconductores están ya a la venta para la fabricación de celdas solares. El silicio es todavía el elemento más importante. Se produce en tres variantes.

- Silicio mono cristalino: es caro, pero muy puro tiene un proceso de fabricación complicado particularmente, sino que alcanza las eficiencias de conversión más altas. Celdas de silicio mono cristalinas alcanzan eficiencias de 15 a 18 por ciento.
- Silicio poli cristalino: es más sencillo rápido y económico de producir. Sin embargo los límites de grano entre los cristalitos en la celda de silicio reducen el flujo de electrones y produce eficiencias algo menores de 13y 16 por ciento.
- Células de película fina de silicio amorfo son incluso más baratas de producir. Sin embargo, ellos tienen una eficiencia notablemente inferior de

menos de 10 por ciento y son celdas cristalina menos estables a largo plazo por lo que niegan en gran parte su ventaja en cuanto al costo. Entre los materiales más comunes para la fabricación de estas celdas están el arseniuro de galio, germanio, telurio de cadmio y di seleniuro cobre (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

1.6.2.1. Ventajas y desventajas del uso de generación de energías fotovoltaicas

Las principales ventajas de la generación de energía fotovoltaica son las siguientes:

- Cero emisiones CO₂ y ningún ruido durante la producción de electricidad.
- Los sistemas tienen una larga vida útil de aproximadamente 30 años.
- Amplia gama de aplicaciones, desde un pequeño ventilador o una calculadora para alimentar una casa, edificio de oficinas o plantas de generación, incluso de gran tamaño.
- El uso y la eliminación de silicio no representan ningún riesgo para el medio ambiente, además de que es un material abundante.
- Sólo se necesita el sol para producir energía, este combustible es gratuito y constante.
- Los módulos fotovoltaicos pueden ser reciclados evitando el consumo de energía utilizada para su producción y también contribuye la reducción de su precio.
- Requieren poco mantenimiento.

- Hay investigación que se lleva a cabo en forma permanente para mejorar la eficiencia y la apariencia de las celdas y los sistemas y así intentar reducir su costo. Además, se trabaja en el reciclaje de módulos fotovoltaicos y celdas para ahorrar dinero, principalmente mediante el uso de los recursos naturales y la reducción de la cantidad de energía necesaria para producir nuevas celdas. (Mundo, *et al*, 2014).

Las principales desventajas de la generación de energía fotovoltaica son las siguientes:

- Un límite natural impuesto por los límites ecológicos, y el uso del suelo técnicos (Grob y Elliott, D., 2011, citado por: Mundo, *et al*, 2014)

Gran confianza en el desarrollo de tecnología. La industria fotovoltaica y la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos dependen del desarrollo de la tecnología solar, especialmente la mejora de la eficiencia de las celdas para transformar la energía solar en electricidad. Además, el costo de las instalaciones fotovoltaicas debe seguir cayendo para llegar a ser una fuente de energía utilizada.

Los límites ecológicos y de uso de la tierra se refieren a las condiciones geográficas que hacen posible captar energía solar. Según Elliott (Elliott, 2011, citado por Mundo, *et al*, 2014), a pesar de la gran cantidad de energía solar que cae sobre la Tierra (equivalente a unos 90,000 TW), tan sólo 1,000 TW están disponibles para el uso humano. Esta cifra está limitada por factores técnicos como la eficiencia de conversión, los límites de acceso de la tierra y el carácter difuso e intermitente de este recurso natural. Por otra parte, la cantidad de tierra

necesaria para construir y operar una planta solar fotovoltaica a gran escala también puede ser una limitación.

- Límites de energía. Los expertos y las autoridades gubernamentales han argumentado que se necesitan grandes cantidades de energía para producir la tecnología fotovoltaica, algunas personas incluso dicen que los paneles fotovoltaicos (PV) generan menos energía durante su vida que la requerida durante la fabricación de las celdas y los módulos fotovoltaicos. (Elliott, 2011, citado por Mundo, *et al*, 2014).
- Por último, construir y operar un sistema fotovoltaico de alta tecnología es caro, pues se emplean grandes cantidades de materiales raros, y el personal de construcción debe ser altamente calificado. (Mundo, *et al*, 2014)

1.6.2.2. Aplicaciones y perspectivas del uso de energía fotovoltaica.

Una aplicación de un sistema fotovoltaico es un sistema de conexión a red que consta de paneles solares en la fachada del techo de un edificio que ofrece una potencia de corriente continua cuando se expone a la radiación solar directa o indirecta. La corriente continua se transfiere a la red. La capacidad de las instalaciones solares típicas en los edificios es entre 2 y 5 kW.

Otra aplicación es la creación de sistemas de pequeña escala-independientes que, por ejemplo sirvan como fuente de alimentación de la radio a distancia y las estaciones de monitoreo, teléfonos de emergencia, casas de verano y cabañas de vacaciones. Puede ser necesario un inversor, dependiendo de si los dispositivos se ejecutan en corriente continua o alterna. Usualmente son necesarios un

controlador de batería y el cambio con el fin de tender un puente sobre las fluctuaciones de la radiación, así como para hacer que la energía solar esté disponible en la noche. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

En contraste con las fuentes de energía como combustibles fósiles, que dependen de recursos limitados y acarrear importantes impactos ambientales, la energía solar se recibe de manera natural en todo el globo terráqueo y su utilización no implica la destrucción del entorno. Existen diferentes tecnologías, para el aprovechamiento de la energía solar, algunas de ellas muy maduras y otras de ellas siguen siendo tema de investigación y que podrían tener impactos muy importantes en el futuro. Lejos de ser una opción ingenua y poco costeable, la energía solar es una de las pocas opciones realistas. Lo ingenuo es pensar que se puede sostener una sociedad que está acabando con sus fuentes de energía y su entorno, sin preocuparse por lo que ocurrirá después. (Arancibia y Best, 2010)

1.6.3. Potencial de la energía solar en México

México cuenta con una radiación solar media de 5 kWh/m²/día, y en algunos lugares del país que llega a 6 kWh/m²/día (SENER, GTZ, 2009, citado por Mundo, *et al*, 2014). Algunos países de América Latina, incluido México, han desarrollado mapas de irradiación solar para demostrar el potencial de la energía solar del país con el fin de fomentar el desarrollo de la industria. Además, México es la segunda economía más grande de América Latina y tiene una extensión territorial de gran tamaño. Todas estas características ponen de relieve las excelentes condiciones del país para aprovechar la energía del sol. Sin embargo, este potencial se ha representado muy pocos beneficios hasta el momento para la generación de energía en México, debido principalmente a la pobreza, la falta de

conciencia, la falta de apoyo del gobierno para mitigar el cambio climático, reducir la dependencia de los combustibles fósiles, o la inversión en estrategias de innovación y publicidad (Luecke, 2011, Citado por Mundo, *et al*, 2014).

Según el Informe de la encuesta nacional de la aplicación de energía fotovoltaica en México (Huacuz y Agredano, 2011, citado por Mundo, *et al*, 2014), el presupuesto para la investigación de proyectos de energía fotovoltaica durante el año 2010 fue de alrededor de 20 millones de pesos (1.15 millones de euros), sin embargo, no se asignaron fondos para la producción de energía fotovoltaica, instalaciones o tarifas de alimentación. Afortunadamente poco a poco, esta situación está cambiando. Durante el año 2012 dos plantas fotovoltaicas conectadas a la red a gran escala se han instalado en Baja California. Son operados por la CFE, se trata de una planta de capacidad de 1 MW, que entró en operación comercial durante el primer semestre de 2012, y el otro es una planta de capacidad de 5 MW actualmente en una etapa de prueba pre-operacional.

Además, de acuerdo con la CFE en 2012 alrededor de 1,000 contratos de interconexión de la red fueron firmados por los particulares para la instalación de 7.7 MW de capacidad fotovoltaica. Un total de 14.5 MW de capacidad paneles fotovoltaicos se instalaron en México durante el año 2012 (Agredano y Huacuz, 2012, citado por Mundo, *et al*, 2014).

Hoy en día, México ha instalado sólo 52 MW de capacidad de los sistemas de energía fotovoltaica (Agredano y Huacuz, 2012, citado por Mundo, *et al*, 2014), contribuyendo con un 0.09% para la generación bruta de electricidad anual del país (SENER, 2013, citado por Mundo, *et al*, 2014).

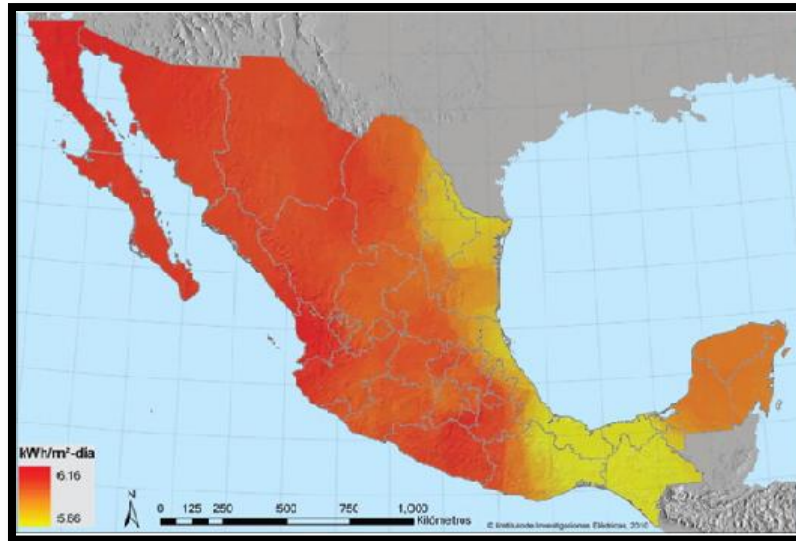


Figura 1.17. Distribución de México promedio radiación solar (Instituto de Investigaciones Eléctricas y SENER (IDAE, 2007)

1.7. Hidráulica.

Actualmente la energía hidráulica es una tecnología madura que genera gran parte de la energía mundial producida con recursos renovables además del tradicional uso de biomasa. 16% de la producción de la energía global es generada por las plantas hidroenergéticas. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

Se prevé que en los próximos años la demanda de energía eléctrica en México crezca notoriamente. Para atender dicho crecimiento, se ha iniciado una transición energética en la que se está fomentando cada vez más el uso de fuentes renovables y limpias. El plan nacional de Desarrollo prevé alcanzar 25 por ciento de energía renovable. Esto es motivado por el agotamiento inminente de los

hidrocarburos de que dispone el país, la variación errática en los precios mundiales del petróleo, y la degradación ambiental que provocan los combustibles fósiles. (Reed, *et al*, 2010). Entre las energías aplicables destacan:

- a) Las grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas:
- b) La energía de las mareas
- c) La energía de las olas

1.7.1. Generación de energía renovable con grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas

La energía producida por el movimiento del agua en la naturaleza es renovable, pues el ciclo hidrológico anual es impulsado por la energía solar. Las centrales hidroeléctricas aprovechan el caudal y el desnivel o carga hidráulica de una corriente de agua, es convertida en energía eléctrica mediante turbinas y generadores de alta eficiencia.

Las centrales hidroeléctricas se clasifican por su potencia instalada. En México se considera que una central es grande si excede 30 megawatts pequeña si produce entre un megawatt y 100 kilowatts; y micro si produce entre 100 y 10 kilowatts. En algunos países se habla de centrales pico cuando su potencia es menor que 10 kilowatts. Con frecuencia las desventajas que han obstaculizado el desarrollo de las grandes centrales hidroeléctricas se atribuyen sin análisis a las pequeñas centrales hidroeléctricas, frenando su desarrollo.

Las centrales hidroeléctricas se construyen con diversos esquemas de aprovechamiento en corrientes superficiales. Las grandes centrales hidroeléctricas comúnmente requieren la construcción de una presa y un embalse con capacidad para almacenar el escurrimiento de la corriente en los meses lluviosos del año, y regular su extracción por las turbinas en los meses de estiaje. Existen también, posibilidades de aprovechar la acumulación de energía por bombeo, en los que el agua fluye de un embalse superior a otro inferior, generando hidroelectricidad durante los períodos horarios de mayor demanda y precio.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas pueden requerir la construcción de una presa de poca altura y un embalse con capacidad de regulación diaria o semanal. Otra posibilidad es instalarlas al pie de presas ya existentes de almacenamiento para riego o suministro urbano. El caso más frecuente es que las pequeñas centrales hidroeléctricas se construyan sin embalse, por lo que se dice que funciona al hilo del agua o de pasada. Figura 1.18.

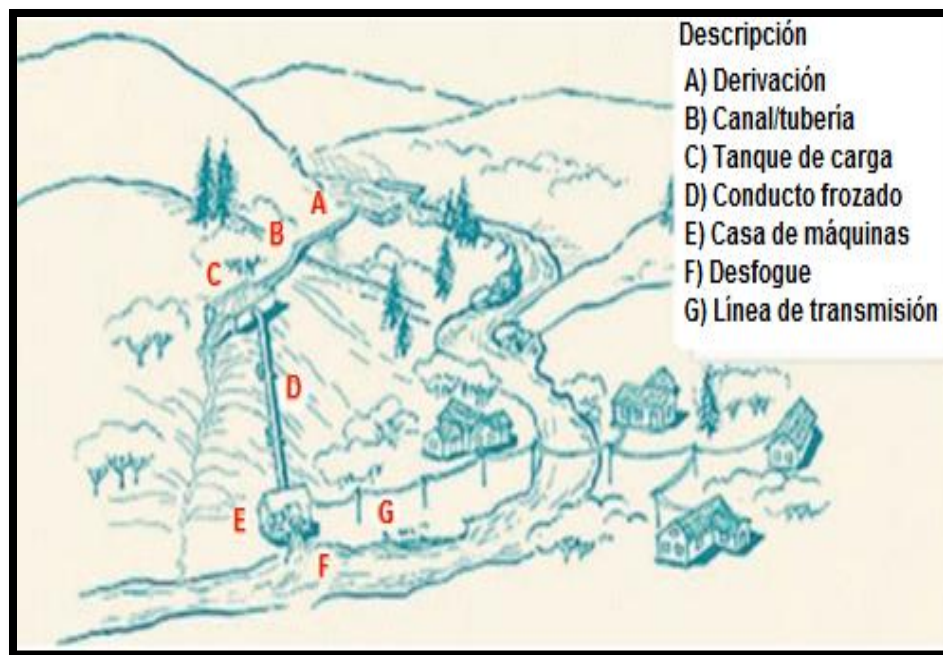


Figura 1.18. Esquema de pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo del agua (Reed *et al*; 2010).

Las centrales hidroeléctricas tienen impactos benéficos y adversos de tipo ambiental, social y económico. En general, el balance es crecientemente benéfico, como se observa en el nuevo impulso que está adquiriendo en México y en muchos países el desarrollo de grandes centrales hidroeléctricas y, más aún de pequeñas centrales hidroeléctricas (Reed *et al* 2010).

Algunas de las principales características beneficiosas para la energía hidroeléctrica se pueden resumir de la siguiente manera:

- Los recursos se encuentran ampliamente distribuidos geográficamente, con el potencial existente en cerca de 150 países. Alrededor del 70 por ciento del potencial económicamente factible queda por desarrollar, sobre todo en los países en desarrollo.
- Se trata de una tecnología probada y muy avanzada, con más de un siglo de experiencia. Plantas de energía modernas proporcionan el proceso de conversión de energía más eficiente (> 90%).
- La producción de energía de carga máxima de hidroeléctricas permite el mejor uso que se hace de los poderes de carga base de otras fuentes de electricidad menos flexibles.
- Aunque la inversión inicial puede ser relativamente alta, la hidroeléctrica tiene los costos operativos más bajos y más larga vida de las plantas en comparación con otras opciones de generación a gran escala.
- Como parte de un plan de usos múltiples, la hidráulica puede ayudar a subsidiar otras funciones importantes, tales como el suministro de agua de riego, mejoras en la navegación e instalaciones de recreación.

1.7.1.1. Desarrollo potencial hidroeléctrico de México

Según la International Hydropower Association, 16.1% del suministro eléctrico global provienen de centrales hidroeléctricas. En México, la capacidad instalada del sistema eléctrico nacional es de 51,105 MW, de los cuales 11,343 corresponden a centrales hidroeléctricas, que equivalen al 22.2% del total. En términos de energía generada el total nacional en 2007 fue de un millón de millones de watts por hora, (unidad en que se mide la energía eléctrica), de los cuales 27 TW-hora fueron producidos por centrales hidroeléctricas, lo que equivale al 11.6%. Del total de 79 centrales en el servicio público, 32 grandes centrales hidroeléctricas.

En el año 2000, la comisión federal de electricidad CFE, estimó un potencial hidroeléctrico en 52,427 MW en 583 sitios. En la planeación actual, la CFE tiene localizados 28 sitios para grandes centrales hidroeléctricas en las etapas de prefactibilidad, factibilidad o diseño, con capacidad conjunta de 7,624 MW. De ellos el programa Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009-2018 espera desarrollar 2,124 MW en el escenario base, y 2,244 MW en el de mayor crecimiento.

El potencial energético nacional de las pequeñas centrales hidroeléctricas es desconocido, lo que ha inhibido su desarrollo. Un estudio del potencial hidroeléctrico de las pequeñas centrales hidroeléctricas en varias cuencas de Puebla y Veracruz, que cubre 26,375 km², permitió identificar 62 sitios viables con potencia conjunta de 250 MW (CONAE, 1995, citado por: Reed *et al*; 2010), y se estimó el potencial nacional en unos 3,200 MW. En otro estudio realizado en 2003, sobre todo 2,400 km² en torno a Orizaba, Veracruz, se identificaron 15 sitios con una potencia conjunta de 70 MW. Por otra parte se difundió un catálogo de sitio (CFE, 2006, citado por: Reed *et al*; 2010) con 112 fichas de proyectos en varias

regiones del país que la CFE no planea desarrollar (Citado por: (Reed *et al*; 2010).

Este es el recurso renovable más explotado en México. En este momento hay algunas 4,000 represas que generan 19 TWh/año. En los estados de Veracruz y Puebla, el potencial se eleva a 400 MW que puede generar cerca de 3.5 TWh/año.

Chicoasén, la central hidráulica más grande del país, cuenta con 2,400 MW de potencia instalada y está situado en el estado de Chiapas. En el primero de marzo de 2007, la planta de "El Cajón" comenzó a trabajar en el estado de Nayarit, con 750 MW de potencia, uno de los proyectos más importantes en los últimos años. En la actualidad, la planta de "La Parota" (900 MW) se encuentra en construcción y está situado en el estado de Guerrero. (Cancino, *et al*, 2010).

El entorno nacional es favorable para la expansión de las energías renovables, particularmente por la nueva ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética, que contempla para las pequeñas centrales hidroeléctricas incentivos económicos, instrumentos de financiamiento, facilidades administrativas, facilidades de incorporación a la red eléctrica interconectada y apoyo tecnológico, entre otras medidas.

1.7.1.2. Mecanismos de generación

Existen varios tipos de turbinas de agua con diferentes campos de aplicación dependiendo del caudal.

La turbina Kaplan funciona como la hélice de un buque suspendida sobre un eje vertical. Tanto las paletas como el distribuidor son ajustables y pueden ser óptimamente adaptados a las condiciones del caudal. El agua fluye a través del corredor. Una variación de la turbina Kaplan es la turbina tubular en la cual el eje de rotación es horizontal. Las turbinas Kaplan y las tubulares son usadas donde hay bajas elevaciones y grandes caudales.

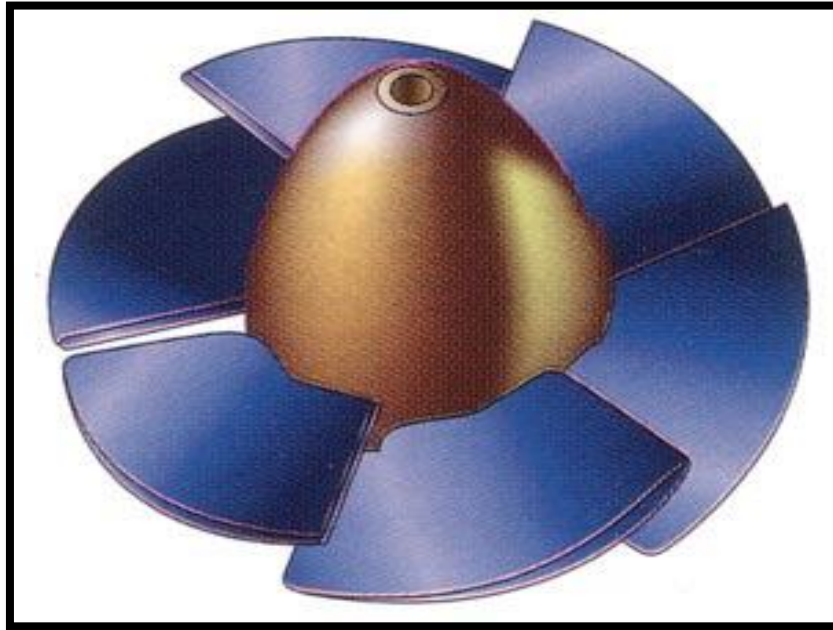


Figura 1.19. Rotor de turbina Kaplan, Editorial Anaya (Exatecno, s.f.)

La convencional turbina Francis es uno de los tipos más viejos de turbina y aún continúa usándose a pequeña escala en las plantas hidroeléctricas. La carcasa en forma de espiral es típica de este tipo de turbinas y es usada en lugares de baja elevación y caudales moderados. Únicamente las paletas guía son ajustables en este tipo de turbina. El agua fluye radialmente dentro del corredor y a lo largo del eje de rotación.



Figura 1.20. Turbina Francis (GLOBAL Hydro, 2002).

La turbina Pelton es útil en donde hay una gran elevación y caudales bajos. Después de pasar a través de una compuerta el agua es inyectada en las paletas a alta velocidad por medio de las boquillas.

Las turbinas de flujo directo son usadas para zonas de baja elevación y con caudales pequeños. El agua pasa a través del corredor de manera tangente.

Las turbinas de tornillo de Arquímedes pueden ser fácilmente utilizadas en plantas de poca capacidad. Estas turbinas trabajan con el principio de Arquímedes y pueden alcanzar eficiencias más altas que otras turbinas en donde hay bajos niveles de agua, incluso cuando están por debajo de su capacidad. Este tipo de turbinas se caracteriza por su bajo costo de construcción, y su buena compatibilidad con la fauna acuática (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).



Figura 1.21. Rotor de turbina Pelton, (Faeitch, 2011).

1.7.2. Energía oceánica.

El planeta tierra está cubierto en su gran mayoría por agua, la cual está básicamente acumulada en lo que llamamos océanos, en dicho lugar surge una gran cantidad de movimientos que el hombre puede aprovechar y transformar en energía como son, las mareas, las corrientes, y las olas.

1.7.2.1. Energía Mareomotriz.

A pesar de que el efecto de atracción gravitacional de la Luna y el Sol es similar para todas las costas marinas del mundo, hay sitios donde la marea alcanza

niveles extraordinarios. El cambio de los niveles del agua crea lo que conocemos como mareas que son resultado de las fuerzas gravitacionales del sol y la luna. El movimiento del subir y bajar de las mareas puede ser utilizado para generar energía. Este fenómeno es principalmente un asunto de resonancia hidráulica, donde el tiempo que tarda la onda de mareas en ir y regresar al fondo del estuario es igual a, o un múltiplo de, el tiempo en que tarda en subir y bajar la marea. En algunos lugares el perfil submarino exagera la amplificación, ya que la fricción con el fondo marino retarda el avance de la onda de marea, de forma que es alcanzado por la onda que viene más atrás, y se produce un “encamamiento”, que se traduce en una amplificación de la marea (Reed *et al*; 2010).

La tecnología es similar a la usada en las plantas de energía hidroeléctrica. Para aprovechar esta energía potencial de la marea, la bahía se puede cerrar mediante una gran cortina con compuertas y turbinas, éstas son construidas en una zona adecuada entre una isla y el mar. Cuando sube la marea, las compuertas son abiertas cuando la diferencia entre la altura del océano y el área dentro de la presa son suficientes. El agua fluye por los niveles bajos y se dirige a las turbinas. Cuando empieza a bajar la marea, se deja que el embalse se vaya vaciando a través de las turbinas hidráulicas. Los casos más relevantes son La Rance, en Francia, donde la marea tiene una amplitud de 14 metros; la bahía de Severn, en Bristol, Inglaterra con 15 metros, y la mayor del mundo, en la Bahía de Fundy en Canadá con amplitudes hasta de 15 metros. (Reed *et al*; 2010).

En el caso de La Rance, Francia hay instaladas 24 turbinas de 10 MW que funcionan desde 1967. Una central mareomotriz puede diseñarse para operar de distintas formas, las cuales dependen del número de ciclos y del sentido de aprovechamiento de las mareas. (Reed *et al*; 2010).

Cuando la instalación se diseña para aprovechar la energía únicamente en la etapa de vaciado de un estuario, es decir, durante la bajamar, se dice que ésta

opera en un ciclo elemental de simple efecto. Figura 1.22. Esta forma de operar limita la energía eléctrica generada, ya que solamente se aprovecha el flujo de agua en un sentido: del estuario al mar. Por tanto, solamente se aprovechan los dos períodos diarios en que se vacía el estuario. Es decir, entre 3 y 6 horas, como mucho, en cada ciclo.

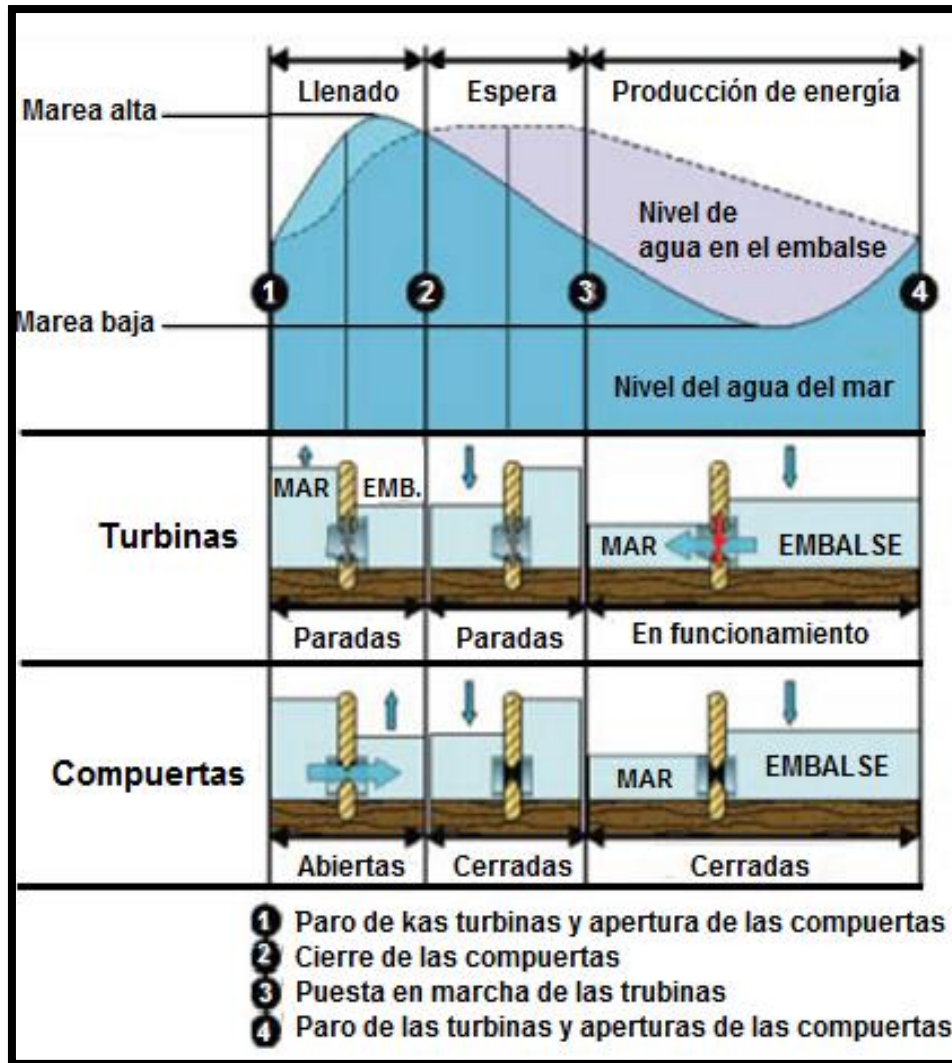


Figura 1.22. Energía de las mareas Esquema conceptual de una central mareomotriz de ciclo elemental de simple efecto. (Educación ambiental, s.f.).

Con el propósito de incrementar el período de generación eléctrica se han diseñado centrales que aprovechan mejor la energía de las mareas. Las instalaciones operan según un ciclo elemental de doble efecto. Este tipo de instalaciones aprovechan la energía del agua en dos sentidos: al entrar en el estuario y al salir del mismo. Para ello se recurre al empleo de canalizaciones de entrada y canalizaciones de salida, o a la utilización de un único tipo de canalizaciones, pero equipadas con turbinas que pueden trabajar en los dos sentidos. Las instalaciones de ciclo múltiple utilizan varios embalses y tienen como objetivo paliar los valles de producción energética que se producen en las instalaciones de ciclo elemental. Existen muchas propuestas de diseño de embalses múltiples, todas ellas encaminadas a adecuar la producción energética a las horas de demanda.

En el dique que separa el embalse superior del mar existen unas compuertas que facilitan la entrada de agua para su llenado, entre la marea media y la marea alta, y que se cierran entre la marea media y la marea baja. Así mismo, la salida del agua hacia el mar se lleva a cabo por las compuertas ubicadas entre el embalse inferior y el mar. Estas compuertas permanecen cerradas entre la marea media y la marea alta, abriéndose en el periodo comprendido entre la marea media y la marea baja. Las turbinas y generadores encargados de producir la energía eléctrica se encuentran ubicadas en el dique que separa ambos embalses. (Energía de las mareas. Educación ambiental, s.f.).

1.7.2.1.1. Mecanismos de generación

Existen varios tipos de turbina de agua con diferentes campos de aplicación dependiendo del caudal.

Tres son los tipos de turbinas más aceptados: la turbina de bulbo axial, la cual se instala junto con el generador eléctrico en un habitáculo en forma de bulbo situado en el conducto de paso del agua, la turbina Kaplan tubular, la cual se conecta al generador que se encuentra en el exterior del conducto de flujo del agua y la turbina de rotor anular, la cual lleva integrado el generador eléctrico alrededor del rodete de sus álabes, constituyendo ambos una unidad compacta. (Energía de las mareas. Educación ambiental, s.f.).

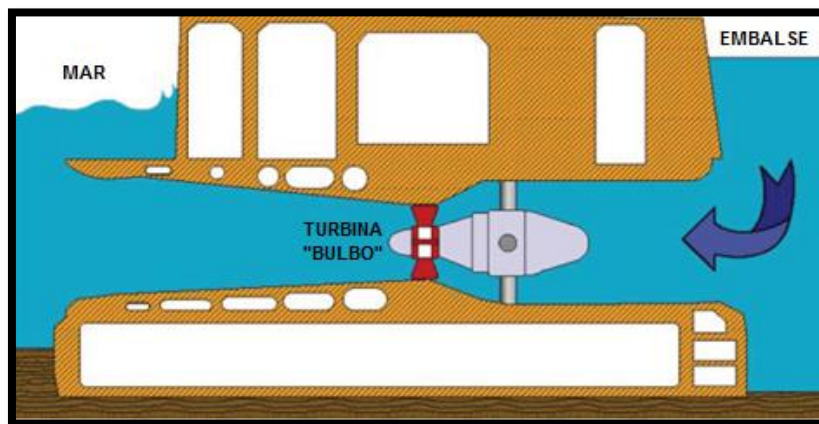


Figura 1.23. Energía de las mareas, Esquema de turbina de bulbo axial. (Energía de las mareas. Educación ambiental, s.f.).

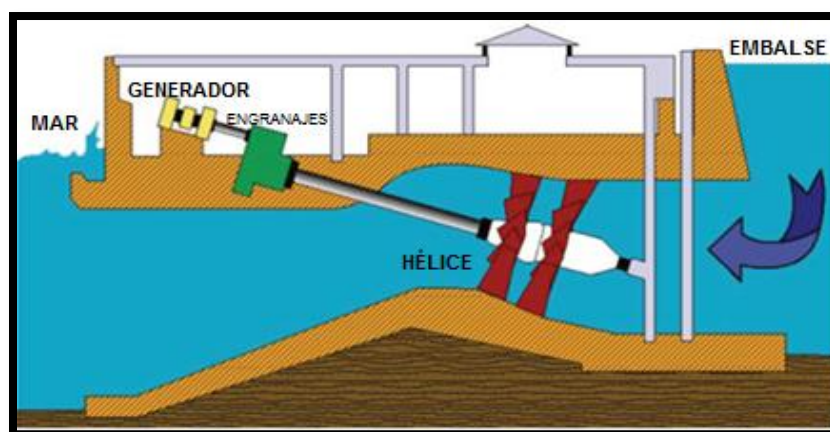


Figura 1.24. Energía de las mareas, Esquema de turbina Kaplan tubular. (Energía de las mareas. Educación ambiental, s.f.).

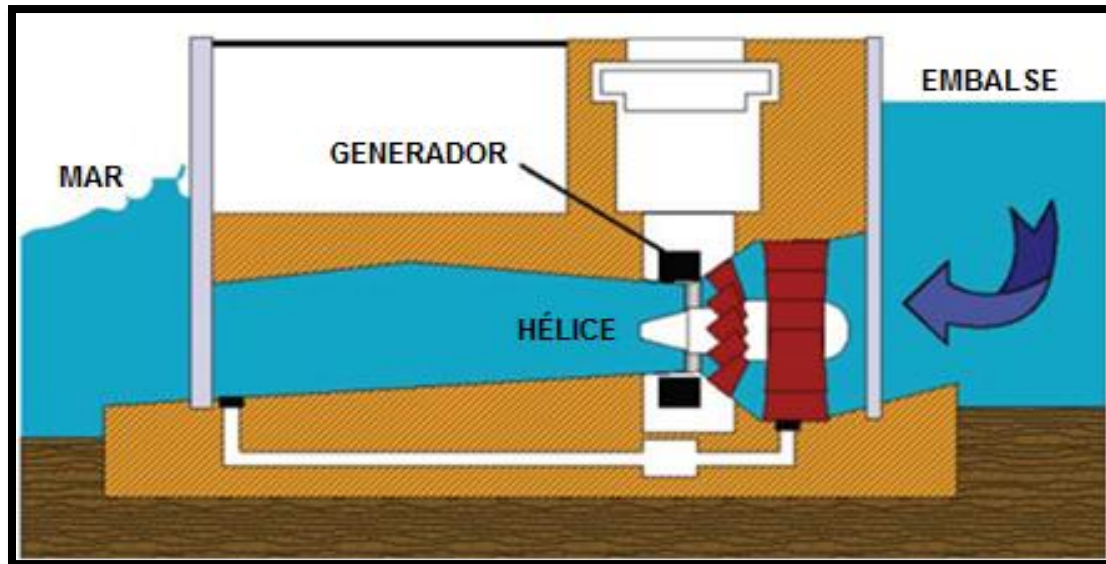


Figura 1.25. Energía de las mareas, Esquema de turbina rotor anular. (Energía de las mareas. Educación ambiental, s.f.).

1.7.2.1.2. Potencial de energía mareomotriz en México

En México existen mareas de siete metros en la parte alta del golfo de California, lo cual ha sido estudiado en el Proyecto IMPULSA IV. Se dice que en la parte alta del Golfo se podrían generar más de 20,000 MW de potencia eléctrica. Evidentemente este cálculo es sólo teórico, ya que en la realidad se tendrían grandes problemas de impacto ecológico y altos costos de la obra; estos últimos derivados de la dificultad para construir una cortina en un suelo fangoso como el de la región, aunque ésta sería sólo de 20 m de altura (Alcocer e Hiriart, 2008, citado por: Reed *et al*; 2010).

El uso de este tipo de dispositivos puede causar problemáticas o efectos adversos en la flora y la fauna, o bien tráfico marítimo el cual surge debido a que funcionan como un bloqueo en las entradas de los ríos. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

La Universidad Autónoma de México (UNAM) ha calculado que en el Mar de Cortés (península de Baja California), sería posible obtener una elevada generación de electricidad a partir de energía de las mareas debido a las corrientes marinas en el Canal del Infiernillo y para la respiraderos hidrotermales (fallas de distensión en el fondo del mar) (Estrada e Islas, 2007, citado por: Cancino 2010)

Las corrientes marinas son las que más se están utilizando en la actualidad, con una serie de modelos piloto. La marea que entra y sale de una bahía a veces ocasiona fuertes corrientes que se pueden aprovechar con una especie de “aerogeneradores” submarinos. La Agencia Internacional de Energía /Energías del Océano (IEA-OES), en la que México participa activamente, acaban de publicar un catálogo con todas las tecnologías que se han desarrollado a la fecha. Ahí aparecen tres inventos mexicanos (IEA-OES, 2009, citado por: Reed *et al*; 2010).

1.7.2.2. Energía de las olas

Desde tiempos inmemorables, el ser humano ha soñado con aprovechar el constante embate de las olas del mar sobre la playa. En los años setenta, con la primera crisis petrolera, se impulsó el desarrollo de tecnologías para aprovechar la energía del oleaje. Este impulso quedó en suspenso cuando aumentó la producción petrolera, con la consecuente disminución en precios. Ahora nuevamente adquiere relevancia al acercarse el fin de las reservas de petróleo, así como los cambios climáticos que provocan la acumulación de gases de efecto invernadero por la quema de hidrocarburos.

La energía de las olas es comúnmente creada por el viento sobre los mares, impulsado a su vez por la energía solar. Dado que las olas pierden poca energía al

avanzar por los océanos, a las costas llega energía que se ha acumulado sobre enormes extensiones oceánicas. Esto hace que el oleaje sea una fuente de energía relativamente estable y de alta calidad (Reed *et al*; 2010). Una ola se compone de energía cinética en la forma del movimiento de las partículas del agua y la energía potencial que es visible en el subir y bajar del agua. El poder almacenado de una ola puede alcanzar más de 50 kW por metro de longitud de onda (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

Mundialmente se encuentran condiciones adecuadas para la producción de energía eléctrica por medio de olas en lo que se conoce como el cinturón de los vientos del oeste ubicados entre los paralelos 40 y 60 de ambos hemisferios tanto el norte como del sur, donde los vientos soplan sin obstáculos a lo largo de grandes tramos de mar abierto. De esta manera la costa oeste a lo largo del océano Atlántico y el mar del norte son la mejor localización en Europa para la explotación de la energía de las olas. Tanto la energía cinética como la energía potencial de las olas pueden ser explotadas para generar electricidad (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

En la Figura 1.26 se muestra un mapa de la distribución de la energía del oleaje disponible por metro de frente de onda en los océanos del mundo. Las zonas de máxima energía (de 30 y hasta más de 60 kW/hm) corresponden a latitudes de más de 30 grados. A México llegan, en la costa del Pacífico de la Península de Baja California, el Golfo de México y el mar Caribe, que están más protegidos, llegan alrededor de 5 kW/hm.

A pesar de la distribución no-homogénea a nivel mundial, México cuenta con un recurso energético considerable en el oleaje. En promedio, a lo largo del año a sus costas llegan aproximadamente 115 GW en las olas, que es más del doble. Cuando la tecnología para producir electricidad a partir de oleaje esté plenamente

desarrollada, se podrá extraer de esta fuente energética entre el 10% y el 25%; si bien no es una panacea, sin duda puede contribuir sustancialmente a las necesidades energéticas de México, sobre todo si se piensa en poblaciones costeras aisladas. A nivel global se calcula que el consumo de electricidad equivale aproximadamente a lo disponible en el consumo en el oleaje en los mares del mundo (Reed *et al*; 2010)

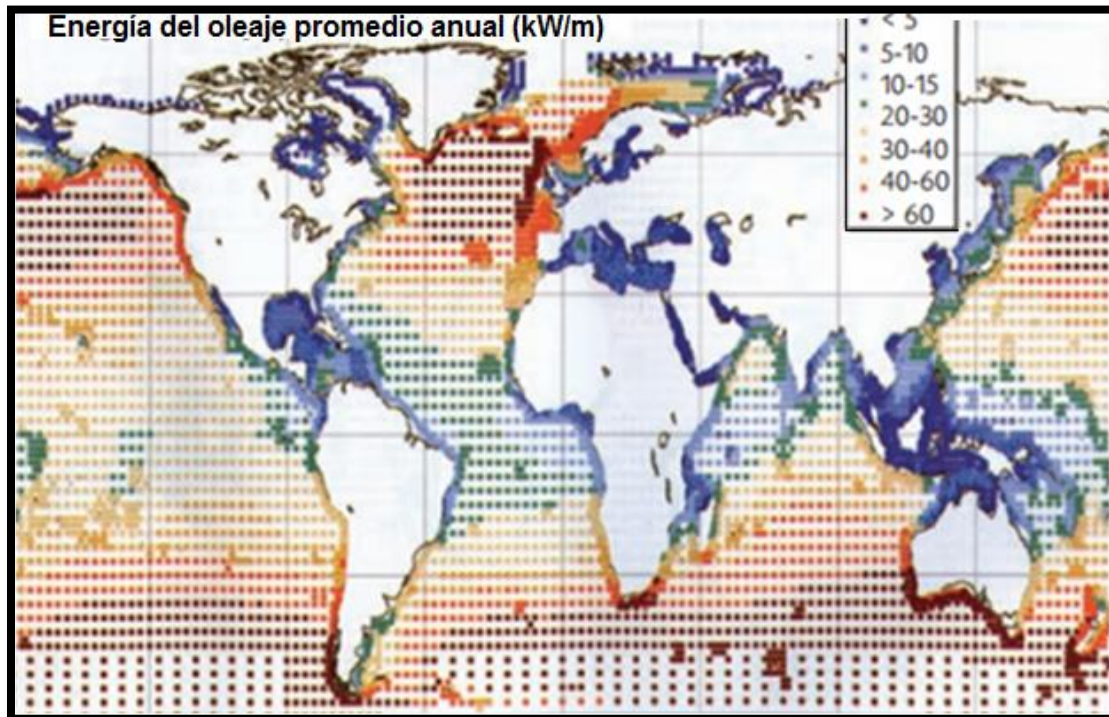


Figura 1.26. Promedio anual de la energía del oleaje en los mares del mundo en kilowatts por metro e frente de onda (Cruz, 2008).

1.7.2.2.1. Mecanismos de generación y tecnologías.

Algunos de los aparatos para aprovechar la energía de las olas y transformarla en energía eléctrica son los siguientes:

Columna de agua oscilante: consiste en una cámara de aire instalada en la orilla del mar y conectada al océano por medio de un conducto sumergido. El agua en la cámara oscila verticalmente por acción de las olas el levantamiento y la caída de movimiento del agua alternativamente comprime y descomprime aire en una cámara parcialmente sumergida. Este movimiento crea una corriente de aire que se mueve hacia adelante y hacia atrás, impulsando turbinas especiales para generar energía. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

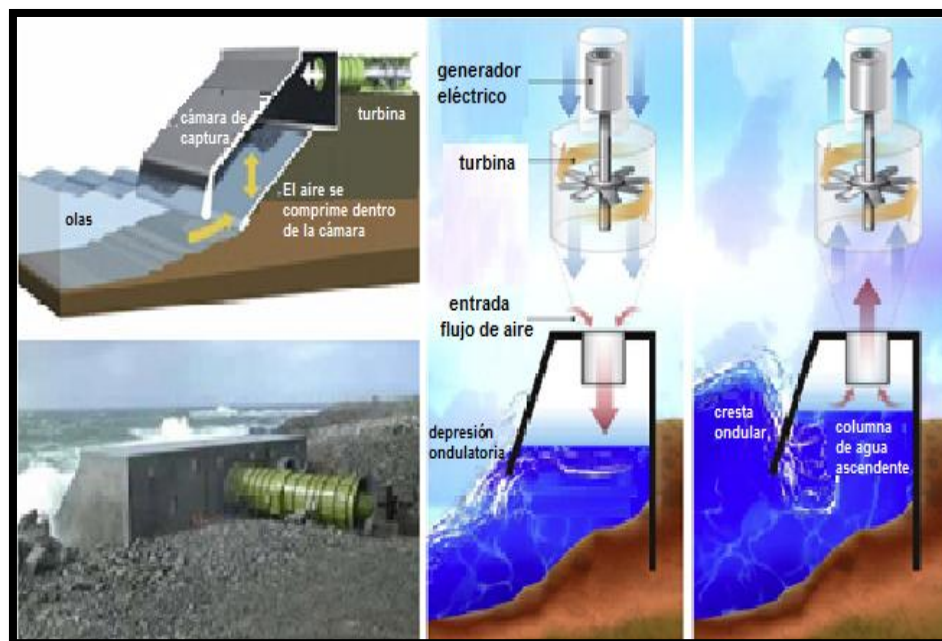


Figura 1.27. Esquema de funcionamiento de columna oscilante, (Energías como bienes comunes 2012)

Dispositivo de desbordamientos: la parte superior de las olas caen en un depósito elevado y la energía potencial del agua se usa después para hacer correr las turbinas y generar energía.

Dispositivos de agitado: El movimiento vertical del agua se transmite a través de una boya usando un sistema mecánico o hidráulico y convertido en energía

eléctrica mediante un generador lineal ligado al fondo del mar. Un simple dispositivo generará entre 10 y 50 kW.

Dispositivos de lanzamiento: Varias boyas interconectadas son empujadas en direcciones opuestas al movimiento de las olas. Este movimiento es explotado para generar energía usando un líquido especial en los generadores. Algunos de estos sistemas fueron optimizados en los noventas. Existen otros dispositivos que dependen del movimiento horizontal de las olas para crear el efecto de bombeo que utilizan los generadores para producir energía. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

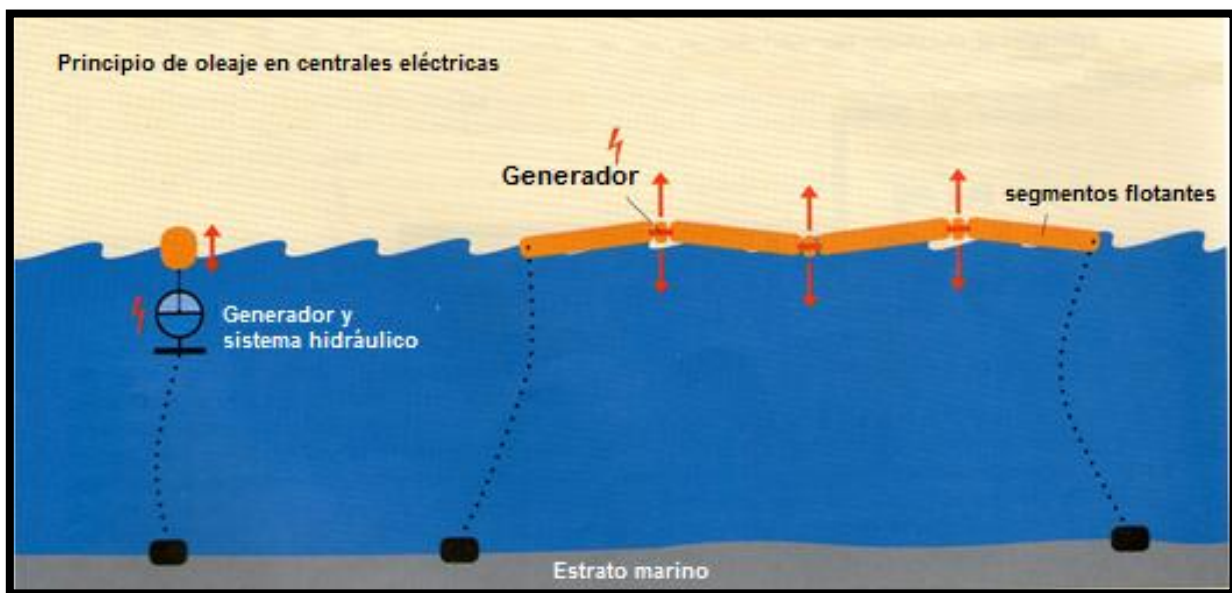


Figura 1.28. Esquema de dispositivo de lanzamiento, (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011)

Pelamis: entre las tecnologías más desarrolladas hasta ahora está el llamado pelamos, que consiste en una serie de flotadores articulados que se adaptan al oleaje incidente (Reed *et al*; 2010).



Figura 1.29. Prototipo experimental del Pelamis (IEA-IOES, 2009).

1.7.3. Generadores de energía a partir de las corrientes marinas.

Al igual que las olas, las corrientes marinas son generadas por diferentes fenómenos: el viento, las mareas y en el caso de las corrientes del Golfo, la diferencia en densidades (debido a la diferencia de temperaturas o grados de salinidad). Este tipo de generadores aprovecha el movimiento del agua usando rotores como las turbinas de viento pero situadas bajo el agua. Los intensos esfuerzos realizados en la investigación de la energía eólica también se benefician el desarrollo de plantas de energía de corrientes marinas. Los generadores de este tipo son efectivos aun cuando las velocidades de las corrientes son bajas debido a que el agua tiene una densidad más alta que la del aire y por lo tanto transfiere mayor energía cinética.

Los generadores de energía a partir de las corrientes marinas no ocupan mucho espacio y tienen un impacto ambiental mínimo. Los efectos en la vida de las criaturas en el fondo del mar (transporte de sedimentos) se verán limitados debido a la baja velocidad de rotación alrededor de 15 revoluciones por minuto. Los impactos a largo plazo aún están siendo estudiados. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

1.7.3.1. Mecanismos de generación y tecnologías

Actualmente existe una amplia variedad de generadores para el aprovechamiento de esta fuente energética, todos basan su funcionamiento en ser posicionados en medio del flujo y corresponden a distintos diseños que pueden agruparse en las tres tipologías siguientes:

- Rotores de flujo axial, cuyo eje es horizontal y en la misma dirección del flujo y que pueden tener una similitud en la forma con los generadores eólicos o con las hélices que propulsan los buques, pudiendo incluso estar situados en el interior de toberas que direccionan y aceleran el flujo de la corriente.
- Rotores de eje vertical, reciben el flujo de la corriente en sentido transversal al eje y lo forman conjuntos de palas verticales que giran sobre éste, impulsadas transversalmente por el flujo.
- Alerones que basculan alternativamente al ser impulsados por el flujo, estando la aleta en posición horizontal o en un plano ligeramente inclinado con la dirección de la corriente y debido a la fuerza de sustentación que la corriente provoca, el alerón oscila en un movimiento vertical que por medio de una palanca acciona un servomotor hidráulico que produce energía eléctrica.

En cuanto al sistema que permite su posicionamiento en la corriente, puede ser una estructura apoyada por gravedad en el fondo marino o bien una estructura pilotada en el lecho marino al modo en que lo son los grandes generadores de aprovechamiento eólico cercanos a la costa y también estructuras flotantes, que actúan bien a flote o en inmersión. Y en todos los casos debe disponerse el correspondiente sistema de fondeo. (PTME Energías Marinas, 2010).

En cuanto a las tecnologías desarrolladas para la generación de energía eléctrica con las corrientes marinas podemos mencionar las siguientes:

Las tecnologías de Gradiente Térmico (Ocean Thermal Energy Conversion-OTEC) son capaces de aprovechar la diferencia de temperatura existente entre la superficie del mar y las zonas profundas, es decir, lo que se conoce como gradiente térmico oceánico. Se necesita una diferencia de temperatura superior a 20°C, por lo que las regiones ecuatoriales y subtropicales son las más adecuadas para este tipo de energía.

Hay que resaltar que a pesar de su alto potencial las investigaciones y proyectos se encuentran todavía en una fase preliminar. A pesar de ello se han realizado instalaciones de carácter experimental en Hawai, India y Japón. Entre ellas destaca la plataforma flotante instalada en India en 2001 con una potencia de 1 MW. Dicha plataforma denominada Sagar shakti (en sánscrito, “el poder del océano”) fue puesta en marcha por el National Institute of Ocean Technology de la India y la Universidad de Saga (Japón). Está ubicada a 40 km de la costa de Tamilnadu y se trata de una plataforma flotante que utiliza agua recogida a 1,000 metros de profundidad.

Por último se encuentran las tecnologías de Presión Osmótica (también denominado Energía Azul) y Gradiente Salino. La primera de ellas se basa en el

fenómeno de la ósmosis, por lo que son capaces de aprovechar la diferencia de presión existente entre agua dulce y el agua salada para producir energía.

En el caso del gradiente salino se obtiene energía por la diferencia de la concentración de sal existente entre el agua de mar y el agua de los ríos. Cuando el agua dulce se mezcla con agua salada se produce una liberación de energía que en teoría podría ser aprovechada. (OCEANA, 2013).

1.7.3.2. Potencial de la generación de energía eléctrica por medio de las corrientes marinas en México.

En Chile, en el Canal de Chacao, se tienen corrientes muy fuertes que pueden ser aprovechadas para la generación de electricidad; por su parte, México cuenta con dos zonas de alto potencial y bajo estudio por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la primera hace referencia al Golfo de Cortés y la segunda a los litorales de la península de Yucatán.



Figura 1.30. Sitios con mayores corrientes marinas en el mundo (SENER, 2009)

1.7.4. Geotérmica

La energía de la tierra mejor conocida como energía geotérmica o geotermia, es una energía renovable, prácticamente inagotable, con una madurez tecnológica sólida, limpia, versátil y útil para generar electricidad, entre otras múltiples aplicaciones.

Debido a sus emisiones se compone prácticamente de vapor de agua, su uso no presenta riesgo ambiental para el planeta. Hoy en día, la geotermia representa el 0.4% del total de la generación eléctrica mundial, aun cuando sólo se explotan los sistemas hidrotermales de alta temperatura, que constituyen una fracción muy pequeña de la inmensa cantidad de energía disponible en la Tierra.

Estudios científicos recientes relacionados con el desarrollo de técnicas mejoradas de explotación para nuevas generaciones de sistemas geotérmicos muestran que, a mediano plazo, la generación geotermoeléctrica se convertirá en una pieza clave dentro del abanico energético mundial.

1.7.4.1. Geotermia y tipos de sistemas geotérmicos

Se define geotermia como la energía o calor natural que proviene del interior de la Tierra. Básicamente es la energía calorífica del núcleo de la tierra que alcanza la superficie de la misma. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

Este calor proviene básicamente del colapso gravitatorio que formó a la Tierra y de la desintegración radiactiva de elementos radiactivos como los isótopos de uranio, torio y potasio en la corteza terrestre. El contenido total de calor de la Tierra es inmensamente grande, del orden de 12.6 billones de exajoules (un exajoule equivale a un trillón de joules, unidades en que se mide la energía); se calcula que la corteza terrestre contiene unos 5,400 millones de exajoules (Gupta *et al*, 2007, citado por: Santoyo y Barrgan-Reyes, 2010).

Con la tecnología actual, sólo los yacimientos hidrotermales pueden explotarse comercialmente para generar electricidad o para aprovechar el calor directamente en otras aplicaciones. La inmensa intensidad de energía térmica producida continuamente en estos sistemas y los largos tiempos geológicos requeridos para su agotamiento hacen que la geotermia sea considerada como una fuente alterna de energía, renovable y prácticamente inagotable.

Los sistemas geotérmicos existentes en la Tierra se clasifican, en forma general, con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca. Cuando la temperatura del fluido es mayor a 200°C, se le considera un recurso de alta entalpía (o alto contenido energético), ideal para la producción de electricidad con sistemas convencionales de generación. Si las temperaturas del fluido están en el intervalo de 100°C a 200°C, se les denomina sistema de mediana o baja entalpía, respectivamente.

Entre los sistemas geotérmicos se tienen los siguientes:

a) Sistemas hidrotermales *convectivos*. En algunos lugares el agua caliente y el vapor emergen en forma de geiseres por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, lagunas de lodo hirviente o suelos calientes. Estos yacimientos pueden ser vapor o líquido dominante de alta temperatura, o de líquido de mediana o baja

temperatura. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011). Están constituidos por una fuente de energía, fluidos que constituyen el medio de transporte del calor, roca permeable donde se almacenan los fluidos y una capa de “roca de sello”. Los fluidos se infiltran en la corteza terrestre a través de poros y fracturas hasta alcanzar un yacimiento, donde se almacenan por largo tiempo. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011. Figuras (1.31 y 1.32).

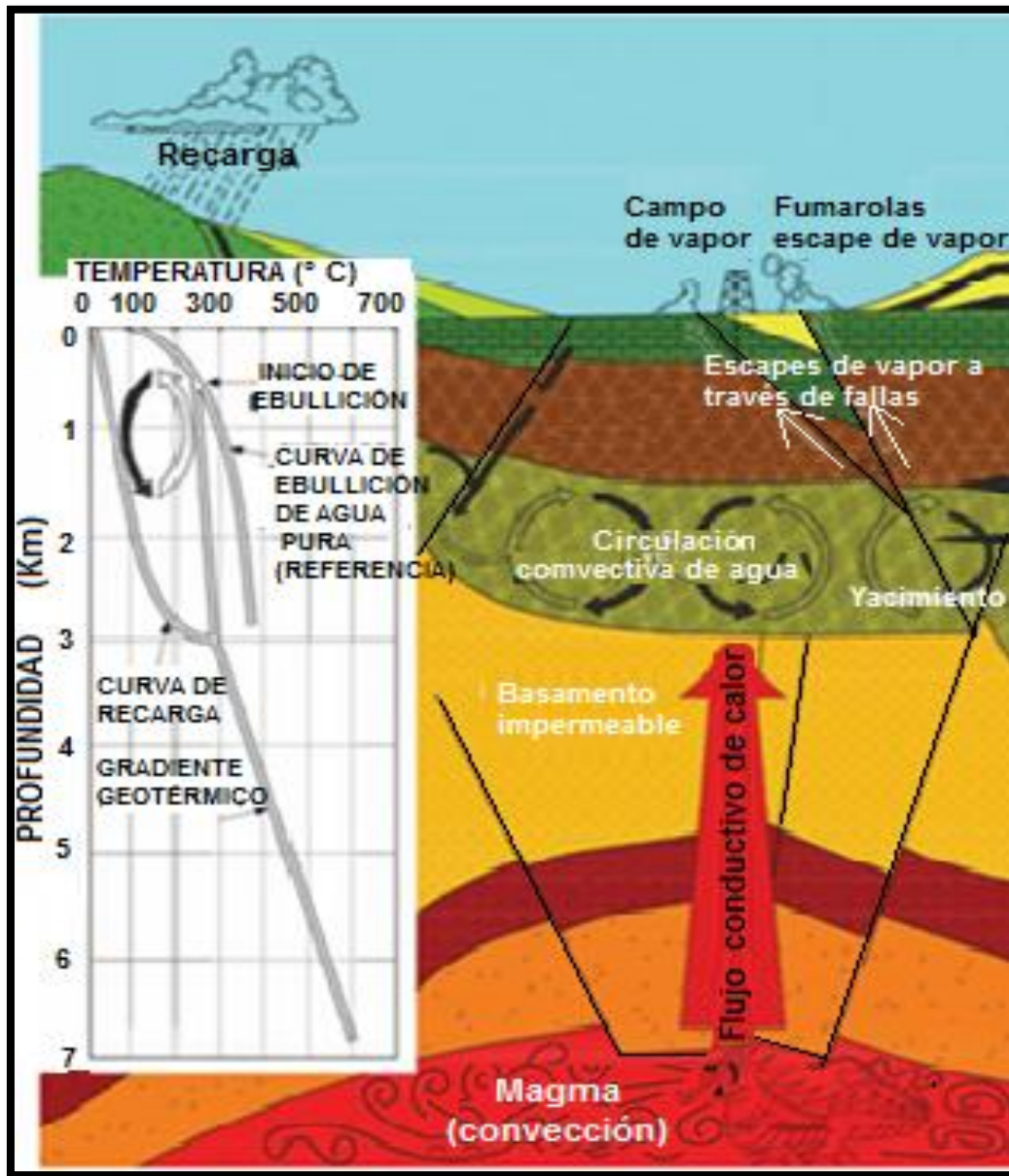


Figura 1.31. (Santoyo y Barragán; 2010)

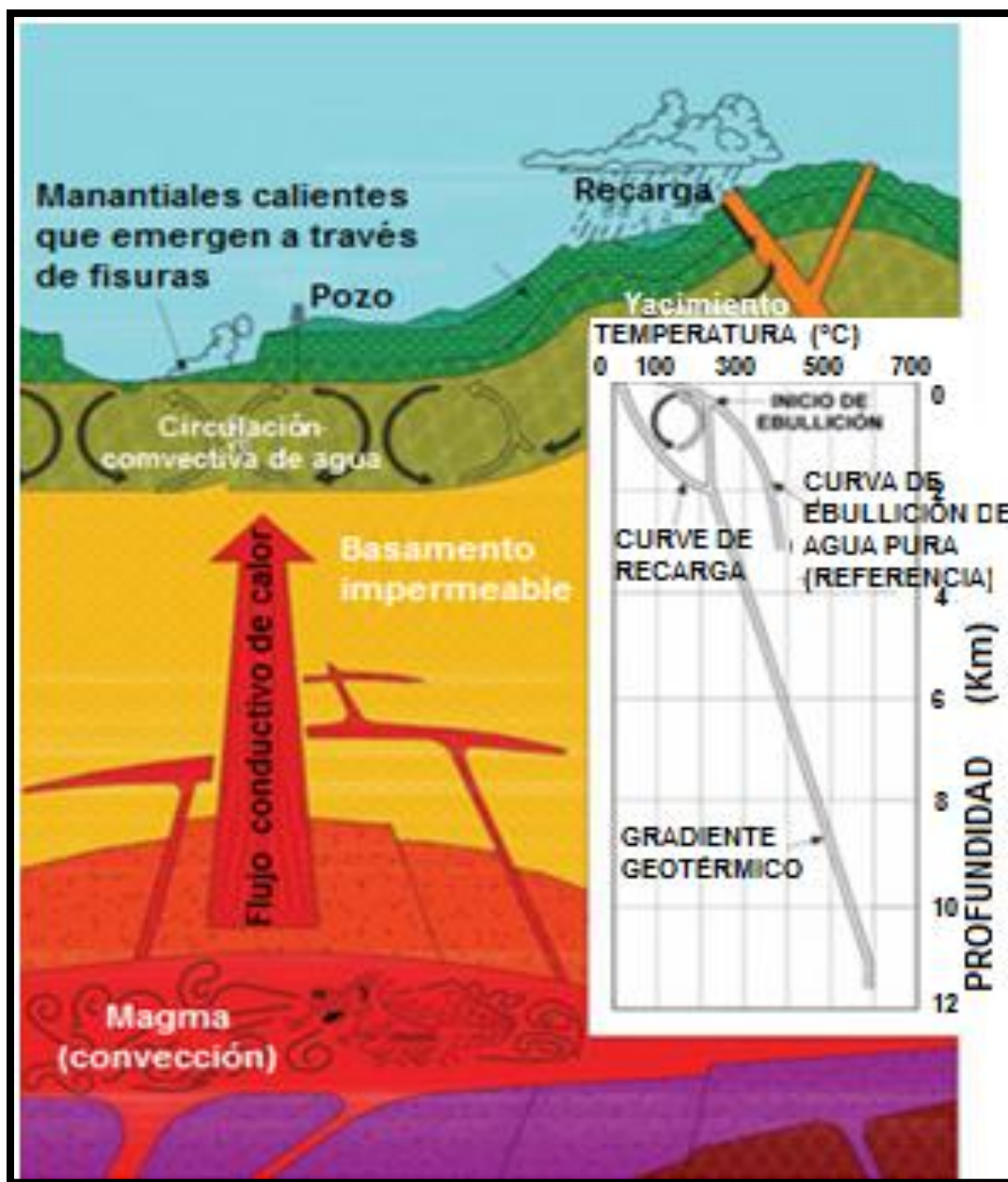


Figura 1.32. (Santoyo y Barragán; 2010)

Para la generación de electricidad, se extraen fluidos bifásicos (líquido y vapor) de alta temperatura (más de 200°C) mediante pozos perforados, y se transportan a la superficie para una separación eficiente. El vapor separado se conduce hacia turbinas de generación (Figura 1.33; Flasheo de vapor), mientras que el agua separada, dependiendo de su temperatura, es reutilizada en diversas aplicaciones

antes de regresarla al subsuelo para recargar el sistema y evitar problemas de contaminación del medio ambiente. Por otro lado, los fluidos de mediana temperatura (menos de 200°C) son usados en plantas de ciclo binario, donde ceden su energía a un fluido secundario de bajo punto de ebullición para evaporarse y utilizarlo como vapor para producir electricidad.

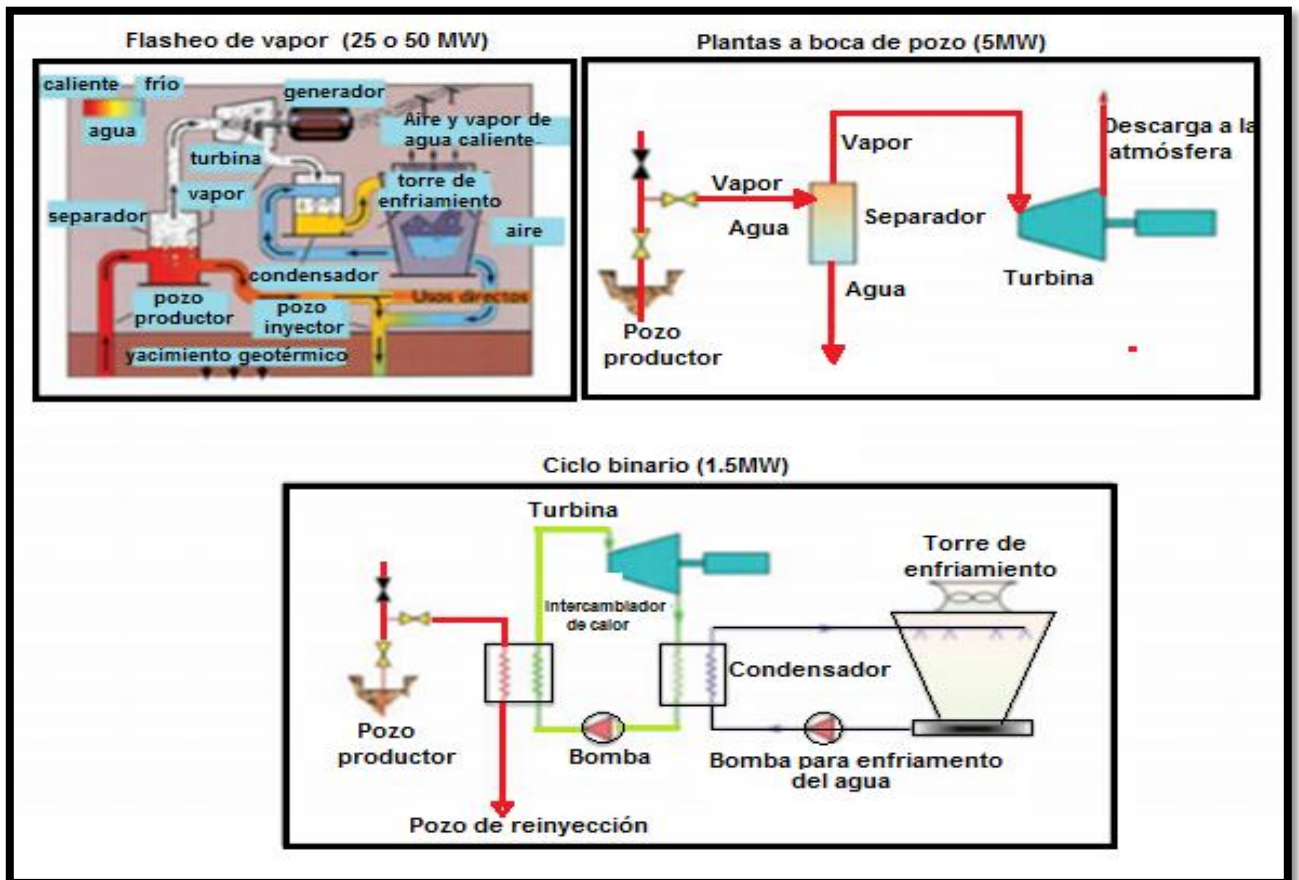


Figura 1.33. Ciclo binario (Santoyo y Barragán; 2010).

b) *Sistemas geotérmicos de roca seca caliente o "sistemas geotérmicos mejorados"*: Consisten en roca seca a muy alta temperatura (alrededor de 650 °C) localizada entre 2 y 4 km de profundidad, y con la característica particular de no contar con fluidos suficientes en el fondo para transportar el calor hacia la superficie. Su explotación requiere de la creación de una red de fracturas en la roca y la inyección de fluidos para su aprovechamiento, un fluido de transferencia

de calor debe ser circulado a través de la roca. Si el agua fuese forzada a través de los estratos geológicos sin ninguna preparación adicional, el área de intercambio de calor y de la permeabilidad de las capas de roca sería muy baja. Por esta razón, primero se realiza una perforación profunda a través de la cual una gran cantidad de agua es introducida en la roca a muy alta presión. Cuando se hace esto, las grietas y fisuras naturales se expanden y nuevas grietas se crean (simulación hidráulica). Esto aumenta la permeabilidad de la roca y, la creación de un intercambiador de calor natural. El agua calentada por las rocas en estas profundidades se puede alimentar en las redes locales de calefacción o proporcionar vapor para fines industriales. También es atractiva para generar energía. Lo que se conoce como turbinas de Organic Rankine Cycle, se utilizan para este propósito. Sin embargo, debido a las relativamente bajas temperaturas del fluido de transferencia de calor, entre 100°C y máximo de 180°C, es necesario utilizar un líquido orgánico con un bajo punto de ebullición como el propano o isobutano en lugar de agua en el circuito de la turbina de vapor. La eficiencia de conversión de este ciclo es entre 8% a 12%. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011). Por su inmenso potencial y su distribución prácticamente uniforme en toda la superficie terrestre, se estima que para el 2050 podrían obtenerse alrededor de 100 mil MW; (Massachusetts Institute of Technology, 2006, citado por: Santoyo y Barragan-Reyes, 2010).

c) *Sistemas geotérmicos geopresurizados*: Contienen agua y metano disuelto a alta presión (unos 700 bar, unidad de presión) y mediana temperatura (entre 90°C y 200°C). Actualmente estos recursos no se explotan y se desconoce su existencia en México.

d) *Sistemas geotérmicos marinos*: Se localizan en el fondo del mar, y se manifiestan como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales. Se han

identificado en el Golfo de California en México, con temperaturas hasta de 350°C, y por el momento no se explotan comercialmente.

e) Sistemas geotérmicos magmáticos: Consisten de roca fundida (a unos 800°C) y están asociados con aparatos volcánicos activos. Para extraer el calor de estos sistemas se han desarrollado algunos proyectos piloto en Hawaii e Islandia, pero su explotación comercial requiere la búsqueda de materiales adecuados que resista la corrosión y las altas temperaturas.

f) Sistemas geotérmicos supercríticos: Se ubican a grandes profundidades (entre 5 y 6 km) y contienen fluidos en estado supercrítico (es decir a presión y temperatura tal, que adopta un estado intermedio entre líquido y gas) con temperaturas de hasta 600°C; se han detectado cerca de Islandia, donde actualmente se investiga la factibilidad de su explotación (Iceland Deep Drilling Project, 2010, citado por: Santoyo y Barragan-Reyes, 2010). Este tipo de sistemas supercríticos pueden proveer hasta 10 veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales, por lo que, de ser factible su explotación, la capacidad geotermoeléctrica podría incrementarse en varios órdenes de magnitud. (Santoyo y Barragan-Reyes, 2010).

1.7.4.2. Impacto ambiental de la energía geotérmica

Mientras que los impactos al medio ambiente de la perforación de los orificios son comparables a los de los orificios para extraer aceite mineral o gas natural, el funcionamiento de plantas de energía geotérmica puede conducir a un ligero enfriamiento del sustrato y, en consecuencia, cambios en la química de las áreas

circundantes. Sin embargo, en general no hay conexión a la biosfera, por lo que no son de esperar impactos ambientales sobre la flora y la fauna.

La simulación hidráulica y refrigeración pueden provocar pequeños terremotos en zonas sísmicamente inestables. Los estudios y la experiencia práctica indican, sin embargo, que no hay casi ninguna posibilidad de peligro, ya que las zonas inestables se pueden identificar por adelantado y tomar medidas al respecto. Por otra parte, la intensidad de esta posible actividad sísmica es muy baja. Las causas reales de tales terremotos son tensiones tectónicas naturales. Se requiere un conocimiento detallado del sustrato geológico, a fin de reducir al mínimo los impactos ambientales de la explotación tanto a profundidad como cerca de la superficie. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011).

1.7.4.3. Escenarios mundial y nacional de potencial geotérmico

Si bien la energía geotérmica es abundante y renovable con la tecnología actual sólo una pequeña fracción de los recursos mundiales se explota para producir electricidad y otras aplicaciones directas de calentamiento. La generación geotermoeléctrica se inició en Italia (en Larderello, Toscana) en 1901, y en México (en la localidad de Pathé, Hidalgo) en 1959. Actualmente se explota en 24 países para producir electricidad (Bertani, 2007, citado por: Santoyo y Barrgan-Reyes, 2010), y en más de 60 países en usos directos (Lund, *et al*, 2005, citado por: Santoyo y Barrgan-Reyes, 2010). Figura 1.34.

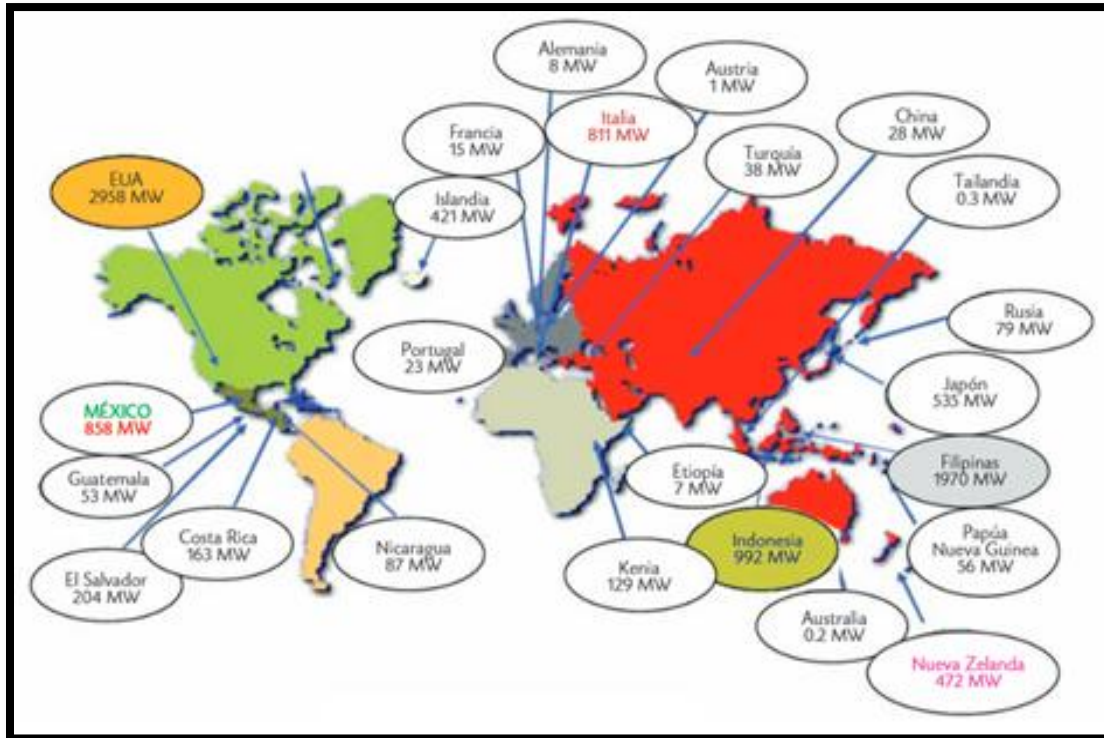


Figura 1.34. Capacidad total geotermoeléctrica instalada (Santoyo y Barragán; 2010)

México cuenta actualmente con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 965 MW, a través de la explotación de cuatro campos geotérmicos:

Cerro Prieto, Baja California (720 MW) (Gutierrez-Negrín *et al*, 2005, citado por: Santoyo y Barragan-Reyes, 2010), es el campo más grande conocido, dominado por el agua geotérmica en el mundo y se encuentra en el Estado de Baja California, al noroeste de México, cerca de la frontera con los EE.UU. Es probablemente uno de los campos geotérmicos investigados más a fondo.

Los fluidos geotérmicos en Cerro Prieto se encuentran en rocas sedimentarias (areniscas del Terciario) cuyo cemento original ha sido reemplazado por minerales hidrotermales como el cuarzo, calcita, clorita, epidota, prehnite, etc. La fuente de

calor es una anomalía térmica regional resultante del adelgazamiento de la corteza continental en la parte inferior de la cuenca. (Hiriati, 2003).

Los Azufres, en Michoacán (195 MW), (Gutierrez-Negrín *et al*, 2005, citado por: Hiriati, 2003), se encuentra dentro de la Faja Volcánica Mexicana, que es una región cubierta por los volcanes del Plioceno -Cuaternario y productos volcánicos que cruzan el país de costa a costa. (Hiriati, 2003).

Las rocas de producción son de origen volcánico (andesitas del Mioceno-Plioceno), pertenecientes a la serie calco-alcalinas, típicas de la Faja Volcánica Mexicana. La generación de energía geotérmica se inició en 1982. En estos momentos hay 10 unidades en funcionamiento: una de 50 MW unidad de condensación (Unidad 7, llamado Tejamaniles), 7 unidades de 5 MW de contrapresión (NOS 2, 3, 4, 5, 6, 9 y 10), y dos de 1.5 MW binario unidades de ciclo (NOS 11,12), por un total de 88 MW. Otras cuatro unidades de condensación, de 25 MW cada una, se han instalado recientemente. Son unidades de 13, 14, 15 y 16, y forman parte del proyecto denominado Los Azufres II. Con éstos, la capacidad instalada en Los Azufres se incrementará a 188 MW. (Hiriati, 2003).

Los Humeros, Puebla (40 MW) (Gutierrez-Negrín *et al*, 2005, citado por: Santoyo y Barragan-Reyes, 2010), está contenida dentro de las rocas volcánicas. Se encuentra ubicado en la parte centro-oriental de México, dentro de la parte oriental de la Faja Volcánica Mexicana.

El campo se encuentra dentro de una caldera del Cuaternario (Caldera Los Humeros). La fuente de calor es la cámara de magma y de los fluidos geotérmicos son acogidos por andesitas del Terciario. Cubriendo estas andesitas, está una

serie de ignimbritas cuaternarias de baja permeabilidad, actuando como una capa superior de roca para el yacimiento geotérmico. (Hiriat, 2003).

Las Tres Vírgenes, (10 MW) (Gutierrez-Negrín *et al*, 2005, citado por: Santoyo y Barragan-Reyes, 2010), se encuentra en la Península de Baja California, en la parte norte del estado mexicano de Baja California Sur, a 32 km al noroeste de la ciudad de Santa Rosalía. El campo está cerca de los de La Virgen, El Azufre y El Viejo volcanes y cae dentro de la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, que es la mayor reserva de la biosfera en América Latina. El campo geotérmico se extiende sobre un área de 57 km² en una elevación media de 720 m sobre el nivel del mar.

La fuente de calor del sistema se relaciona con la cámara de magma del volcán La Virgen, y las rocas intrusivas (granodioritas) la sede de los fluidos geotérmicos, con una permeabilidad secundaria baja. Estas rocas son parte del sótano intrusivo regional, y se sobreponen por rocas volcano- sedimentarias.

Varios pozos de exploración han sido perforados en este campo, cuatro de ellos son productores y dos pozos son de inyección. En julio de 2001 se instalaron en el campo las primeras unidades de energía, dos unidades de condensación de 5 MW cada una. (Hiriat, 2003).

Aunque también existen otras zonas explotables como lo son: La primavera, Piedras de Lumbre, y el cinturón volcánico de nuestro país. Figura 1.35. Esta producción representa alrededor del 2.97% de generación por fuente (datos reportados por la Comisión Federal de Electricidad, 2010) lo cual significa en el contexto mundial que México ocupa el cuarto lugar en generación

geotermoeléctrica, después de Estados Unidos (2 mil 687 MW), Filipinas (mil 970 MW) e Indonesia (992 MW).

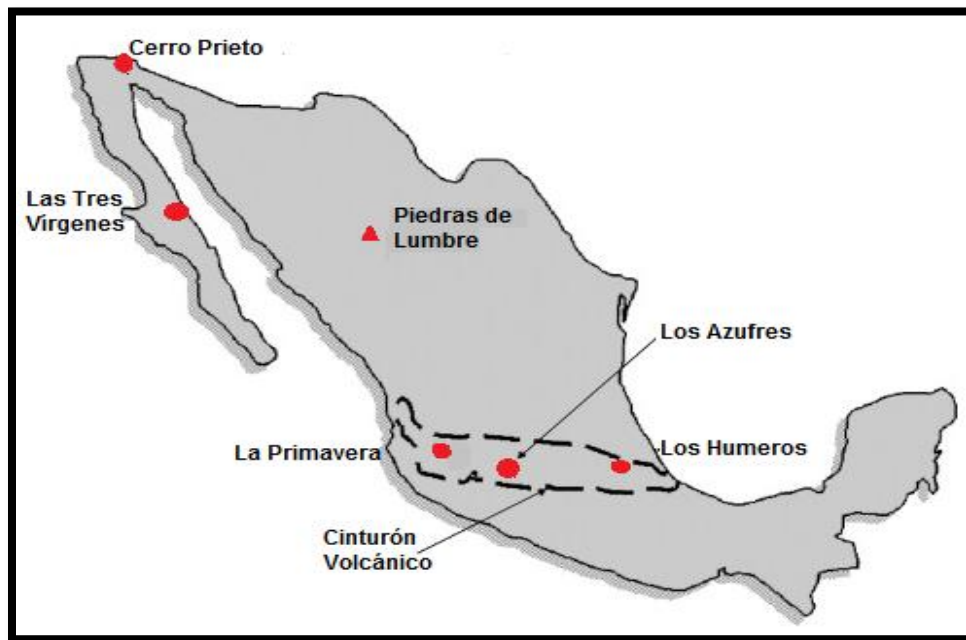


Figura 1.35. Localización de campos geotermales en México (Hiriart, 2003)

1.7.4.4. Usos directos de la energía geotérmica

Los recursos geotérmicos con temperaturas de más de 200°C usualmente se aprovechan en aplicaciones directas. En 2005 se tuvo una producción total de aproximadamente 28,268 MW a partir de fuentes geotérmicas en 72 países, de los cuales 52% fue usado en acondicionamiento térmico de espacios y viviendas, 30% en balneología (balnearios) y 18% en aplicaciones térmicas para procesos industriales y calentamiento de invernaderos y estanques. Entre otras aplicaciones destacan el acondicionamiento térmico de espacios (viviendas, edificios o distritos) a través del uso de bombas de calor geotérmicas, las cuales aprovechan el gradiente de temperatura del suelo (a profundidades entre 2 y 100 m), como

fuelle o sumidero de calor. El calor adquirido de esta forma a continuación se puede utilizar directamente para calentar edificios o proporcionar calor para otras formas de consumo. Es igualmente atractivo utilizar la energía geotérmica para la generación de energía, ya que está disponible todo el día. Por lo tanto, las plantas de energía geotérmica podrían ser una importante contribución al suministro de carga base de energía renovable. (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011). En invierno el calor es extraído de la tierra y liberado en el espacio a acondicionar, mientras que en el verano el proceso se invierte. Las bombas de calor geotérmicas constituyen la aplicación líder de energías renovables a nivel mundial, por su alta eficiencia y economía, ya que reducen el consumo de energía en un 30% a 60% con respecto a los sistemas convencionales de acondicionamiento.

Otros proyectos piloto han sido desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad para la extracción de fertilizantes, calefacción de oficinas e invernaderos y el secado de madera.

1.7.4.5. Líneas futuras de investigación

Desde el punto de vista técnico y con el objeto de que “la explotación geotérmica sea más sustentable”, confiable, competitiva y rentable” es crucial incrementar las tareas de investigación y desarrollo tecnológico en el corto y mediano plazo para:

- 1) Mejorar los métodos de exploración y explotación de los sistemas geotérmicos convencionales, incluyendo el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de los sistemas de roca seca caliente.

- 2) Asimilar o desarrollar tecnologías para la perforación y construcción de pozos geotérmicos direccionales.
- 3) Plantear estrategias para el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos, considerando la generación de electricidad con plantas convencionales y de ciclo binario, esquemas de co-generación y usos directos en procesos es cascada.
- 4) Optimizar las plantas de generación mediante la investigación de nuevos ciclos termodinámicos más eficientes, entre otras opciones. (Santoyo y Barragan-Reyes, 2010)

Finalmente la energía geotérmica es un recurso renovable, sustentable, limpio y seguro que permite la generación de electricidad de forma continua y confiable, que ahorra en el uso de combustibles fósiles y contribuye así a diversificar las fuentes de energía.

La generación geotermoeléctrica tiene un factor de capacidad (horas anuales de operación frente al total posible) mucho mayor que otras energías renovables. Las plantas geotermoeléctricas pueden operar continuamente las 24 horas al día y los 365 días al año.

En México existe identificado un potencial muy alto de recursos geotérmicos y experiencia en su explotación. Sin embargo, es necesario continuar realizando tareas de investigación y desarrollo tecnológico para su óptimo aprovechamiento y, sobre todo, para identificar y explotar los sistemas promisorios de roca seca caliente que estén disponibles en el país. (Santoyo y Barragan-Reyes, 2010).

CAPITULO 2 GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA

Para la población en los países en desarrollo, la energía de la biomasa, como residuos agrícolas y residuos de cultivos es una de sus principales fuentes de energía (Rosillo-Calle; 2007, citado desde Chew y Doshi). El consumo de energía está estrechamente relacionado con el crecimiento económico. La demanda de energía se incrementará progresivamente con el rápido crecimiento demográfico y el desarrollo económico.

Sin embargo la fuente de energía no renovable como el combustible fósil es agotable. En la búsqueda de posibles fuentes de energías renovables, la energía de la biomasa se considera como una opción viable. En 2005 la Agencia Internacional de Energía (AIE) modela una tecnología que consiste en un conjunto de rutas mostrando los escenarios nombrados como “mapas azules”, esto para lograr un futuro de energía limpia, inteligente y competitiva (IEA Work for the G8; 2008, IEA Now or Never; 2008, citado desde Chew y Doshi; 2011). Bajo este escenario denominado Mapa BLUE, la utilización de biomasa proyecta incrementar tres veces en el año 2050 (IEA. Bioenergy, Technology roadmaps; 2010, citado desde Chew y Doshi; 2011).

La biomasa suele ser aclamado como un combustible de “carbón neutral”, como la biomasa es parte del ciclo biológico. El dióxido de carbono producido a partir de la combustión de biomasa es transformado en nueva composta para los cultivos. La biomasa es un combustible de bajo contenido de carbono y una forma de combustible sustentable que ofrece una reducción significativa de las emisiones netas de carbono en comparación con los combustibles fósiles (Global trends in green energy: new power capacity from renewable sources tops fossil fuel again in US, Europe, 2010, Citado desde Chew y Doshi; 2011). En los últimos siete años, Brasil ha reducido un estimado de 83 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono de la utilización de biocombustibles en sus vehículos. (EU renewable energy policy; 2010 citado desde Chew y Doshi; 2011).

La utilización de la biomasa para fines domésticos se ha ido implementando tanto en países desarrollados y en vías de desarrollo en los últimos años. Esta fuente de energía renovable en 2009 representó más de la mitad de la capacidad de potencia que se acaba de instalar en Europa y E.E.U.U. En el mismo año, la cuota de la biomasa en la producción de energía superó al petróleo en Suecia, mientras que Brasil invirtió \$7.8 mil millones en energía limpia (UNEP. Global trends in renewable energy investment, 2010, citado desde Chew y Doshi; 2011). Estas

tendencias globales muestran un futuro alentador para los recursos energéticos renovables (Chew y Doshi; 2011).

Las políticas de energía renovables se encuentran entre el mecanismo clave para superar las barreras de mercado en la promoción de las energías renovables. A principios de 2010, se estimó que 83 países tenían políticas que promovían la generación de energía renovable (REN21. Renewables 2010 global status report Paris: REN21 Secretariat; 2010, citado desde Chew y Doshi; 2011). Las naciones de la Unión Europea tienen como objetivo que un 20% de la cuota de energía final en el año 2020 sea renovable bajo el esquema de Energía Renovable y Cambio Climático (EREC Renewable Energy Technology roadmap; 2010, citado desde Chew y Doshi; 2011). China se propone alcanzar el 15% de contribución en su energía primaria en el año 2020 bajo el Plan de Mediano y Largo Plazo para el Desarrollo de la Energía Renovable (MLTPRE) (Campbell RJ; 2010, citado desde Chew y Doshi; 2011). Nueva Zelanda anunció un objetivo nacional del 90% de electricidad renovable en 2025 (Parker D., 2008, citado desde Chew y Doshi; 2011). Y en cuanto a México el sector pecuario tiene un enorme potencial para la producción de biogás. Tiene 12 millones de animales en el sector porcino, 5 millones en el lechero y 367 millones en el avícola, que generan una cantidad abundante de desechos que podrían ser aprovechados para la generación de este gas. (Seasson, 2005).

Tabla 2.1 Residuos vegetales y posible producción de biogás (Olaya y Salcedo; 2009)

Material fresco	% sólidos totales	% de sólidos orgánicos	Litros de biogás por un Kg de sólidos orgánicos
Paja de arroz	89	93	220
Paja de trigo	80	94	250
Paja de maíz	82	91	410

Tabla 2.1 Residuos vegetales y posible producción de biogás (Olaya y Salcedo; 2009) (Cont.)

Material fresco	% sólidos totales	% de sólidos orgánicos	Litros de biogás por un Kg de sólidos orgánicos
Hierba fresca	24	89	410
Jacinto de agua	7	75	325
Bagazo	65	78	160
Desecho de verdura	12	86	350

La producción mundial de biomasa se estima en 146 billones de toneladas métricas al año en su mayoría, en cuanto al crecimiento de plantas en su mayoría son silvestres (Manahan SE. *Fundamentals of environmental chemistry*. CRC Press; 2000, citado desde Chew y Doshi; 2011). Sin embargo, sólo una pequeña fracción se utiliza para la generación de energía, ya que hay ciertos inconvenientes en el uso de biomasa en bruto, como fuente de combustible. El costo logístico de la biomasa es relativamente alto; por sus características no deseables tales como alto contenido de humedad y el ataque biológico (Prins *et al.*; 2006, citado desde Chew y Doshi; 2011). Los avances de la tecnología en áreas como el sistema de generación de energía y el proceso de selección tendrán un papel importante, ayudar a las naciones a nivel global en la entrega de sus compromisos y actividades en materia de energía renovable. En la década reciente, una técnica de pre-tratamiento conocido como “torrefacción” propuesto para el proceso de conversión térmica ha mostrado resultados positivos (Chew y Doshi; 2011).

2.1 Biomasa

La biomasa se define generalmente como el material biológico derivado de las plantas o animales, así como la basura y los residuos (Twidell y Weir; 2005, citado desde Chew y Doshi; 2011).

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de los árboles, madera, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida para el ser humano.

El trabajo actual está enfocado principalmente al uso de este residuo o desecho para la generación de combustibles que permitan generar energía, por lo que se le dedica un capítulo basado en su estudio.

La biomasa y su utilización han estado íntimamente asociadas con las energías renovables en los últimos años. Sin embargo las propiedades indeseables de la biomasa como el alto contenido de humedad y su carácter heterogéneo suponen un obstáculo para su competitividad en el mercado de generación de energía. (Chew y Doshi; 2011).

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía, por ejemplo en combustibles líquidos o gaseosos, lo cual serán más convenientes y eficientes. Así aparte de la combustión directa se pueden distinguir dos tipos de procesos: el termo-químico y el bio-químico (Panwar *et al.*; 2012), que más adelante se explicarán detalladamente.

2.1.1 Clasificación de la Biomasa.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como los desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, las actividades productivas, etc., por eso, los aspectos correspondientes en infraestructura, manejo y recolección del material, deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar (Manual Sobre la Energía de la Biomasa, 2002).

La biomasa puede clasificarse generalmente de la siguiente manera:

Tabla 2.2 Residuos orgánicos de diversos orígenes (Varnero y Arellano, 1991; citado desde Varnero, 2009).

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado
Residuos de origen humano	heces, basura, orina
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosechas, melazas, residuos de semillas
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas

A continuación se explican brevemente algunos de ellos.

- Residuos de la agricultura y de los cultivos silvícolas: residuos no comestibles de los cultivos de alimentos (por ejemplo, hojas y desechos vegetales) y cultivos energéticos (por ejemplo, maíz, remolacha y trigo)

ofrecen un gran potencial para la digestión anaerobia (Ress *et al.*; 1998, citado desde Appels, *et al.*; 2011) así mismo (Ress *et al.*) mostraron que la celulosa se puede degradar en condiciones anaerobias con una eficiencia de aproximadamente 80%. La celulosa que contiene el material como la paja del trigo, el arroz y el sorgo (planta cultivada en México) es ampliamente disponible como un producto de desecho de la producción de alimentos. La siguiente tabla proporciona una visión general del rendimiento de metano típico, obtenida a través de la digestión anaerobia de los diferentes cultivos, así como su capacidad de producción por hectárea. Estos rendimientos incluso pueden ser mejorados por la co-digestión con otros residuos, la mezcla con diferentes residuos proporciona los nutrientes necesarios para mejorar la eficiencia del digestor. (Appels, *et al.*; 2011).

Tabla 2.3 Rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia de los residuos no comestibles de los cultivos. (Deublein y Steinhauser; 2008, citado desde Appels, *et al.*; 2011).

Cosecha	Rendimiento de los cultivos (T. de cosecha/ ha)	Rendimiento de metano (m ³ /kg)
Remolacha azucarera	40–70	0.39–0.41
Betabel	80–120	0.40–0.42
Maíz	40–60	0.29–0.34
Mezcla de mazorca de maíz	10–15	0.35–0.36
Trigo	30–50	0.35–0.38
Hierba	22–31	0.29–0.32
Trébol rojo	17–25	0.30–0.35
Girasol	31–42	0.23–0.30

Tabla 2.3 Rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia de los residuos no comestibles de los cultivos. (Deublein D., Steinhauser A.; 2008, citado desde Appels, *et al.*, 2011).

(Cont.)

Cosecha	Rendimiento de los cultivos (T. de cosecha/ ha)	Rendimiento de metano (m ³ /kg)
Grano de trigo	6–10	0.37–0.40
Granos de centeno	4–7	0.30–0.41
Sorgo	40–80	0.29–0.32
Triricale	28–33	0.32–0.34

Tabla 2.4 Rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia de los residuos de frutas y vegetales. (Deublein y Steinhauser 2008, citado desde Appels, *et al.*; 2011).

Tipo de desecho de fruta o vegetal	Rendimiento de metano (m ³ /kg)
Cáscara de mango	0.37–0.52
Cáscara de plátano	0.24–0.32
Cáscara de naranja	0.46
Gajos de naranja	0.50
Cáscara de mandarina	0.49
Gajos de mandarina	0.43
Cáscara de limón	0.47
Cáscara de uvas	0.28

Tabla 2.4 Rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia de los residuos de frutas y vegetales. (Deublein D., Steinhauser A.; 2008, citado desde Appels, *et al.*, 2011). (Cont.)

Tipo de desecho de fruta o vegetal	Rendimiento de metano (m ³ /kg)
Cáscara de granada	0.31
Tomates (podridos)	0.21–0.38
Cáscara externa de la cebolla	0.40
Hojas de jardín	0.23
Hojas de zanahoria	0.24
Hojas de col	0.31
Mandarinas enteras (podridas)	0.50

- Cultivos herbáceos: mala hierba y pasto.
- Biomasa acuática y marina: algas, jacinto de agua, malas hierbas, plantas, camas de pasto acuático, alga marina y arrecifes corales.
- Desechos: desechos sólidos municipales, lodo de aguas residuales municipales, desechos animales e industriales (Panwar *et al.*; 2011).

El rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia, de varios tipos de residuos sólidos urbanos (expresado en m³ de metano por kg de sólidos secos orgánicos (SAO)) se determinó por Owens y Chynoweth. (Owens y Chynowethy, 1993, citado desde Appels, *et al.*; 2011) se resume en siguiente tabla:

Tabla 2.5 Rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia de los residuos sólidos urbanos (RSU) (Appels, *et al*, 2011).

Tipo	Rendimiento de (m ³ /kg SAO)
Mecánicamente ordenada (fresca)	0.22
Mecánicamente ordenada (desechado)	0.22
Ordenados a mano	0.21
Hierba	0.21
Hojas	0.12
Ramas	0.13
Desechos de jardín mixta	0.14
Papel de oficina	0.37
Papel corrugado	0.28
Papel periódico	0.10

Cantidades considerables de residuos ricos en lípidos son producidos por la industria de procesamiento de alimentos, mataderos, la industria del aceite comestible, la industria de productos lácteos y almazaras. En todos estos flujos de residuos, los lípidos son a menudo las principales y más problemáticas componentes (Cirne, *et al.*, 2007, citado desde Appels *et al.*, 2011). A altas concentraciones, los lípidos causan diferentes tipos de problemas en los digestores anaerobios, incluyendo la obstrucción, la adsorción a la biomasa (que

causa problemas de transferencia de masa) y la inhibición microbiana debido a la degradación y por lo tanto a la presencia de ácidos grasos de cadena larga (Angelidaki y Ahring, 1992; *citado desde Appels et al.*, 2011). Por lo tanto, estos materiales se digieren con un co-digestor, con otros tipos de sustrato para reducir la concentración de lípidos en el digestor (Lansing, *et al.*, *citado desde Appels et al.*, 2010).

- **Estiércol:** El potencial de metano en el estiércol proviene de la digestión de los componentes orgánicos presentes en las heces y la paja utilizada como material de cama, que consiste principalmente en hidratos de carbono, proteínas y lípidos (Moller, *et al.*, 2004, *citado desde Appels et al.*, 2010). El estiércol es un material de alimentación utilizado con frecuencia para digestores anaerobios porque es fácilmente disponible y muy adecuado para el desarrollo de microorganismos anaeróbicos debido a su alto contenido en nitrógeno. Sin embargo, la concentración de amoníaco en algunos tipos de estiércol excede el umbral de concentración de inhibición. Por lo tanto, el estiércol se aplica con frecuencia en la co-digestión con otros residuos que se caracterizan por bajas concentraciones de nitrógeno (Ward, *et al.*, 2008; *citado desde Appels et al.*, 2010). Una motivación adicional para la digestión anaerobia de estiércol es el hecho de que la degradación natural de estiércol da lugar a la emisión incontrolada de CH₄ durante el almacenamiento, lo que es indeseable debido a sus efectos del calentamiento global. La digestión anaerobia controlada del estiércol evita esta liberación no controlada (Moller, *et al.*, 2004, *citado desde Appels et al.*, 2010). La siguiente tabla muestra el rendimiento de metano obtenido a través de la digestión anaerobia de diferentes tipos de estiércol.

Tabla 2.6 Rendimiento de metano, que se obtiene a través de la digestión anaerobia de tipos de estiércol. (RSU). (Moller, 2005, citado desde Appels, *et al.*, 2011).

Tipo de estiércol	Rendimiento de metano (m ³ /kg)
Cerdo	0.36
Cochina	0.28
Vacas	0.15

- Los lodos de depuradora: La eliminación de los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales es un problema de importancia creciente, lo que representa hasta un 50% (Appels *et al.*, 2010) de los gastos corrientes de funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales (Appels, *et al.*, 2010). Una PTAR municipales generan lodos como un subproducto de los procesos físicos, químicos y biológicos utilizados durante el tratamiento. Cantidades diarias, en términos de sólidos secos en rangos que van de 60 a 90 g de sólido seco por habitante (EH), es decir, casi 10 millones de toneladas de lodos secos por año (Appels, *et al.* 2008). La digestión anaerobia se considera generalmente que es una tecnología económica y respetuosa del medio ambiente para el tratamiento de estas enormes cantidades de lodos, ya que tiene la capacidad de reducir (por alrededor de 40%) la carga total de los biosólidos a ser dispuestos (Appels, *et al.*, 2008). Otras características beneficiosas incluyen la estabilización de los lodos, la mejora de la deshidratabilidad de los lodos, y el potencial para la inactivación y la reducción de microorganismos patógenos (Appels, *et al.*, 2011). La digestión anaerobia de los lodos de depuradora tiene la mayor capacidad de producción de biogás en todo el mundo (OVAM, *et al.*, 2010, citado desde Appels, 2011). El rendimiento de

metano obtenido a través de la digestión anaerobia es muy dependiente de la composición de los lodos, sin embargo, en teoría, debería ser alrededor de $0.590 \text{ m}^3/\text{kg}$ (Owens y Chynoweth, 1993, citado desde Appels, 2011).

2.1.2 Propiedades De La Biomasa

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracteriza. Éstos que se explican a continuación, determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

- *Tipo de biomasa:* los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular.
- *Composición química y física.* Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado gas pobre, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.
- *Contenido de humedad.* El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para

la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como un porcentaje del peso. Para combustibles de biomasa, este es el factor más crítico, pues determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua antes de que el calor esté disponible; por eso, cuando más alto el contenido de humedad, menos el valor calorífico.

Todos los combustibles contienen una cantidad de agua, pero, para la biomasa, los niveles pueden ser altos; esto afecta el valor calorífico y el proceso de combustión.

El valor de la humedad se puede indicar según sea en base seca o en base húmeda: en base seca se define como la fracción del peso del agua dentro de la biomasa y el peso del material seco, expresado como porcentaje. El contenido de humedad en base húmeda es la fracción del peso del agua de la biomasa y el peso total del material.

- *Porcentaje de cenizas.* El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluye la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.
- *Poder calorífico.* El contenido calorífico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calorífico está

relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material. Todas las formas de biomasa tienen un valor calorífico, el cual se expresa como la cantidad de energía por unidad física; por ejemplo, J/kg. Esta es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. Este valor se puede anotar de dos formas diferentes: bruto y neto. El bruto se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por el peso. El neto es la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua en la biomasa, es decir, la cantidad de energía realmente aprovechable. (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

	t(h)	T(°C)	p M (wt %)	p E (wt %)	AC (MJ/Kg)		t(h)	T(°C)	r M (wt %)	r E (wt %)	AC (MJ/Kg)
Biomasa leñosa	1.0	250	85.50	97.93	18.83	Cáscaras de fruta	1.0	220	43.16	43.54	17.17
	0.5	225	88.00	92.68	19.79	(aceite de palma)	1.0	250	36.98	38.39	17.67
Restos de tala	0.5	250	81.00	91.43	21.21		1.0	300	24.18	29.00	20.41
	0.5	275	70.00	82.07	22.03	Cáscara de almendra	1.0	220	77.44	73.80	18.85
Leñosa	0.5	300	52.00	73.09	26.41	(aceite de palma)	1.0	250	73.83	71.18	19.07
	0.5	200	91.00	94.14	21.00		1.0	300	71.27	78.12	21.68
Pino	0.5	225	86.50	90.33	21.20	Alfalfa	1.0	230	87.00	88.28	18.69
	0.5	250	73.00	76.24	21.20		1.0	250	81.60	83.06	18.75
Pino	0.5	275	54.50	61.21	22.80		1.0	280	71.60	77.31	19.89
	0.5	225	89.00	93.92	19.48	Mesocarpio (aceite de palma)	1.0	220	63.08	61.21	19.03
Pino	0.5	250	82.00	89.20	20.08		1.0	250	60.04	58.91	19.24
	0.5	275	73.00	86.29	21.82	Cáscara de maní	1.0	300	52.45	59.30	22.17
Sauce	0.5	300	52.00	71.49	25.38		1.0	250	72.50	81.02	16.35
	1.0	230	92.40	96.51	18.07		1.0	270	67.00	85.18	18.60
Briquetas de madera	1.0	250	88.20	94.37	18.51	Alpiste	1.0	300	55.75	72.25	18.96
	1.0	280	78.10	93.90	20.80		0.5	200	63.29	65.82	19.50
Briquetas de madera	0.5	230	95.10	96.05	20.20		0.5	250	38.26	41.01	20.10
	0.5	250	89.60	92.29	20.60	Paja de arroz	0.5	300	25.30	29.13	21.59
Briquetas de madera	0.5	270	79.80	85.39	21.40		0.5	250	83.00	85.13	20.00
	0.5	290	72.00	78.84	21.90		0.5	270	72.00	76.80	20.80
Briquetas de madera	0.5	220	94.00	95.91	20.43	Aserín	0.5	290	61.50	68.75	21.80
	0.5	250	74.00	78.39	21.21		0.5	200	59.84	59.98	17.16
Horas-Biomasa leñosa	0.5	270	56.00	63.70	22.77		0.5	250	40.32	42.46	18.03
	1.0	220	90.00	94.36	20.99	Gránulos de pajas	0.5	300	36.57	39.90	18.68
Bagaso (caña de azúcar)	1.0	250	65.00	71.63	22.06		1.0	250	67.25	72.48	19.55
	1.0	270	54.00	61.99	22.98		1.0	270	59.50	67.14	20.47
Tallo de algodón	1.0	230	87.50	96.42	17.08	Paja de trigo	1.0	300	42.00	55.10	23.80
	1.0	250	78.90	92.03	18.08		1.0	230	95.00	95.53	17.90
Tallo de algodón	1.0	280	68.60	82.90	18.73		1.0	250	90.00	92.07	18.21
	0.5	200	63.89	83.44	23.94		1.0	280	79.90	89.87	20.02
Tallo de algodón	0.5	250	33.80	45.30	24.57		0.5	200	47.56	56.02	19.84
	0.5	300	30.04	41.02	25.03		0.5	250	41.24	51.05	20.85
	0.5	300	30.04	41.02	25.03		0.5	300	31.61	40.67	21.67

Nota: t (tiempo), T (temperatura), p M (producción de masa), p E (producción de energía), A C (poder calorífico mayor)

Figura 2.1 El análisis último, el análisis inmediato y de mayor poder calorífico (PCS) de diferentes tipos de biomasa (Pach *et al.*, 2002; citado desde Chew y Doshi, 2011).

- **Densidad aparente.** Ésta se define como el peso por unidad de volumen del material en estado físico que presenta, bajo condiciones dadas.

- *Recolección transporte y manejo.* Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructuras de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).
- *Composición química.* Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. En la combustión se quema la parte orgánica. La inorgánica influye en el proceso de combustión y forma a ceniza o residuo sólido que queda después de la combustión. Los elementos químicos más importantes son carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), y azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl). Además, contienen oxígeno (O), lo cual no se determina directamente, sino que se calcula como diferencia entre el peso total y la suma de los otros elementos, más la ceniza. (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

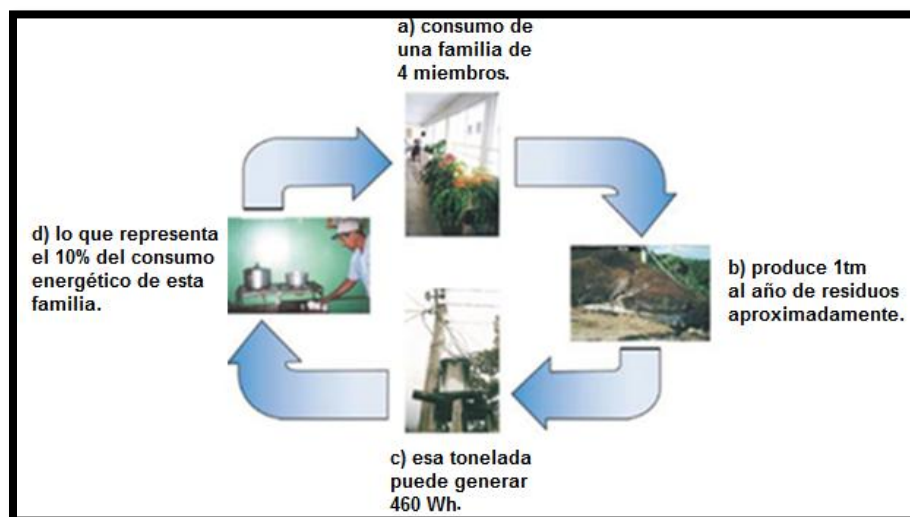


Figura 2.2 Ejemplo del ciclo energético de residuos sólidos urbanos (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

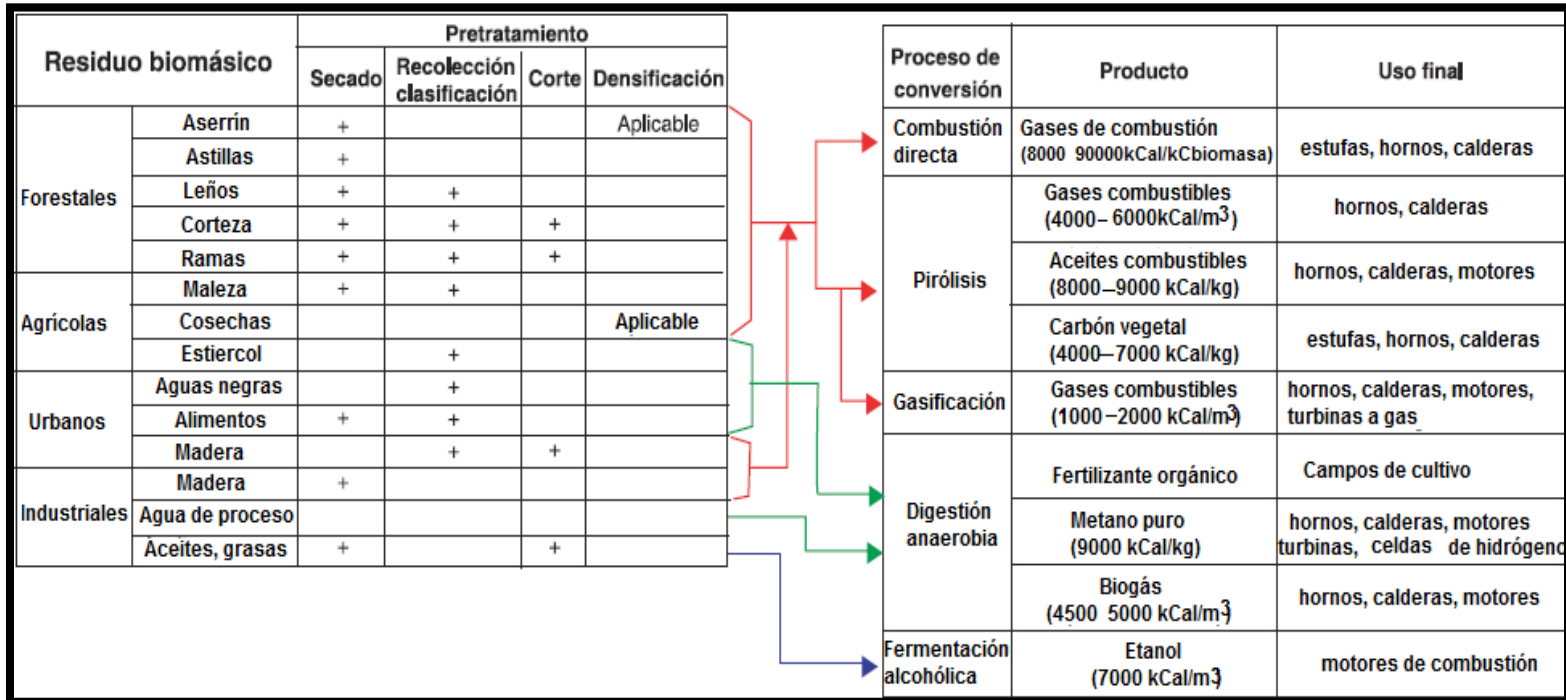


Figura 2.3 Vías de transformación de la biomasa en energía (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

2.1.3 Ventajas De La Biomasa

La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global, de hecho, permite reducir los niveles de dióxido de carbono y los residuos de los procesos de conversión, aumentando los contenidos de carbono de la biósfera.

- La captura del metano de los desechos agrícolas y de los rellenos sanitarios, y la sustitución de derivados de petróleo, ayudan a mitigar el efecto invernadero y la contaminación de los acuíferos.
- Los combustibles biomásicos contienen niveles insignificantes de sulfuro y no contribuyen a las emanaciones que provocan “lluvia ácida”.

- La combustión de biomasa produce menos ceniza que la de carbón mineral y puede usarse como insumo orgánico en los suelos.
- La conversión de los residuos forestales, agrícolas y urbanos para la generación de energía reduce significativamente los problemas que trae el manejo de estos desechos.
- La biomasa es un recurso local que no está sujeto a las fluctuaciones de precios de la energía, provocadas por las variaciones en el mercado internacional de las importaciones de combustibles. En países en desarrollo, su uso reduciría la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo.
- El uso de los recursos de biomasa puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal.
- Las plantaciones energéticas pueden reducir la contaminación del agua y la erosión de los suelos; así como a favorecer el mantenimiento de la biodiversidad (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

2.1.4 Desventajas De La Biomasa

Una de las principales desventajas es la presencia de humedad, lo que penaliza su rendimiento, especialmente en los procesos termoquímicos (Chew y Doshi, 2011).

- Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía; es decir, se requiere su disponibilidad en grandes volúmenes para producir

potencia, en comparación con los combustibles fósiles, por lo que el transporte y manejo se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave para este problema es ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa, como aserraderos, ingenios azucareros y granjas, donde los desechos de aserrío, el bagazo de caña y las excretas de animales están presentes.

- Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. Si se usa combustión a altas temperaturas, también se producen óxidos de nitrógeno.
- La producción y el procesamiento de la biomasa pueden requerir importantes insumos, como combustible para vehículos y fertilizantes, lo que da como resultado un balance energético reducido en el proceso de conversión. Es necesario minimizar el uso de estos insumos y maximizar los procesos de recuperación de energía.

Aún no existe una plataforma económica y política generalizada para facilitar el desarrollo de las tecnologías de biomasa, en cuanto a impuestos, subsidios y políticas que cubren, por lo general, el uso de hidrocarburos. Los precios de la energía no compensan los beneficios ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.

- El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones en el contenido de humedad, clima y la densidad de la materia prima. (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

2.1.5 Combustibles generados a partir de la biomasa.

- **Combustibles alcohólicos.:** De la biomasa se pueden producir combustibles líquidos como el etanol y metanol. El primero se produce por medio de la fermentación de azúcares y, el segundo por la destilación destructiva de madera. Esta tecnología se ha utilizado durante siglos para la producción de licores y, más recientemente, para generar sustitutos de combustibles fósiles para transporte.
- **Biodiesel.:** A diferencia del etanol, que es un alcohol, el biodiesel se compone de ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas. A partir de un proceso llamado “transesterificación”, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol (etanol o metanol) y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. Éstos pueden mezclarse con diesel o usarse directamente como combustibles en motores comunes. El biodiesel se utiliza, típicamente, como aditivo del diesel en proporción del 20%, aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir considerablemente las emisiones, el humo negro y el olor.
- **Gas de rellenos sanitarios:** Se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Éste es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la contaminación y el

riesgo de explosiones en estos lugares y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

En la siguiente tabla se muestra una distribución de los procesos de conversión aplicables, de acuerdo con las características y el tipo de biomasa, así como los posibles usos finales de la energía convertida:

Tabla 2.7 Procesos de conversión de biomasa en energía (Manual sobre energía renovable. Biomasa 2002).

Tipo de Biomasa	Características físicas	Procesos de conversión aplicables	Producto final	Usos
Materiales orgánicos de alto contenido de humedad	estiércol residuos de alimentos efluentes industriales residuos urbanos	Digestión anaerobia y Fermentación alcohólica	Biogás Metanol Etanol Biodiesel	Motores de combustión Turbina de gas Hornos y calderas Estufas domésticas
Materiales lignocelulósicos (cultivos energéticos, residuos forestales de cosechas y urbanos).	polvo astillas pellets briquetas leños carbón vegetal	Densificación Combustión directa Pirólisis Gasificación	Calor Gas pobre Hidrógeno Biodiesel	Estufas domésticas Hornos y calderas Motores de combustión Turbina de gas

Actualmente, la combustión directa es el proceso más aplicado para usos energéticos de la biomasa. Procesos más avanzados como la gasificación y la digestión anaerobia han sido desarrollados como alternativas más eficientes y convenientes, y para facilitar el uso de la biomasa con equipos modernos. Sin embargo, hasta la fecha, la aplicación de éstos últimos no es tan común por tener

un costo más alto y la complejidad de su aplicación (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

2.1.6 Riesgos Que Enfrenta La Biomasa

La biomasa como cualquier otra fuente de energía tiene ventajas y desventajas. Uno de los inconvenientes más evidentes es la naturaleza heterogénea de la biomasa. La materia prima de la biomasa puede diferir considerablemente en términos de características físicas, químicas y morfológicas. La biomasa tiene una densidad relativamente baja de energía y alto contenido de humedad en su forma sin tratamiento en comparación con los combustibles fósiles. Se requiere una mayor carga de biomasa para generar la misma cantidad de energía en comparación con los combustibles fósiles. La mayoría de la biomasa de origen vegetal es pesada y es fácil a que esté sometida al ataque de hongos y pueda biodegradarse con facilidad. La biomasa de origen vegetal depositada en diversos sitios sufre la vulnerabilidad de degradarse, la mayoría de las fuentes de biomasa reduce en gran medida la competitividad de ésta, la presencia de impurezas incrementa la propagación de cenizas, así como los factores climáticos, la mala ubicación e incluso las prácticas de cultivo pueden contribuir a que varíe el proceso (Rosillo-Calle, *et al.*, 2007, citado desde Chew y Doshi, 2011). Todas las características antes mencionadas, generan un mayor costo para la preparación de materia prima, la manipulación y el transporte (Chew y Doshi, 2011).

2.1.6.1 Almacenamiento De La Biomasa

La elección de un lugar apropiado para instalaciones de almacenamiento de biomasa no sólo está influenciada por el tipo y características de los materiales de biomasa, sino también se ve limitada por las opciones de transporte. Además, algunos investigadores recomiendan el campo de almacenamiento de biomasa para reducir los costos de entrega global (Allen, *et al.*, 1998 y Huisman *et al.*, 1997, citado desde Rosendahl, 2013).

2.1.6.2 El Transporte De La Biomasa

Varios investigadores han utilizado la programación lineal entera para identificar las estrategias óptimas de transporte de la biomasa (para decidir sobre los tipos y cantidades suministrados) con sujeción a las limitaciones en la disponibilidad de la misma, la facilidad de transporte y la demanda de energía (Diekema *et al.* 2005; De Mol *et al.*, 2008, citado desde Rapp *et al.*, 2010).

Graham y otros investigadores (2010) utilizaron un modelo de Sistema de Información Geográfica (SIG) para estimar el costo mínimo marginal del suministro de biomasa en once estados de los Estados Unidos. Su trabajo representó los costos directos de transporte y los costos indirectos asociados en el impacto medioambiental de la biomasa (Perpiñá *et al.*, 2009), también han propuesto un modelo basado en SIG, que identifica una biomasa óptima, sujeto a diversos escenarios. Se centra en la disponibilidad de materiales de biomasa y la viabilidad de las redes de distribución en la Comunidad Valenciana en el Este de España.

2.2 Procesos de conversión de la biomasa en energía.

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Los biocombustibles se pueden clasificar principalmente en tres tipos, los combustibles de madera, agro-combustibles y subproductos de origen municipal que se basan en la fuente de biomasa utilizada. La Figura 2.4 resume las opciones tecnológicas para convertir la biomasa en energía, tal como el biogás combustibles líquidos o sólidos procesados. (Food and Agricultural Organization of the United Nations. UBET Unified Bioenergy Terminology; 2004).

Los procesos de conversión de biomasa se clasifican en tres categorías:

- Procesos de combustión directa
- Procesos termo-químicos
- -Procesos bio-químicos

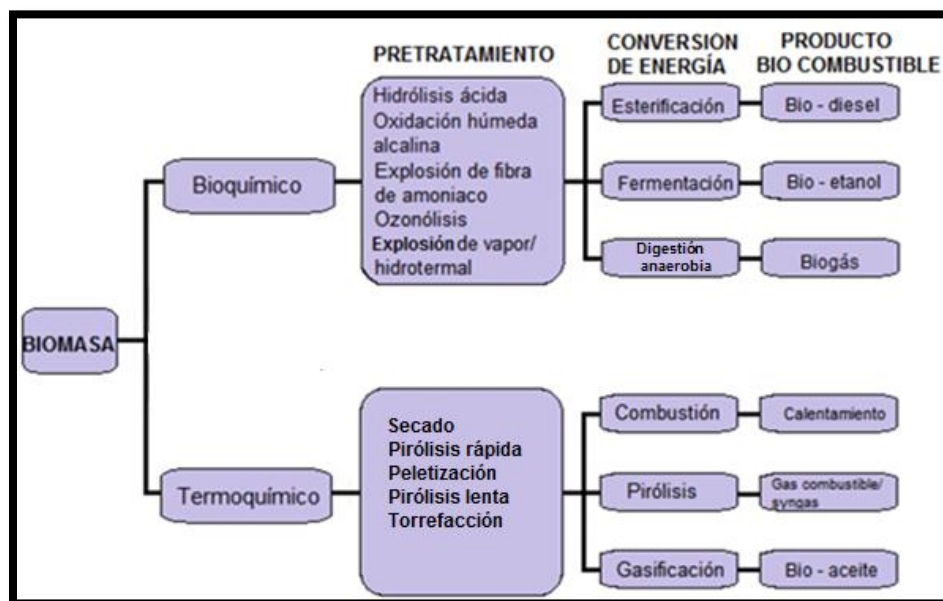


Figura 2.4 Resumen de los procesos de conversión de Biomasa en energía (Chen y Cheng, 2011, *et al.*, citado desde Chew y Doshi, 2011).

2.2.1 Procesos de transformación de la biomasa

2.2.1.1 Pretratamientos termoquímicos

2.2.1.1.1 Secado

El secado del combustible de la biomasa mejora la eficiencia de la combustión, incrementa la producción de vapor, usualmente reduce las emisiones de CO₂ y mejora la operación de la caldera. En una caldera o gasificador, la humedad en el combustible debe primero calentarse y evaporarse, y el secado es más eficiente en equipos diseñados especialmente para éste propósito. Si el calor para el secador es recuperado del gas de los humos de la caldera o gasificador o de otras fuentes de calor de los recursos, la eficiencia se incrementa más. Una caldera de biomasa tiene mejor rendimiento cuando el combustible tiene un secado óptimo. (Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat y Power, 2012).

Existen diferentes tipos de sacado para la utilización de la biomasa se emplea el siguiente:

- Secado Forzado. el secado forzado consiste en la utilización de un equipo de secado específico en el que mediante el empleo de un combustible (en la actualidad también se utilizan secadores solares) se genera un agente secante que, por sus características, permite reducir el contenido de humedad del recurso incluso por debajo de la humedad del recurso incluso por debajo de la humedad de equilibrio con el ambiente y disminuir el tiempo de secado respecto al secado natural. Por lo contrario los costos de

operación considerablemente más llevados que los correspondientes al secado natural.

Los secados utilizados en secado forzado, según como se efectúe la transferencia de calor entre el sólido a secar y el agente secante, se clasifica en:

- Secadores directos: la transferencia de calor entre el agente secante y el sólido tiene lugar por contacto directo entre ellos.
- Secadores indirectos: la transferencia de calor lleva a cabo de forma indirecta (por conducción a través de una pared metálica calentada, etc.). De tal manera que el gas que absorbe la humedad no es el que aporta el calor. Se utiliza para materiales de cierto valor que no permiten el secado a altas temperaturas, cuando es aconsejable que el producto a secar no entre en contacto con el agente desecante, cuando debe recuperarse el gas evaporado, etc.
- Los secadores fluidizados, como su nombre lo indica están basados en la fluidización de los sólidos mediante algún agente secante, habitualmente para la biomasa, se emplea aire caliente.
- Los secadores rotatorios, también llamados de tambor rotatorio o tipo tromel, son los más comúnmente empleados para secar biomasa por lo que el siguiente apartado se dedica exclusivamente a ellos.

Estos secadores directos de tipo rotatorio se componen de una cáscara cilíndrica horizontal o ligeramente inclinada hacia la dirección de salida de material. Al girar la cáscara o tambor, unos elementos denominados elevadores o deflectores levantan los sólidos para dejarlos caer después en forma de cortina de agua a

través del interior de la carcasa. La alimentación entra por un extremo y el producto seco se descarga por el otro.

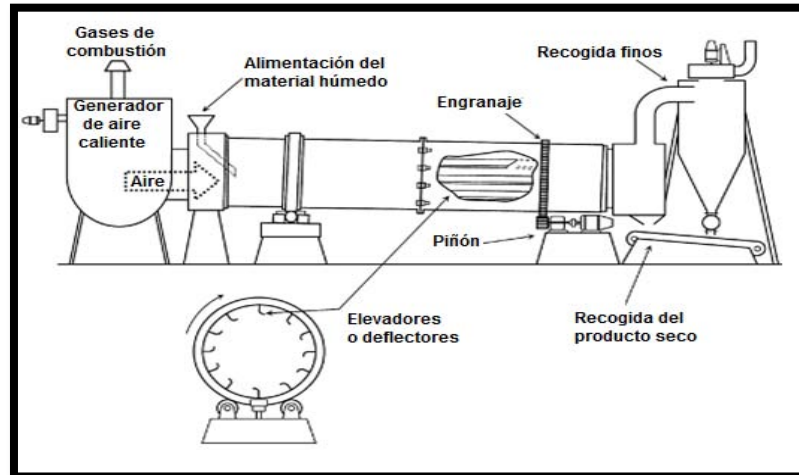


Figura 2.5. Esquema del secadero de tambor rotatorio en paralelo (López y Nogués, 2010).

2.2.1.1.2 Peletización

El peletizado es el proceso de conversión de desechos en combustible sólido. Los pellets se utilizan para combustión térmica. Los más comunes son los pellets de madera. Pueden fabricarse a partir de cualquier tipo de residuo agroforestal: cáscaras de cacahuate, bagazos de caña de azúcar, cáscaras o tallos de azúcar, aserrín, cascarillas de café, paja de arrozales, tallos de girasol, tallos de algodón, desechos de tabaco, tallos de mostaza, desechos de yute, polvo de bambú, desechos de té, paja de trigo, cáscaras de palma, cáscaras de soya, residuos de coco, cascarillas de arroz, desechos forestales, astillas de madera y otros desechos agrícolas, el contenido de humedad debe ser menor del 12% y, el tamaño del grano, de menos de 5x5 m. (KMEC Engineering, 2014).

2.2.1.1.3 Torrefacción

La torrefacción es un proceso de termólisis que somete la materia prima a un tratamiento térmico a temperaturas relativamente bajas de 300-200°C en ausencia de oxígeno. La definición de torrefacción se asocia comúnmente con la “tostadura”, la pirólisis suave, pirólisis lenta, y el pretratamiento químico, de acuerdo con su utilización. Las primeras investigaciones sobre torrefacción se centraron principalmente en el material con base en madera tales como virutas de madera y aserrín. En los últimos años, más estudios incorporan los cultivos agrícolas y residuos agroforestales. Aunque se investigaron varias fuentes de material de biomasa, las propiedades de productos similares se pueden lograr a través del proceso de torrefacción como la mejora de valor energético, el aumento de la hidrofobicidad y la frialdad; que es una tendencia favorable al proceso termoquímico.

Las propiedades físicas y químicas de la biomasa antes y después de la biomasa son analizadas para encontrar: a) rendimiento, b) contenido energético, c) composición elemental, d) cambio en su principal composición, e) hidrofobicidad y f) fácil trituración (Chew y Doshi, 2011).

2.2.1.2 Procesos termoquímicos de conversión de energía

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de valor más alto, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales son más convenientes para su utilización y transporte.

Se basa en el catalizador de calor y químicos para sintetizar energía secundaria útil. Esta es una opción atractiva para la conversión de biomasa en energía debido

a su mayor eficiencia, mayor versatilidad, así como una gama amplia de materias primas de combustible. La conversión termoquímica de la biomasa en comparación con la conversión biológica es un proceso más rápido. La tecnología de gasificación ofrece ventajas como la reducción de emisiones, eficiencia térmica y la capacidad de generar hidrógeno y otros combustibles de alto valor (Higman, 2003 citado desde Chew y Doshi, 2011). La Gasificación de biomasa y carbón son relativamente idénticos, su descomposición térmica genera productos gaseosos similares. Este hecho ofrece una flexibilidad considerable en el costo, su funcionamiento y alcance de energía secundaria (Klass, 1998 citado desde Chew y Doshi, 2011).

En vista de los problemas asociados con las características indeseables de la biomasa cruda, el pretratamiento ofrece una solución prometedora para mejorar la eficiencia del proceso antes de la etapa de conversión de energía. (Mosier, *et al.*, 2005, citado desde Chew y Doshi, 2011).

2.2.1.2.1 Procesos de combustión directa.

Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy para extraer la energía de la biomasa. (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002). La combustión de la biomasa es una secuencia de reacciones químicas en la cual el carbono se oxida en dióxido de carbono, y el hidrógeno se oxida en el agua. (Míguez, *et al.*, 2014, citado desde Abuelnuor, *et al.*, 2014).

Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede utilizarse directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de

combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdician y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

Durante la combustión de la biomasa se producen tres tipos diferentes de óxidos de nitrógeno:

NOx térmicos: la producción de los óxidos de nitrógeno térmicos corresponde a la oxidación directa de las moléculas de nitrógeno, y la reacción tiene lugar a altas temperaturas.

NOx rápidos: La rápida formación de óxidos de nitrógeno ocurre en los sistemas ricos en combustibles y pueden ser encontrados en la zona de la flama envueltos por hidrocarburos, y nitrógeno atmosférico.

NOx combustibles: este tipo de contaminante comúnmente surge de combustibles que contienen nitrógeno ya sea sólido o líquido y es formado por la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible. (Abuelnuor, *et al.*, 2014).

Estos resultados se podrían disminuir considerablemente con prácticas mejoradas de operación y un diseño adecuado del equipo. Por ejemplo, secar la biomasa antes de utilizarla reduce la cantidad de energía perdida por la evaporación del agua y para procesos industriales, usar pequeños pedazos de leña y atender continuamente el fuego supliendo pequeñas cantidades resulta en una combustión más completa y, en consecuencia, en mayor eficiencia. Así mismo, equipos como los hornos se pueden mejorar con la regulación de la entrada del aire para lograr

una combustión más completa y con aislamiento para minimizar las pérdidas de calor. (Manual sobre energía renovable. Biomasa; 2002).

2.2.1.2.2 Pirólisis

La pirólisis se define como un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua. (Pirólisis, 2013. Recuperado desde: AgroWaste, 2013).

Cuando la biomasa se quema bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad dicho proceso de combustión se conoce como pirólisis (Manual sobre energía renovable. Biomasa; 2002).

La pirólisis siempre es el primer paso en los procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos primarios, es decir, es utilizada como un proceso de pretatamiento y ésta puede ser de tres tipos:

Pirólisis lenta: Generalmente aparece en horno tradicional de carbón vegetal. La pirólisis lenta de la biomasa es asociada con un alto contenido de carbón (Bridgwater, 2003, citado desde Panwar, *et al.*, 2012). Su temperatura de funcionamiento en proceso de pirólisis lenta por lo general está en el intervalo de 550-950 K y el tiempo de residencia puede ser de varias horas.

La pirólisis lenta es un proceso en el que se utilizan velocidades de calentamiento modestos. Una baja temperatura del proceso y los tiempos de residencia más largos favorecen la producción de carbón vegetal (Suopajarvi, *et al.*, 2013).

Las propiedades de carbón vegetal y productos secundarios resultantes son altamente dependientes de las condiciones de procesamiento. (Suopajarvi *et al.*, 2013).

El rendimiento de carbón vegetal de 30-35% se puede lograr con temperaturas finales entre 450 y 550 °C, con contenido de carbono que van desde más del 80% a casi el 90% (Syred *et al.*, 2006, citado desde Suopajarvi *et al.*, 2013). El aumento de la presión de 0.1 MPa a 1.0 MPa aumenta el rendimiento de carbón vegetal de madera dura y blanda, en promedio, del 30% al 35% (Antal, *et al.*, 2000, citado desde Panwar *et al.*, 2012). Otros factores que afectan a las propiedades del carbón de leña final son el tipo, la naturaleza y la composición del material de alimentación (Demirbas, 2001, citado desde Panwar, *et al.*, 2012).

Existen varias tecnologías para la producción de carbón vegetal que van desde pozos de carbón de arcilla tradicionales a los procesos continuos que se pueden controlar de manera eficiente. El rendimiento de carbón con los hoyos y montículos de tierra tradicional es baja (>10%). Los mayores rendimientos se pueden alcanzar con los hornos de ladrillos, concreto y metal (20-25%). Retortas de proceso por lotes pueden lograr rendimientos de 30% y procesos continuos tales como Lambiotte retorta puede alcanzar 30-35% de rendimiento (Duku, MH, *et al.*, 2011, citado desde Suopajarvi *et al.*, 2013). El calor requerido por el proceso de pirólisis lenta se suministra normalmente por uno de los tres métodos: (1) directamente, por la quema de parte de la materia prima bajo flujo de aire controlado, (2) directamente, al dirigir parte de los gases de combustión del vapor de piroleñoso quema en el reactor, y (3) indirectamente, mediante el calentamiento del reactor fuera con gases de combustión (Antal y Gronli, 2003, citado desde

Panwar *et al.*, 2012). El portador de calor también puede ser otra cosa distinta a los gases de combustión, por ejemplo, arena (Duku, *et al.*, 2011, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

El desarrollo de procesos de productos sólidos, es decir, para producir carbón a partir de biomasa se ha acelerado en los últimos años debido a la aplicación del biochar para la recuperación de suelos (Lehmann, *et al.*, 2006, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013) y la biomasa torrefactada para la producción de energía (Karkania, *et al.*, 2012, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Las tecnologías de pirólisis también se han utilizado en aplicaciones de tratamiento de residuos (Antonioni y Zabaniotou, 2013, citado desde Suopajärvi, *et al.*, 2013). La tecnología de pirólisis asistida por microondas también se ha propuesto para la producción de caracteres sólidos (Masek, *et al.*, 2013 y Meier, *et al.*, 2013, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). El mismo tipo de tecnologías podría utilizarse para la producción de carbón vegetal con propósitos de reducción. Existe una planta comercial de pirólisis lenta (MTK) en Japón que procesa 100 toneladas de biomasa por día en un horno rotativo (Collison, *et al.*, 2009, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). La mayoría de las tecnologías de pirólisis lenta son de pequeña escala y aplicable para producir biochar y energía a partir de desechos agrícolas y residuos forestales por ejemplo, Pro-Natura y Pyreg, (Domac y Trossero, 2008; Weaver, 2011; citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Hay cuatro pasos principales en el proceso de pirólisis lenta continua: pretratamiento, pirólisis, de eliminación de sólidos y la generación de calor (Brown *et al.*, 2011, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Un diagrama de flujo de proceso simplificado para la producción de carbón vegetal por pirólisis lenta se presenta en la figura 2.6.

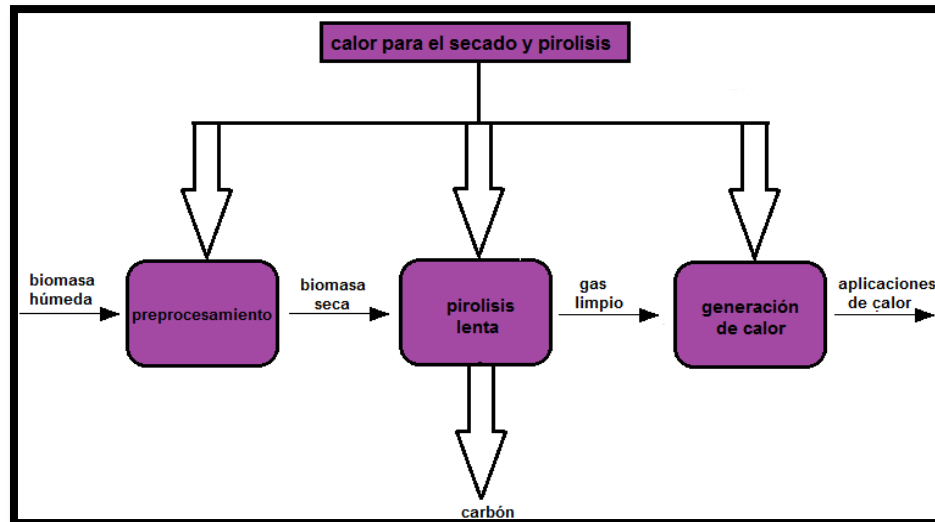


Figura 2.6. Proceso simplificado diagrama de flujo de la producción de carbón vegetal con aplicación de calor y energía. (Brown, *et al.*, 2011, citado desde Suopajärvi, *et al.*, 2013).

Pirólisis rápida: en el proceso de pirólisis rápida de biomasa se calienta a una temperatura elevada ($577-977^{\circ}\text{C}$) en condiciones de atmósfera inerte. El rendimiento de los procesos de pirólisis rápida es de 60-75% en peso de biocombustible líquido, de 15-25% en peso de carbón sólido, y de 10-20% en peso de los gases condensables, dependiendo de la materia prima utilizada (Mohan y Pittman, 2006, citado desde Panwar, *et al.*, 2012). En un proceso de pirólisis rápida deben de considerarse cuatro aspectos importantes:

- se utilizan velocidades de transferencia muy elevada de calefacción y de calor, que por lo general requiere de una alimentación de biomasa finamente molida.
- se utiliza una temperatura de reacción de pirólisis controlada, a menudo de entre $700-775^{\circ}\text{K}$.
- se utilizan los tiempos de permanencia de vapor corto (típicamente <2 s), y
- los vapores de la pirólisis y aerosoles se enfrían rápidamente para dar bioaceite. (Panwar *et al.*, 2012).

Pirólisis flash: la pirólisis flash se conoce así por su alta velocidad del proceso. No obstante, en este proceso no sólo la cinética juega un rol importante sino que también son importantes los procesos de transferencia de calor y de masa, tales como los fenómenos de cambio de fase. En este proceso la biomasa se descompone para generar, principalmente vapores, aerosoles, y una determinada cantidad de coque. Después del enfriamiento y de la condensación, se forma un líquido de color marrón oscuro (bioaceite) con un valor calórico que es la mitad del valor correspondiente al del disel. A diferencia de los procesos tradicionales, la pirólisis flash es un proceso avanzado con parámetros cuidadosamente controlados para la obtención de altos rendimientos de líquido (Bridgwater, 2011, citado desde Panwar *et al.*, 2012).

Para llevar a cabo este proceso, se deben de observar detenidamente los siguientes pasos: a) someter las partículas de biomasa a una temperatura óptima para que reaccionen, b) minimizar su exposición a temperaturas intermedias bajas que estimulen la formación de coque. Un método para lograr estos objetivos es usar pequeñas partículas como, por ejemplo, las que están presentes en un proceso de lecho fluidizado (un lecho fluidizado es un lecho empaquetado con un sólido de grano fino). Otra posibilidad es transferir calor rápidamente y colocar la superficie de las partículas que estén en contacto con la fuente de calor, lo cual se aplica en un proceso de ablación (Bridgwater, 2008, citado desde Panwar *et al.*; 2012).

Este proceso se utiliza para producir petróleo crudo equivalente de biomasa con una alta eficiencia de rendimiento de hasta un 70% (Demirbas, 2000; Demirbas y Arin, 2002, citado desde Panwar *et al.*, 2012). La temperatura de funcionamiento de la pirólisis flash está en el intervalo de 777-1027 °C. El producto final de ésta, posee agua pirolítica, que es uno de los principales inconvenientes del bioaceite producido (Balat, *et al.*, 2009, citado desde Panwar *et*

al., 2012). Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido.

En general el proceso de pirólisis tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y finalmente la obtención y separación de los productos (coque, bio-aceite y gas). (Klug y Michael, 2012).

La pirólisis se remonta al menos a la antigua época de los egipcios, cuando el alquitrán para calafatear los barcos y ciertos agentes de embalsamamiento lo realizaron por pirólisis. (Mohan y Pittman, 2006, citado desde Panwar *et al.*; 2012). En todos los procesos de conversión termoquímica, la pirólisis desempeña un papel clave en la cinética de reacción y por lo tanto en el diseño de reactores y la determinación de la distribución del producto, composición y propiedades (Sensöz y Can, 2002, citado desde Panwar *et al.*, 2012).

La pirólisis se diferencia de la incineración porque el proceso de descomposición térmica de la materia orgánica se desarrolla en un ambiente con deficiencia o ausencia de aire, mientras que la incineración requiere del oxígeno del aire para provocar la combustión de los componentes.

Durante este proceso, la materia orgánica de poco valor se transforma en productos de alto contenido energético como el carbón, alquitrán, los gases de hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, propano, butano, pentano, amoníaco, oxígeno, monóxido y bióxido de carbono que pueden ser utilizados como combustibles, además de aceites ligeros (mezclas de benceno, tolueno, xileno y otros), sales y metales reducidas que se pueden usar como materia prima en otros procesos. La proporción de la mezcla resultante de la pirólisis de los residuos sólidos, depende de las condiciones del proceso como es la temperatura de

operación, la velocidad del calentamiento y la composición de los desechos de alimentación.

Existen diversos diseños de plantas pirolíticas (escala piloto) para el tratamiento de los desechos sólidos urbanos. El componente principal de todos es el reactor pirolítico que consta de una cámara calentada con gas, hermética y revestida con una chaqueta aislante. Esta cámara gira lentamente y tiene una pequeña inclinación en el sentido de alimentación hacia la descarga.

Los residuos son alimentados a través de un sello que abre intermitentemente y son sometidos a temperaturas de 650 a 982°C en una atmósfera deficiente o libre de oxígeno. (Pirólisis, SEDESOL, s.f.).

2.2.1.2.3 Gasificación

La gasificación como un término se refiere generalmente a la conversión termoquímica de la biomasa a forma gaseosa mediante el uso de un medio de gasificación aire, oxígeno, vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono o una combinación de éstos (Kumar, *et al.*, 2009, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Esencialmente, la gasificación es la oxidación parcial de la biomasa (Kumar, *et al.*, 2009, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Dependiendo del agente de gasificación, el método de funcionamiento y las condiciones del proceso, tres cualidades de gas producto puede ser producido. Los valores caloríficos (VC) del gas de tres productos de la gasificación de la biomasa son (Kumar, *et al.*, 2009, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013):

Bajo VC 4.6 MJ/Nm³ (aire y vapor de agua / aire)

Medio VC 12 a 18 MJ/Nm³ (oxígeno y vapor de agua)

VC alto 40 MJ/Nm³ (hidrógeno y la hidrogenación)

Los productos de gasificación se utilizan en varias aplicaciones. El gas de bajo valor calorífico puede ser utilizado directamente como un gas combustible en turbinas y motores de gas (Hamelinck y Faaij, 2002, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013) el gas de síntesis de oxígeno o de gasificación de vapor pueden ser utilizados para producir por ejemplo, metanol, hidrógeno y líquidos de Fischer-Tropsch (Turn *et al.*, 1998; Tijmensen, *et al.*, 2002; Swain, *et al.*, 2011, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Todo este proceso se efectuará directamente en un intervalo de temperatura elevada de 800-1300 °C (McKendry, 2002, citado desde Panwar *et al.*, 2012) con una serie de reacciones químicas bajo las cuales se llevará a cabo la conversión termo-química. Las temperaturas más altas se usan con ciertos tipos de reactores. El calor necesario para elevar la temperatura se puede suministrar ya sea directamente o indirectamente. (Kumar, *et al.*, 2011, citado desde Panwar *et al.*, 2012).

Hay varias tecnologías para producir gas de síntesis a partir de biomasa. Basado en el método de suministro de calor, que se pueden dividir en tecnología alotermal (indirectos) y auto térmico (directos) (Zhang, 2010, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Para el propósito de su uso como un agente reductor, los gases de síntesis deben ser libres de nitrógeno. El nitrógeno diluye el gas y, cuando se usa como un agente reductor, los volúmenes de gas aumentarán significativamente. La presencia de nitrógeno también aumentaría el tamaño del gasificador y otros equipos (Hamelinck y Faaij, 2002, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Los reactores que se utilizan normalmente para gasificación auto térmica son el de lecho fluidizado circulante (CFB) y el de lecho fluidizado burbujeante (BFB) (Zhang, 2010, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Se han utilizado gasificadores de lecho fluidizado para la gasificación del carbón mientras que el CFB se ha utilizado en la industria papelera para la gasificación de los residuos forestales.

Los gasificadores pueden funcionar a presiones elevadas (McKendry, 2002, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). Los Gasificadores auto térmicos necesitan oxígeno, lo que eleva los costos de inversión (Zhang, 2010, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

El proceso Alotermal de gasificación se lleva a cabo normalmente en un gasificador de lecho doble (Göransson, *et al.*, 2011 citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013) se han llevado a cabo una extensa revisión de los recientes avances en las tecnologías de gasificación indirectas con gasificadores de lecho fluidizado duales. El principio de funcionamiento básico de un gasificador alotermal de doble cama es una cama que se opera con vapor para gasificar la biomasa en gas de síntesis a temperaturas de 700-900 ° C. La otra cama es operada con aire para quemar el carbón y para producir calor para la gasificación. El calor de combustión se transporta de lecho a la cama de gasificación con el portador de calor sólido. El material del lecho y los restos de carbonilla son transportados de vuelta a la cama de combustión. Los costos de inversión son modestos en comparación con los diseños auto térmicos, y la tecnología es escalable hasta 200 MW (Zhang W., 2010, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Las tecnologías de gasificación de flujo lento arrastrado se utilizan ampliamente en la gasificación del carbón. Las capacidades de los gasificadores de flujo atrapado en la gasificación del carbón pueden ser de varios cientos de MW. La gasificación de flujo atrapado requiere un tamaño de partícula pequeño (<0,1-0,4 mm), ya que requiere ser triturado, lo que resulta en un alto consumo de electricidad (McKendry, 2002; van der Drift, *et al.*, 2004, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Los gasificadores de flujo confinado operan a altas temperaturas y la tasa de conversión de carbono es alta, con un tiempo de residencia bajo, lo que permite altas capacidades (Zhou, *et al.*, 2009, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

En la tabla 2.8 se presentan composiciones de gas de síntesis indicativos de diferentes sistemas de reactor de gasificación (Zhang, 2010, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Tabla 2.8 Composición de gas de síntesis de diferentes tecnologías de gasificación (Zhang, 2010, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Propiedades	Alotermal	Auto térmica	Flujo lento	Flujo lento/ Carbón
Contenido de H ₂ (%)	40	26	39	32
Contenido de CO (%)	25	20	38	55
Contenido CO ₂ (%)	21	35	20	8
Contenido CH ₄ (%)	10	13	0.1	0
Contenido C ₂ H ₄ (%)	2.5	3	0	0
Contenido N ₂ (%)	1.5	3	3	3
H ₂ / CO	1.6	1.3	1.0	0.6
PCI (MJ / m ³)	14	12	10	11

PCI= poder calorífico inferior (MJ / m³).

La biomasa como materia prima es más prometedora que el carbón para la gasificación debido a su bajo contenido de azufre y su carácter menos reactivo (Panwar, *et al.*, 2012). El producto gaseoso resultante llamado gas productor es una mezcla rica en energía de gases combustibles como H₂, CO, CH₄ y otras impurezas tales como CO₂, nitrógeno, azufre, compuestos alcalinos y alquitranes (Damartzis y Zabaniotou, 2011, citado desde Panwar *et al.*, 2012).

Un alto contenido de H_2 y CH_4 en el gas reductor caliente dará lugar a grandes pérdidas de energía; Sin embargo, un control adecuado del proceso hace que sea posible utilizar estos gases (Buchwalder, *et al.*, 2006, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). La reforma del gas de síntesis se puede hacer por varios medios. Por ejemplo, el reformado con vapor con un catalizador de níquel y el reformado autotérmico se pueden utilizar para convertir los hidrocarburos en CO y H_2 (Hamelinck y Faaij, 2002, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). La eliminación de CO_2 del gas de síntesis se puede hacer con varias tecnologías. Las tecnologías de eliminación de CO_2 se pueden clasificar en cuatro categorías (Gupta, *et al.*, 2003, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013): depuración solvente químico/ físicas, adsorción, criogénicos y tecnologías de membranas.

En la figura 2.7 se presenta un diagrama de flujo esquemático para la producción de la reducción de gas de síntesis. En el Pre-tratamiento se indica la molienda y el secado de la materia prima de biomasa. En la etapa de gasificación, la biomasa se convierte en gas de síntesis que se limpia y acondicionada para su uso.

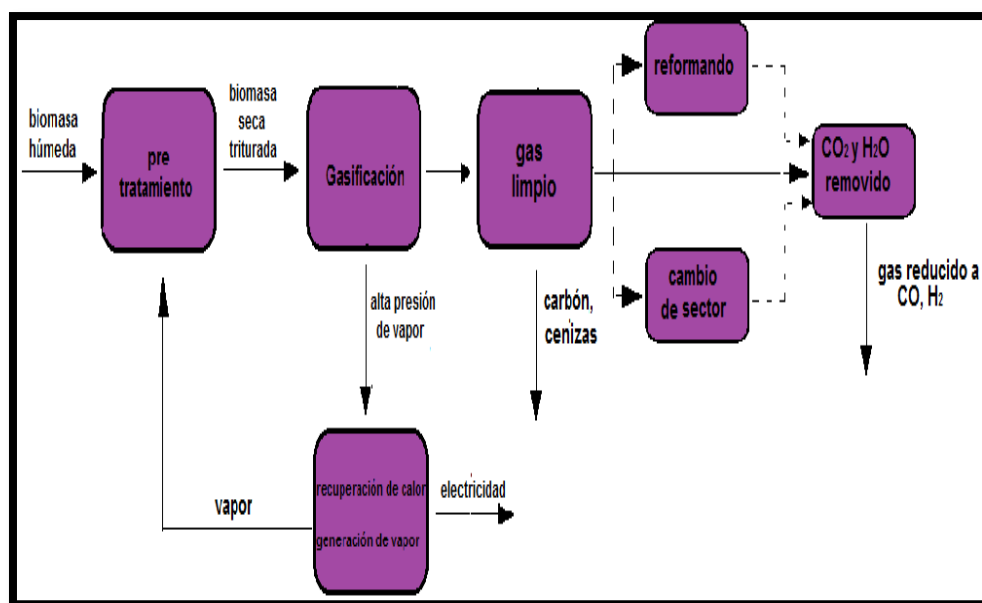


Figura 2.7. Proceso simplificado de la producción de gas de síntesis a partir de biomasa. (Van Der Meijden *et al.*, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

Aún no existen gasificadores de biomasa comerciales que podrían ser utilizados para producir las cantidades de gas de síntesis necesarias en el alto horno de fabricación de hierro (Larson, *et al.*, 2009, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013). El más grande gasificador de biomasa se ha construido en Finlandia por Metso, con una capacidad de combustible de 140 MW el cual utiliza la tecnología de circulación de lecho; la planta utiliza principalmente astillas forestales como materia prima. La planta funcionó a plena potencia en noviembre de 2012 (Voima, 2013, citado desde Suopajärvi *et al.*, 2013).

El gas reformado o producto último de un proceso de gasificación se puede utilizar para generar calor y electricidad, y se puede aplicar en equipos convencionales, como los motores de diesel.

La gasificación tiene ciertas ventajas con respecto a la biomasa original:

- el gas producido es más versátil, y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural
- puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad
- produce un combustible relativamente libre de impurezas. Sin embargo la operación de gasificación es más complicada.

2.2.1.2.4 Producción de carbón vegetal.

Este proceso es la forma más común de la conversión termoquímica de temperatura mediana. La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido se usa como

carbón vegetal, el cual tiene mayor densidad energética que la biomasa original, no produce humo y es ideal para uso doméstico. Usualmente, este carbón es producido de la madera, pero también se usan otras fuentes como cáscara de coco y algunos residuos agrícolas. La forma más antigua, y probablemente aún la más empleada para producirlo, son los hornos de tierra y los de mampostería. (Manual sobre energía renovable. Biomasa, 2002).

2.2.1.3 Pretratamientos bioquímicos

Hidrólisis ácida: los ácidos como el H_2SO_4 y HCl concentrados son poderosos agentes que hidrolizan la celulosa, pero son tóxicos, corrosivos y peligrosos por lo que requieren reactores que resistan su corrosión. Se emplean altas temperaturas y ácidos diluidos que hidrolizan la hemicelulosa en azúcares solubles en agua, en los residuos queda la celulosa y la lignina, ésta última se extrae con solventes orgánicos. El pretratamiento con ácidos mejora la hidrólisis de la celulosa, pero su costo es alto en comparación con otros pretratamientos y requiere una neutralización del pH para evitar la inhibición de la fermentación (Eggeman y Elander, 2005, citado desde Cuervo *et al.*, 2009).

Oxidación húmeda alcalina: un pretratamiento de oxidación consisten en la adición de un componente oxidante, como el peróxido de hidrogeno o el ácido per acético a la biomasa, la cual es suspendida en agua. El objetivo es remover la hemicelulosa y la lignina para incrementar la accesibilidad de la celulosa. Durante el pretratamiento oxidativo tienen lugar muchas reacciones como son sustitución electrófila, el desplazamiento de las cadenas laterales, la escisión de enlaces éter de arilo alquilo o la escisión oxidativa de núcleos aromáticos (Hon y Shiraishi, 2001, citado desde Sánchez, *et al.*, 2010).

Explosión de fibra de amoniaco: este pretratamiento mejora significativamente la tasa de sacarificación de diversos sustratos lignocelulósicos (Mes-Hartree *et al.*, 1988; Vlasenko *et al.*, 1997; Reshamwala *et al.*, 1995, citado desde Cuervo *et al.*, 2009) los cuales son tratados con amoniaco a alta temperatura y presión. Es eficiente para sustratos con poca lignina, logrando hasta el 90% de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa (Holtzapple *et al.* 1991, citado desde Cuervo *et al.*, 2009) y no se producen inhibidores ni se requiere que el material lignocelulósico sea triturado. Para reducir los costos y proteger el ambiente, el amoniaco se recicla después del pretratamiento (Dale *et al.*, 1984, citado desde Cuervo *et al.*, 2009).

Ozonólisis: el ozono degrada la lignina y la hemicelulosa de sustratos como la paja de trigo y de algodón, el bagazo de caña y el aserrín de pino y álamo (Ben-Ghedalia y Miron, 1981, citado desde Cuervo *et al.*, 2009). Las reacciones ocurren a presión y temperatura ambiente, se remueve la lignina hasta en un 8% y el rendimiento aumenta en un 57%, no produce residuos tóxicos pero se requiere una gran cantidad de ozono lo que eleva los costos (Vidal y Molinier, 1988, citado desde Cuervo *et al.*, 2009).

Explosión por vapor / hidrotermal: es uno de los pretratamientos más efectivos para las maderas duras y desechos agrícolas, pero menos eficiente para maderas suaves (Clark y Mackie, 1987, citado desde Cuervo *et al.*, 2009). La biomasa se trata con vapor saturado a una temperatura de 160-260 °C, durante cierto tiempo causando reacciones de auto hidrólisis, donde la hemicelulosa y lignina se convierten en oligómeros solubles. La adición de H₂SO₄ mejora la posterior hidrólisis enzimática y disminuye la producción de compuestos inhibitorios. Los factores que afectan el proceso son el tiempo del tratamiento, la temperatura, el tamaño de partícula y el contenido de humedad (Duff y Murray, 1996, citado desde Cuervo *et al.*, 2009). Las ventajas de este método son un requerimiento bajo de energía comparado con los métodos físicos convencionales que requieren 70%

más energía para alcanzar el mismo tamaño de reducción de las partículas (Holtzapple *et al.* 1989, citado desde Cuervo *et al.*, 2009). Las limitantes del proceso son la destrucción parcial del xilano y la separación incompleta de la lignina y los carbohidratos, así como la generación de compuestos inhibitorios para los microorganismos utilizados en procesos de fermentación (Mackie *et al.* 1985, citado desde Cuervo *et al.*, 2009).

Hidrólisis alcalina: es la adición de bases diluidas a la biomasa y su eficiencia depende del contenido de lignina de los materiales. El hidróxido de sodio diluido produce un hinchamiento, permitiendo un incremento en el área de superficie interna reduciendo el grado de polimerización y cristalinidad de la celulosa, causando la separación de las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos (Fan *et al.* 1987). En las maderas duras hay un incremento en la digestibilidad y un descenso del contenido de lignina, en maderas suaves con lignina hasta en un 26% (Sun y Cheng, 2002, citado desde Cuervo *et al.*, 2009).

2.2.1.4 Procesos bioquímicos de conversión de energía

Estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. Los más importantes son:

2.2.1.4.1 Esterificación

La esterificación es un proceso de producir un éster a partir de ácidos grasos (descomposición de la materia orgánica). Los ésteres son las sales alcohólicas,

tanto de los ácidos inorgánicos como de los ácidos orgánicos. Los ésteres líquidos se han empleado como sustitutos de esencias de algunas frutas debido a su olor agradable. (Alva, 2001).

2.2.1.4.2 Fermentación (producto alcohol)

Esta tecnología se ha utilizado durante siglos para la producción de licores y, más recientemente, para generar sustitutos de combustibles fósiles para transporte, los que se utilizan principalmente para motores de combustión particularmente en Brasil en donde existen millones de vehículos impulsados con alcohol obtenido de la caña de azúcar y en Estados Unidos donde existe una producción importante de bioetanol a partir de maíz.

Consiste en un proceso mediante el cual se obtienen combustibles líquidos como el etanol a partir de la biomasa. El primero se produce por medio de la fermentación de azúcares utilizando cualquier producto de origen vegetal que posea azúcares transformables, principalmente azúcar de caña, betabel, trigo, maíz, y papa, aunque existen otras fuentes, que se encuentran en etapa de investigación y desarrollo comercial como el material lignocelulósico y las macroalgas. La adición de microorganismos fermentativos es requerida para la producción del bioetanol. (Energía Biomasa, 2012).

En una fermentación anaerobia, la materia orgánica es metabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaerobios estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y por lo tanto, sólo una pequeña

cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva. La fermentación anaerobia se puede aplicar para la recuperación de biocombustibles como hidrógeno y butanol y productos químicos como nisina y ácido láctico. (Varnero, 2011).

2.2.1.4.3 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un método de conversión microbiana que se produce en un entorno acuoso, lo que significa que las fuentes de biomasa que contienen niveles de agua altos (aunque contengan materia seca inferior al 40%) se pueden procesar sin ningún tratamiento previo (Ward, *et al.* 2008, citado desde Appels, *et al.*, 2011). Este no es el caso para la mayoría de otras tecnologías de conversión. La combustión, por ejemplo, sólo ofrece un equilibrio de energía neta positiva si el contenido de agua de la biomasa o de residuos está por debajo de 60% e incluso entonces, la mayor parte de la energía almacenada en la biomasa se utiliza para la evaporación del agua contenida. También, la eficiencia energética de la pirólisis y la gasificación disminuye considerablemente con alto contenido de agua, y la presencia de agua en el bio-aceite producido es indeseable (Van de Velden, *et al.*, 2010, citado desde Appels, *et al.*, 2011). El uso de estas tecnologías por lo tanto requiere un consumo de energía etapa de pre-secado para los tipos húmedos de biomasa y residuos. (Appels *et al.*, 2011).

La digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaerobio) produce un gas combustible llamado biogás. En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja cierto tiempo; después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico. Los digestores han sido promovidos fuertemente en

China e India para usos domésticos en sustitución de la leña. La digestión anaerobia es factible no sólo en instalaciones industriales a gran escala, también puede aplicarse en una pequeña escala. Esta observación proporciona específicamente oportunidades para la digestión anaerobia en los países en desarrollo y las zonas rurales, donde el suministro de energía es limitada o incluso no existen en absoluto. Un ejemplo es el uso de la biomasa y los residuos simples digestores en zonas rurales de la India que operan sobre las malas hierbas y residuos agrícolas para proporcionar gas para cocinar en los hogares (Singh, 2010, citado desde Appels, *et al.*, 2011). También se pueden utilizar aguas negras y mieles como materia prima, lo cual sirve, además, para tratar agua (López y Nogués, 2010). A continuación se explica más a detalle este proceso ya que es el que se utilizó para la construcción del biodigestor.

2.3 Proceso de biodigestión anaerobio.

El proceso de biodigestión anaerobia es un proceso biológico natural en el que una comunidad entrelazada de bacterias cooperan para formar una descomposición estable, auto regulado, que convierte materia orgánica residual en una mezcla de gases principalmente metano y dióxido de carbono. Es decir, la biodigestión anaerobia es un proceso microbiano que incluye microorganismos metano bacteriáceo que degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno (López y López, 2009).

Es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno, en el que la materia orgánica se transforma por acción de microorganismos en biogás y bioabono (Yank *et al.*, s.f. citado desde Olaya y González, 2009) en él se implica la realización de una serie de reacciones bioquímicas donde participan microorganismos, de los cuales una parte son oxidados completamente por el

carbono formado anhídrido carbónico, mientras otra es reducida en alto para formar metano (Guevara 1996, citado desde Olaya y González, 2009). El proceso anaerobio ocurre en cuatro etapas (Vargas 1992; Guevara 1996; Hilbert 2003, citado desde Olaya y González, 2009), hidrólisis, Acidogénesis, metalogénesis, las cuales son descritas más adelante (Ramón *et al.*, 2006, citado desde Olaya y González, 2009).

2.3.1 Bacterias que intervienen en el proceso de biodigestión.

La digestión anaerobia involucra a un complejo número de microorganismos de distinto tipo los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos principales. La producción real de metano es la última parte del proceso y no ocurre si no han actuado los primeros dos grupos de microorganismos.

Las bacterias productoras del biogás que son las que conocemos como bacterias metanogénicas son estrictamente anaerobias y por lo tanto sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno, cada tipo de bacteria actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores.

Las especies de microorganismos involucrados en el proceso varían dependiendo de los materiales que serán degradados. Los alcoholes, ácidos grasos, y los enlaces aromáticos pueden ser degradados por la respiración anaerobia de los microorganismos.

Éstos utilizan, entre otros nutrientes, el nitrato, azufre, sulfato, carbonato, fumarato o Fe (III) como aceptores de electrones, por lo que pueden dominarse reductores de nitrato, reductores de sulfato, etc.

En la primera y segunda fase de la degradación, participan bacterias de al menos 128 órdenes de 58 especies y 18 géneros. Las especies que se presentan principalmente son *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Eubacterium* y *Bacteroides*.

En la tercera y cuarta fase de la degradación, se encuentran principalmente bacterias metanogénicas. En la actualidad se han identificado 81 especies, de 23 géneros, 10 familias y 4 órdenes.

En las cuatro fases de la degradación, las especies *Acetobacter* y *Eubacterium* tienen una participación similar en el proceso. (Varnero; 2011). (Tabla 2.9).

Tabla 2.9 Bacteria que participan en el proceso de fermentación durante las cuatro fases. (Manual de Biogás, Varnero; 2011). Fuente: Isam, et al. 2009

Taxonomía	Especies	Descripción	Metabolismo
Género: Acetobacterium	<i>A. woodii</i> <i>A. paludosum</i>	El género <i>Acetobacterium</i> comprenden un grupo de bacilos Gram negativos, móviles que realizan una oxidación incompleta de alcoholes, produciendo una acumulación de ácidos orgánicos como productos finales.	Reducen autotróficamente compuestos poliméricos, oligómeros, monómeros y CO ₂ , utilizando el hidrógeno como fuente de electrones. Estos microorganismos hacen posible la descomposición de los ácidos grasos y compuestos aromáticos.
Género: Eubacterium	<i>E. rectale</i> <i>E. siraeum</i> <i>E. plautii</i> <i>E. cylindroides</i> <i>E. brachy</i> <i>E. desmolans</i> <i>E. callandrei</i> <i>E. limosum</i>	El género <i>Eubacterium</i> consiste en un grupo de bacterias anaerobias obligadas Gram- positivas.	La mayoría de las <i>Eubacteria</i> sacarolíticas producen butirato como el principal producto de su metabolismo. Muchas especies son capaces de descomponer sustratos complejos a través de mecanismos especiales. Algunas especies se desarrollan autotróficamente, por lo tanto son capaces de cumplir funciones específicas en la descomposición anaerobia.

2.3.1.1 Bacterias de la hidrólisis

Los microorganismos de muchos géneros son los responsables de la hidrólisis. Entre estos destacan: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propioni-bacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*. (Varnero, 2011).

2.3.1.2 Bacterias de la acidogénesis

El género *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus* están presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son dominantes en la fase acidogénica.

El grupo *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides* representa el segundo grupo más grande microorganismos durante las dos primeras fases de la descomposición. Sin embargo, en la fase metanogénica representan menos del 5% del total de microorganismos. Éstos son los responsables de la degradación de compuestos monoméricos. (Varnero, 2011).

2.3.1.3 Bacterias de la acetogénesis

Estas bacterias sólo pueden sobrevivir en simbiosis con el género que consume hidrógeno. Estos microorganismos tienen un período de regeneración de 84 horas. Las bacterias acetogénicas reductoras de sulfato son capaces de degradar lactato y etanol, pero no son capaces de degradar ácidos grasos y compuestos aromáticos. (Varnero, 2011).

2.3.1.4 Bacterias de la metanogénesis

La última fase de la descomposición anaerobia se encuentra dominada por un grupo especial de microorganismos, las *Arqueas metanogénicas*. Éstas se caracterizan a través del co-factor F420 el cual actúa en presencia de hidrogenasas como transportador de H₂.

Las metanogénicas activas aparecen en la segunda fase de la fermentación, la fase de acidogénica. Sin embargo, obviamente el número de *Arques* metanogénicas aumenta en la fase metanogénica. Las principales especies están representadas por *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatti* y *Methanosarcina*.

Las especies *metanotróficas* son las que consumen metano se encuentran presentes en todas partes, pero no son deseables en una planta de producción de biogás.

Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual es necesario un mantenimiento casi constante de los parámetros básicos como la temperatura. (Jorge A. Hilbert, citado desde Olaya y González, 2009).

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos mono carbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas. (Varnero, 2011).

Dentro de los microorganismos metanogénicos se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogeno tróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de la descarboxilación del ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. (Varnero, 2011). El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

2.3.2 Descripción de las fases del proceso

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H_2 y CO_2 . (Varnero, 2011). A continuación se explican mas a detalle cada una de las etapas

2.3.2.1 Hidrólisis

En esta etapa, los substratos complejos (celulosa, proteína, lípidos) son hidrolizados en compuestos solubles (azúcares, aminoácidos y grasa) por la acción de enzimas extracelulares de las bacterias (Olaya y González, 2009). La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaerobia. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. La etapa hidrolítica puede ser el proceso

limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa

son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pre tratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores. (Varnero, 2011).

2.3.2.2 Acidogénesis

Esta etapa se conoce también como fermentativa. Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaerobias obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos. Es decir, es un periodo de producción intensiva de ácidos, que se inicia con los alimentos y compuestos de más fácil descomposición, como las grasas, donde hay una alta producción de dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), ácidos orgánicos y bicarbonatos; su pH se encuentra en la zona ácida, con valores entre 5.1 y 6.8 (Olaya y González, 2009).

2.3.2.3 Acetogénesis

Esta etapa ocurre cuando las bacterias acetogénicas oxidan el ácido propiónico y el butírico hasta acético e hidrógeno, que son los verdaderos substratos metanogénicos. Es decir, es un periodo donde se producen ataques a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, en pequeñas cantidades hay producción de dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno e hidrógeno, bicarbonatos y de compuestos amoniacales; se caracteriza por presentar mal olor debido a la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S), flotación de gran parte de sus sólidos, y un pH aún en la zona ácida con valores entre 6.6 y 6.8 (Olaya y González, 2009).

2.3.2.4 Metalogénesis

Se estima que anualmente la actividad microbiológica libera a la atmósfera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano. Como se sabe las bacterias metanogénicas son aquellas encargadas de la producción del metano dentro de esta última fase.

En esta etapa, los últimos compuestos son tomados dentro de las células bacteriales metanogénicas convirtiéndolos en metano y excretándolo fuera de la célula. Este es un período de digestión intensiva, de carácter de fermentación alcalina, en el cual hay una digestión de las materias resistentes, de las proteínas, de los aminoácidos, y de la celulosa; se caracteriza por la producción de sales de ácidos orgánicos y volúmenes de gas, en una mezcla donde hay un alto porcentaje de metano, y el resto corresponde a dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (Guevara, 1996, citado desde Olaya y González, 2009). Como características del material digerido, están el olor a alquitrán, hay pequeñas

cantidades de sólidos flotantes, y el pH se ubica en la zona alcalina, con valores entre 6.9 y 7.4 (Guevara, 1996, citado desde Olaya y González, 2009).

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra a ser la metanogénesis, y para aumentar la velocidad la estrategia consiste en adoptar diseños que permitan una elevada concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor. Con esto se pueden conseguir sistemas con tiempo de proceso del orden de días. Para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas. Usualmente, esta limitación hace que los tiempos de proceso sean del orden de semanas, de dos a tres. Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pre tratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas). (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE); 2007).

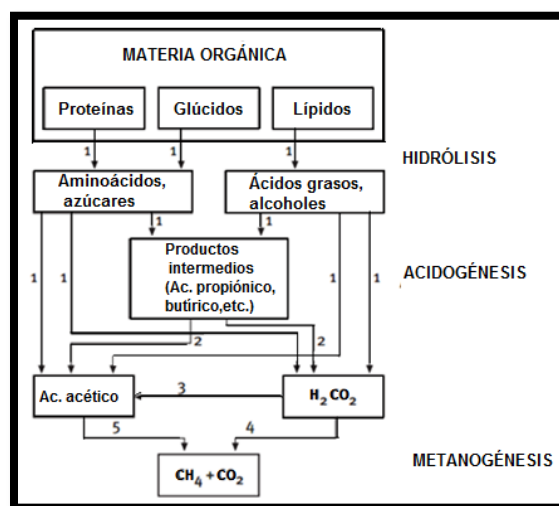


Figura 2.8. Fases del proceso anaeróbico y poblaciones de microorganismos: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas. 2) Bacterias acetogénicas. 3) Bacterias homocetogénicas. 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas, 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007).

2.4. El Biogás

2.4.1 Componentes del biogás

El biogás, es un gas cuya composición varía con el tipo de materia prima y condiciones de funcionamiento del digestor. En general, el biogás consiste en 50%-75% de CH₄ y 25-50% de CO₂ junto con otros componentes traza como el vapor de agua (H₂O), sulfuro de hidrógeno (H₂S), y amoníaco (NH₃). Las composiciones típicas de biogás y las propiedades de los componentes se resumen en la Tabla 2.10. (Surendra *et al.*, 2014).

Tabla 2.10. Componentes químicos del biogás (Surendra *et al.*, 2014)

Componentes	Concentración	Propiedades
CH ₄	50–75% (v/v)	Portador de energía
CO ₂	25–50% (v/v)	Disminuir el valor calor
		Corrosivo especialmente en presencia de humedad
H ₂ S	0–5000 ppm(v/v)	Corrosivo
		La emisión de dióxido de azufre durante la combustión.
NH ₃	0–500 ppm(v/v)	NOx – Emisión durante la combustión
N ₂	0–5% (v/v)	Disminuye el valor del calentamiento.
Vapor de agua	1–5% (v/v)	Facilita la corrosión en presencia de CO ₂ y dióxido de azufre.(SO ₂)

2.4.2 Usos Del Biogás

El biogás es portador de energía renovable con un potencial para aplicaciones de uso final diversos tales como calefacción, producción combinada de calor y electricidad (CHP), como combustible (después de ser reformado a biometano) o actualizado a la calidad del gas natural para diversas aplicaciones. En los países en desarrollo se produce principalmente con digestores a escala doméstica, sin embargo, el uso final del biogás se limita principalmente a la cocina y la iluminación. Esto se debe a que el digestor más común en los países en desarrollo es de tamaño de 2-10m³, y el volumen de biogás producido a partir de tales digestores no tiene capacidad de cogeneración o la purificación en biometano para otros fines de uso final. Cabe señalar que existe biogás producido a partir de plantas institucionales a gran escala en algunos países en desarrollo, sin embargo, se utiliza para la generación de electricidad a través de pilas de combustible o motores de cogeneración, similar a las tecnologías que se encuentran en los países desarrollados. (Sunrendra, *et al.*, 2014).

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier tipo de equipo comercial para uso de gas natural, la siguiente figura resume las posibles aplicaciones:

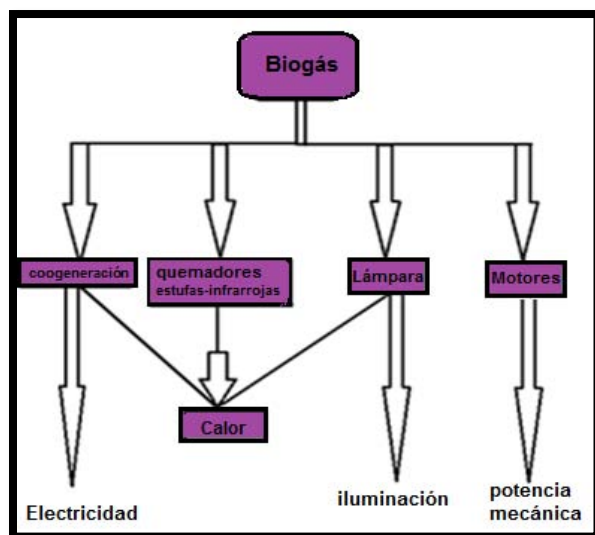


Figura 2.9. Usos del biogás. (Varnero, 2011)

Un metro cúbico de biogás totalmente combustionado es suficiente para:

- Generar 1.25 kW/h de electricidad
- Generar 6 horas de luz equivalente a un bombillo de 60 watts
- Poner a funcionar un refrigerador de 1m³ de capacidad durante 1 hora
- Hacer funcionar una incubadora de 1m³ de capacidad durante 30 minutos
- Hacer funcionar un motor de 1HP durante 2 horas

Lo mejor de todo es que incluso la lechada de biogás generada durante la respiración anaerobia, es decir el residuo que no logró convertirse en gas también llamado “digestato”, puede ser aún utilizado como fertilizante. Debido a que éste sigue siendo rico en nutrientes, y cuando se aplica a la tierra, mejora las propiedades físico químico y biológico del suelo, así como aumenta la productividad de los cultivos. (Surendra, *et al.*, 2014). En general, el digestato contiene N₂ (1.8%), P₂O₅ (1.0%), K₂O (0.9%), Mn (188 ppm), Fe (3550 ppm), Zn (144 ppm) y Cu (28 ppm). Un resumen del contenido de nutrientes del abono orgánico se incluye en la siguiente tabla. Debido a que los excrementos humanos contienen cantidades más altas de nutrientes de las plantas que el estiércol de vaca, la incorporación de excrementos humanos como materia prima puede mejorar las cualidades de nutrientes generales de la suspensión. (Surendra, *et al.*, 2014). Sin embargo para que este material sea utilizado como fertilizante es necesario que sea tratado adecuadamente, para evitar riesgos en la salud.

Tabla 2.11 Nutrientes y componentes importantes del abono orgánico (Surendra, *et al.*, 2014).

Abono orgánico	Materia orgánica (%)	C:N proporción	N ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Estiércol de granja	25-55	15–20	0.40-0.80	0.60-0.82	0.50-0.65

Tabla 2.11 Nutrientes y componentes importantes del abono orgánico (Surendra, et al., 2014).(Cont.)

Abono orgánico	Materia orgánica (%)	C:N proporción	N ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Lechada de biogás	60-73	17-23	1.50-2.25	0.90-1.20	0.80-1.20
Humus de lombriz	9.80-13.40	-	0.51-1.61	0.19-1.02	0.15-0.73

2.4.3 Impacto del uso del biogás

El uso del biogás como sustituto en los hogares en lugar de la combustión directa de la biomasa, y/o de combustibles fósiles como el carbón, para cubrir las necesidades de la cocina, traerá múltiples beneficios ya que a diferencia de la leña, los residuos agrícolas y el estiércol seco de ganado con los cuales se produce biogás proporcionan un ambiente limpio, libre de humo. (Surendra, *et al.*, 2014). Entre los beneficios se pueden mencionar pros en cuestiones de salud ya que se ha registrado que en los hogares que aún utilizan la leña o el carbón para sus cocinas regularmente lo hacen sin contar con una ventilación adecuada lo que acarrea consigo enfermedades pulmonares como enfisema, cáncer, entre otras. A si mismo los impactos en el ambiente son bastante favorables, y no solo enfocados al simple hecho de disminuir la cantidad de gases de efecto invernadero que se arrojan a la atmósfera día con día sino a la posible reducción de la tala y deforestación de los bosques de todo el mundo. (Surendra, *et al.*, 2014).

2.4.2.1 Impacto económico

La tecnología del biogás presenta características propias que hacen más complejo su análisis pues no sólo interviene en este caso el aspecto energético sino que también existe un importante impacto de difícil evaluación en sanidad, fertilización, mejoramiento de suelos, alimentación de animales y mejoramiento de las condiciones de vida. Esto se debe fundamentalmente a que además de la producción de gas combustible el sustrato utilizado sufre una transformación a través del proceso fermentativo anaeróbico.

En escasas ocasiones la cantidad de CH_4 generado es aprovechado eficientemente la economía de generación con el biogás de rellenos sanitarios depende fuertemente de las inversiones que para ello deban hacerse. Costo de generación: 3 a 6 centavos de dólar por kWh, si el relleno no existe, la economía del proyecto debe analizarse tanto desde el punto de vista eléctrico como desde el punto de vista ambiental.

Si no existen condiciones para aprovechar el biogás en ninguna forma, debe considerarse la opción de captarlo y quemarlo en una instalación adecuada (Varnero, 2011).

CAPITULO 3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR.

Para la producción de biogás se utilizan los llamados biodigestores o también conocidos como plantas (productores o de producción) de biogás, (Olaya y González, 2009) un biodigestor es un tipo de biorreactor en condiciones anaerobias diseñado para propiciar un ambiente adecuado a las bacterias que degradan la materia orgánica convirtiéndolo finalmente en biogás y bioabono, dejando efluentes utilizados como fertilizantes agrícolas. (Salazar, *et al*, 2012)

3.1 Tipos de biodigestores

Los biodigestores o plantas de biogás sencillo se clasifican en tres tipos principales, se describirán a continuación (Hilbert 2003; Ramón *et al.* 2006):

3.1.1 La planta flotante con cúpula o campana flotante

La planta de campana flotante, mostrada en la figura 3.1 se compone de un digester construido en mampostería o estructura de concreto y un depósito de gas móvil en forma de campana, la cual puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás. La campana debe tener una guía que permita el movimiento vertical, cuya altura dependerá del volumen almacenado (Vargas 1992; citado por: Olaya y González, 2009) Es conocido también como biodigestor Indio y puede utilizarse cuando se necesita un abastecimiento continuo de biogás y fertilizante, caracterizándose por funcionar como depósito del gas producido, es decir es el único tipo de biodigestores que tienen un depósito de biogás inferior (Olaya; 2006; Citado por: Olaya y González, 2009)

Este digester funciona en forma continua realizándose por lo general una carga diaria o cada dos o tres días. El vaciado completo sólo se realiza en el caso de requerir alguna recuperación o limpieza. El gas gracias al gasómetro flotante se almacena a presión constante y volumen variable. Este digester demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es generalmente lo más caro del equipo. Su funcionamiento es muy sencillo y no presenta serios inconvenientes en el área rural. (Hilbert, 2010)

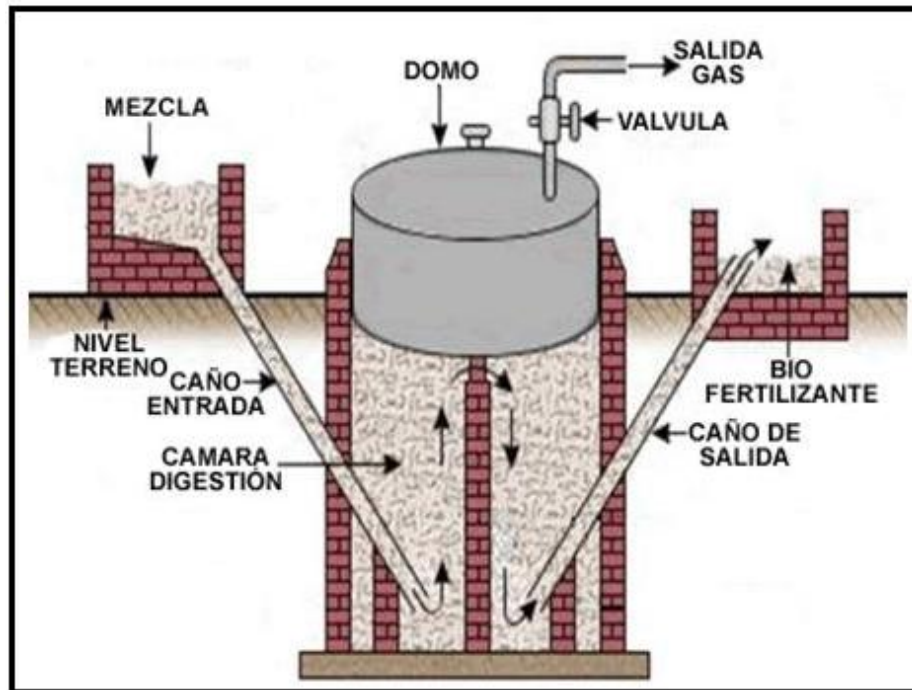


Figura 3.1 Esquema de una planta de campana flotante (tipo hindú) (Robles-Gil 2001; Olaya 2006).

3.1.2 La planta con cúpula o campana fija.

Se muestra en la figura 3.2 (Robles-gil 2001, Olaya 2006; citado por: Olaya y González, 2009) y se compone de un digester construido en mampostería y un domo fijo e inmóvil cerrado donde se almacena el biogás. Durante la producción de biogás, la masa de fermentación es desplazada hacia el tanque de compensación y cuando se extrae el gas, la masa líquida vuelve hacia el biodigestor. A través de constantes oscilaciones de la masa de fermentación en la parte superior de la cúpula se evita la formación de una capa flotante (Vargas, 1992; citado por: Olaya y González, 2009) Es conocido también como biodigestor Chino, y debido a que el gas debe ser liberado continuamente para reducir la presión interna, se utilizan en instalaciones donde el consumo sea continuo o para

almacenar el biogás en un depósito aparte (Olaya, 2006; citado por: Olaya y González, 2009)

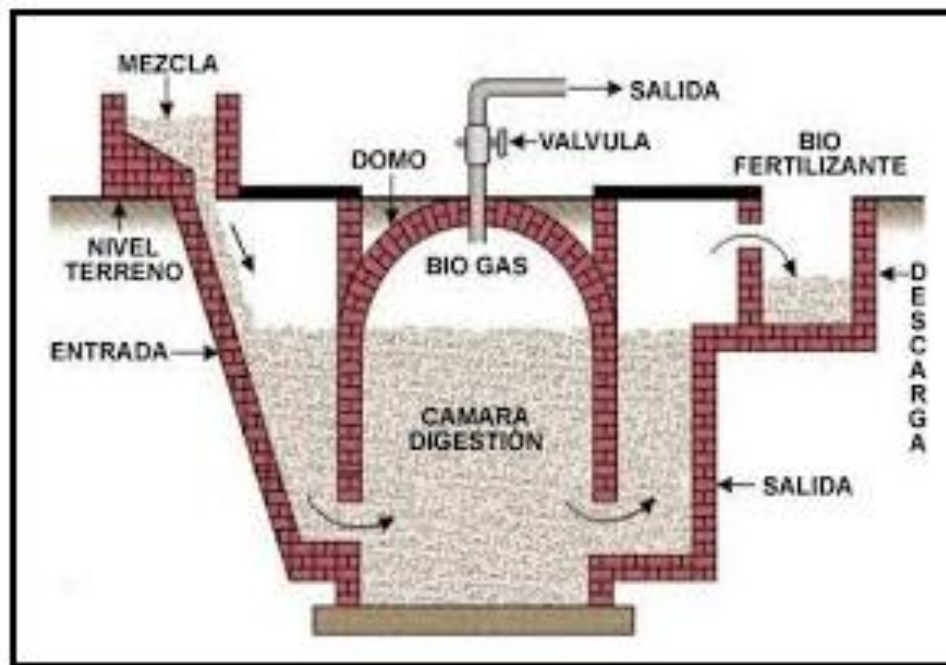


Figura 3.2 Esquema de una planta de cúpula fija (Robles-Gil 2001; Olaya 2006).

3.1.3 La planta balón o biodigestor tubular.

La planta de balón se compone de un tubular en material plástico (polietileno, PVC, plastilona, entre otros, y una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la plata (Botero y Preston 1986, Pedraza *et al.* 2002; citados por: Olaya y González, 2009) La figura 3.3 (Soria *et al.* 2001; Aguilar y Botero 2006; Olaya 2006; citados por: Olaya y González, 2009) muestra un esquema de esta tipología. La parte inferior de la planta, en un 75% del volumen constituye la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante, se almacena el biogás.

Este tipo de plantas se recomienda en donde predominan las temperaturas altas y constantes (Vargas, 1992, Pedraza *et al*, 2002; citado por: Olaya y González, 2009).

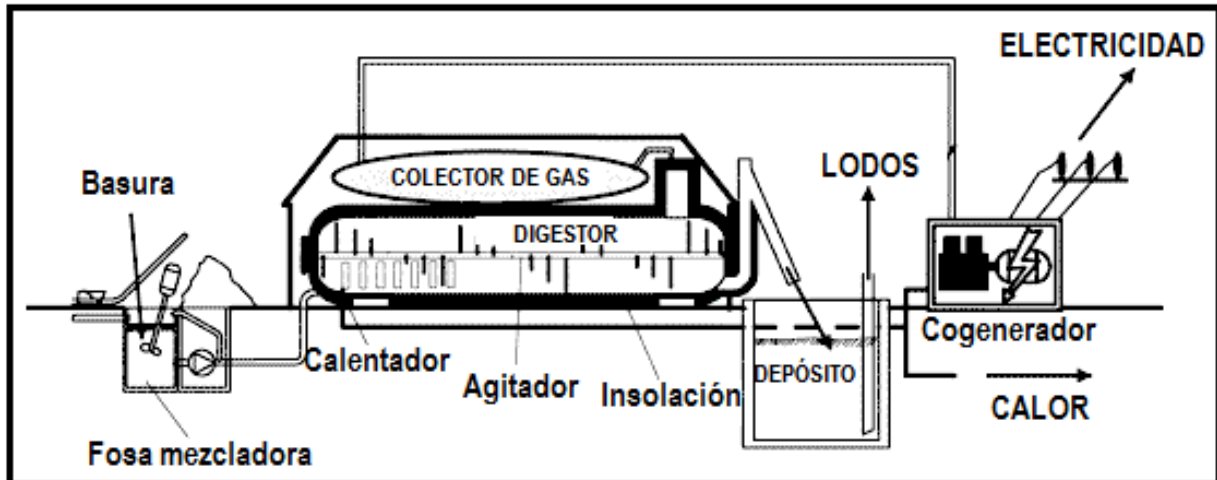


Figura 3.3. Esquema de una planta de balón plástico (Soria *et al*. 2001; Aguilar y Botero 2006; Olaya 2006).

3.1.4 Biodigestor de desplazamiento horizontal

Este tipo de biodigestor se caracteriza porque la carga se introduce en un extremo y el efluente se retira en otro extremo y es una construcción horizontal de desplazamiento, cuyo cuerpo se encuentra bajo el suelo con la finalidad de proporcionarle un buen aislamiento térmico. Tiene un almacenamiento primario de gas dentro del biodigestor (López y López, 2009).

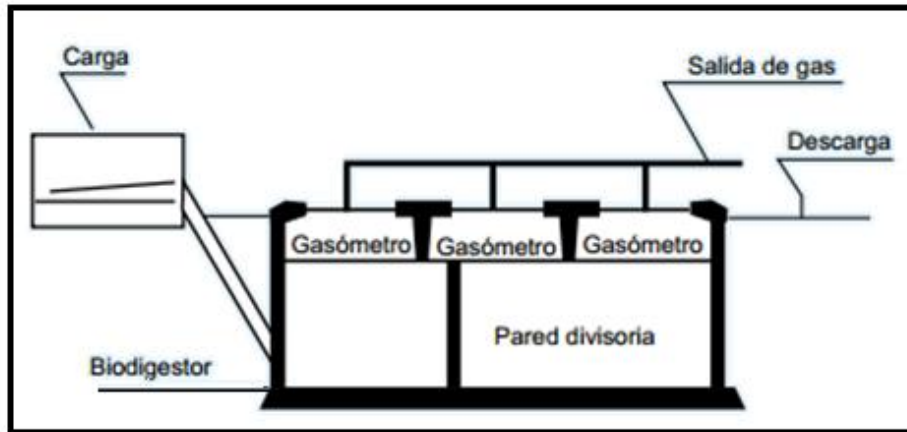


Figura 3.4. Biodigestor de desplazamiento horizontal (OLADE, 2011)

3.1.5 Biodigestores de mezcla completa.

Estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días si el sistema que se utiliza es con recirculación) (López y López, 2009). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato en cuestión. Para garantizar la mezcla en el interior del reactor se emplean diversos sistemas tales como: sistemas de paletas internas, biodigestores con movimiento circular a través de un eje central, o bien por medio del retorno del propio biogás a presión. El tiempo de mezclado varía en dependencia de la complejidad del sustrato empleado, regulándose en cada caso a fin de controlar la velocidad global del proceso.

La principal desventaja de estos reactores la constituye la complejidad del sistema de mezclado, sobre todo en su construcción y mantenimiento. (López y López, 2009).

3.1.6. Reactor con retención de biomasa, sin recirculación

Si se consigue retener bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de reactor de mezcla completa, (RMC) es posible reducir el tiempo de retención por debajo del necesario para un RMC tomándolo como referencia. Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos:

- a) inmovilización sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidizados);

- b) agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad

Aunque los reactores de flujo pistón no estarían encuadrados en este apartado, el hecho de que la tasa de crecimiento de microorganismos sea más elevada, hace que la concentración de sustrato también sea más elevada, haciendo que la concentración media en el reactor sea superior a la de salida, con lo cual el tiempo de retención será inferior. Este tipo de reactor ha sido aplicado a diferentes clases de residuos orgánicos, como fracción orgánica de residuos municipales (configuración vertical y flujo ascendente) o residuos de porcino y bovino. Una de las dificultades es la debida a la falta de homogenización en la sección transversal en la dirección del flujo, en las configuraciones horizontales, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal (reintroducción de biogás a presión en la base del digestor si el reactor es horizontal, por ejemplo) (Biodisol, 2014)

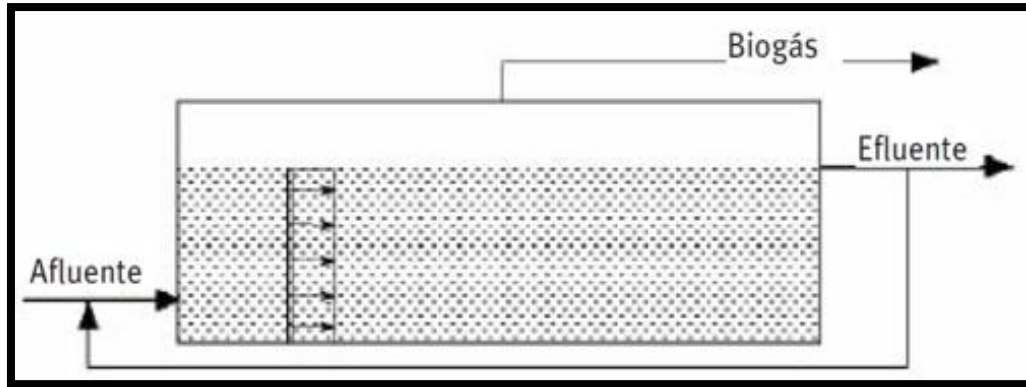


Figura 3.5 Digestor de flujo pistón (Biodisol, 2014)

Los siguientes son reactores con retención de biomasa que utilizan diferentes sistemas para conseguir dicho objetivo.

El filtro anaerobio. En este sistema las bacterias anaerobias están adheridas a la superficie de un soporte inerte formando biopelículas, en una 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 propiamente dicho, con flujo ascendente, Figura 3.6), y en este caso las bacterias se encuentran en su mayoría atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente, y en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas, recibiendo el nombre de lecho fijo con flujo descendente. En caso de utilizar un soporte orientado verticalmente con flujo ascendente y un sustrato lentamente degradable, con elevado tiempo de retención, la retención por sedimentación de los fragmentos de biopelícula desprendidos adquiere un efecto de importancia en la actividad del reactor. (Biodisol, 2014)

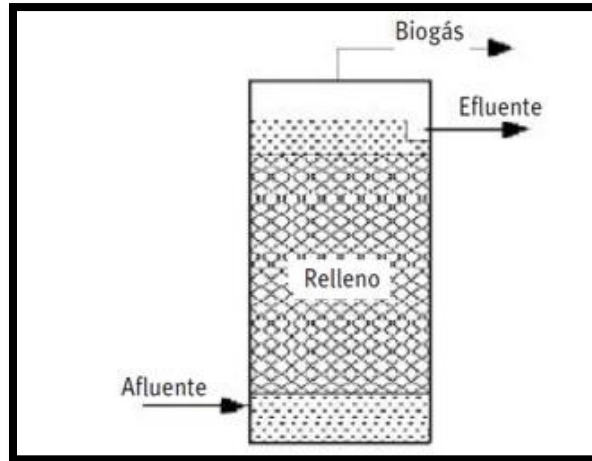


Figura 3.6 Filtro anaerobio (Biodisol, 2014)

El lecho fluidizado. En este sistema las bacterias se encuentran fija, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación (ver figura 3.7) (Biodisol, 2014)

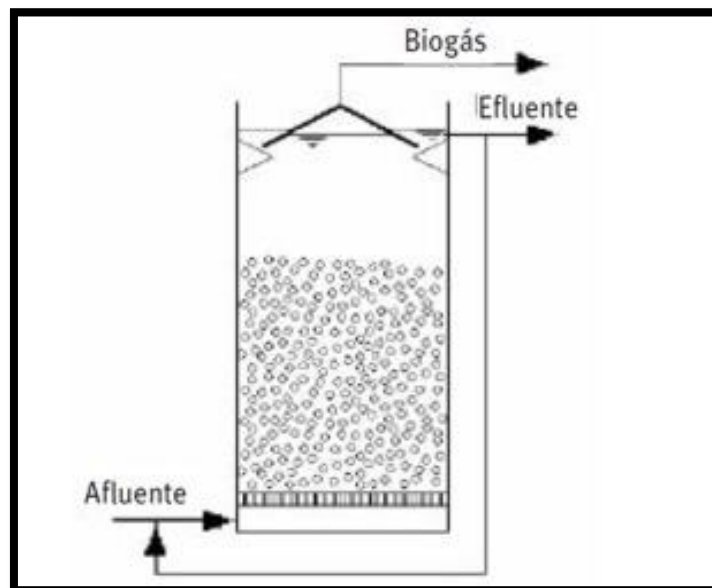


Figura 3.7 Lecho fluidizado (Biodisol, 2014)

El reactor de lecho de lodos. En este sistema se 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 sólido (biomasa)/líquido/gas. El diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), (ver figura 3.8) (Biodisol, 2014). Es el diseño más simple de entre los sistemas con 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 del agua a tratar y mantener una operación adecuada.

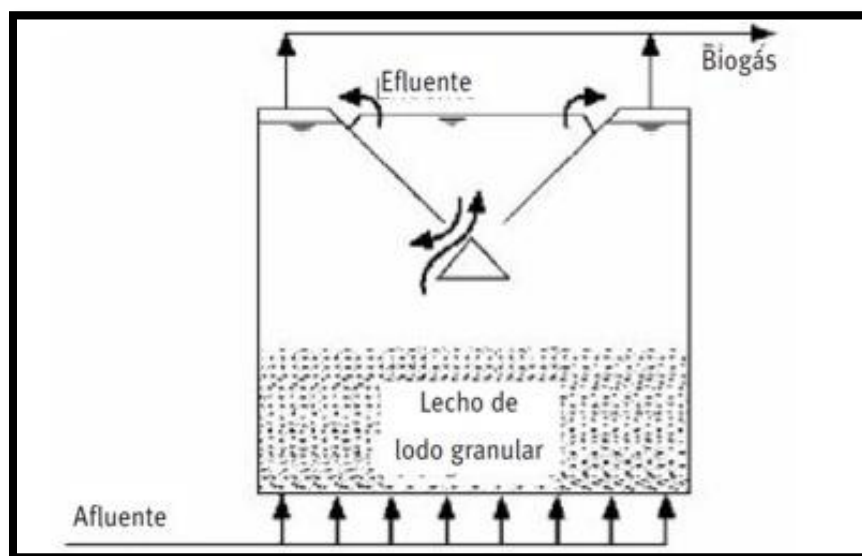


Figura 3.8 Reactor de lecho de lodos (Biodisol, 2014)

3.1.7. Biodigestores de dos etapas.

La concepción de estos sistemas está basada en el hecho de que varios grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica compleja requieren de diferentes condiciones de pH y tiempo de

retención para su crecimiento óptimo. En estos sistemas, el en primer reactor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en el segundo se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado.

Entre las desventajas de este tipo de sistemas son los largos tiempos de retención que se tienen que dar en el primer reactor donde ocurre la hidrólisis y acidogénesis y la baja eficiencia de conversión que se presenta. En cuanto a las ventajas de este tipo de sistema se pueden mencionar:

- El primer reactor será como un amortiguador si se llegase a presentar una carga extraordinaria en el sistema, dándole a la misma estabilidad. También será el encargado de eliminar todo el oxígeno disuelto (OD) del afluente haciendo que la eficiencia del segundo reactor sea mejor.
- Se obtiene un biogás de mejor calidad, es decir con mayor contenido de metano.
- Es un sistema mucho más amable con las variaciones de pH y temperatura lo que hace más sencillo el seguimiento y control del proceso. (López y López, 2009).

3.2 Consideraciones para la construcción del biodigestor

3.2.1 Parámetros ambientales.

En el proceso de tratamiento anaerobio de la materia orgánica, se requiere de las siguientes condiciones (Yank *et al.*, sf, Vargas 1992, Guevara 1996, Ramón *et al.* 2006; citado por: Olaya y González, 2009)

Los parámetros *ambientales* que hay que controlar hacen referencia a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo del proceso, como:

- Valor de acidez (pH): Este parámetro determina la inhibición o toxicidad de las bacterias metanogénicas, ocurriendo esta patología cuando es inferior a 6.0. Un adecuado funcionamiento se presentará con un pH en el biodigestor entre 6.5 y 7.5 (Vargas 2006). Sin embargo dicho valor puede variar dependiendo de la etapa en la que se encuentre la digestión anaerobia, algunos estudios experimentales han demostrado que el rango de pH en la metanogénesis varía de 6.5- 8.2, mientras que en la hidrólisis y la acidogénesis se encuentra entre 5.5 y 6.5 respectivamente, (Kim *et al.*, 2003; citado por: Khalid, *et al*, 2011) con esto se sugiere que la producción de hidrógeno estará en un máximo si el pH inicial de un ecosistema se mantiene a 9 (Khalid, *et al*, 2011)
- Humedad: alto contenido de humedad. Por lo general facilita la digestión anaerobia. Sin embargo, es difícil mantener la misma disponibilidad de agua durante todo el ciclo de digestión (Hernández - Berriel *et al.*, 2008; citado por: Khalid, *et al*, 2011). Sin embargo, el alto contenido de agua puede afectar el desempeño de los procesos mediante la disolución de la materia orgánica fácilmente degradable. Se ha informado que las tasas de producción de metano más altas se producen en el 60-80% de Humedad (Bouallagui *et al*, 2003, Hernández - Berriel *et al.*,2008; citados por: Khalid, *et al*, 2011). Por ejemplo como mencionan Khalid. *et al.* 2011 los

biorreactores cuyo régimen de humedad es del 70 % producen un lixiviado más fuerte y, en consecuencia una mayor tasa de producción de metano. Al final de su experimento, 83 mL de metano por gramo de materia seca se producen en un ambiente con humedad del 70 %, mientras que 71 mL de metano por gramo de materia seca se han producido con la humedad al 80%.

- Alcalinidad, para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación. Es recomendable una alcalinidad superior a 1.5g/L
- Nutrientes con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos
- Tóxicos e inhibidores, cuya concentración ha de ser la mínima posible (IDAE, 2007)

3.2.2 Parámetros operacionales.

Los parámetros *operacionales* hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores:

- Temperatura: Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4° a 5° C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70°C. Se realiza generalmente una diferenciación en tres rangos de

temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas (Hilbert, 2010)

Tabla 3.1 Temperatura del sustrato dependiendo del ambiente predominante (Hilbert, 2010)

Ambiente	Rango de temperatura °C
Psicrofílico	< 20
Mesofílico	20 a 40
Termofílico	> 40

Un adecuado funcionamiento del biodigestor para cada ambiente, recomienda los siguientes rangos de temperatura: 0°C–20°C, para el ambiente psicrofílico; 20°C–45°C, para el ambiente mesofílico; y 45°C – 97°C, para el ambiente termofílico (Alcayaga et al. 1999; citado por; Olaya y González, 2009) Las bacterias que crecen en cada uno de estos ambientes son organismos diferentes (Vargas 2006; citado por; Olaya y González, 2009) Como se sabe la producción de gas se verá favorecida conforme aumenta la temperatura. Torres & Follari s.f., y Guevara 1996; citados por; Olaya y González, 2009 sugieren controlar la temperatura, para aumentar la eficiencia, usando serpentines de agua caliente dentro del digestor, con el objetivo de aumentar la temperatura del efluente.

Los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislamiento y control los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas

temperaturas (Textos científicos, 2014). Lo que impacta principalmente en el hecho de si el digester requerirá de equipamientos especiales o no lo cual se verá reflejado en el costo de la construcción del mismo.

- **Pre tratamiento del la biomasa:** Antes de introducir los residuos orgánicos dentro del reactor hay que realizar una serie de operaciones de acondicionamiento. Dependiendo del tipo de reactor, el grado de pre tratamiento será diferente. La finalidad de estas operaciones es introducir el residuos lo más homogéneo posible, con las condiciones fisicoquímicas adecuadas al proceso al que va a ser sometido, y sin elementos que puedan dañar el digester. La forma de acondicionar los residuos de entrada puede ser por pre tratamientos, reducción del tamaño de partícula, espesamiento, calentamiento, control de pH, eliminación de metales y eliminación de gérmenes patógenos.
- **Agitación:** La agitación de los reactores anaerobios tiene diversos objetivos que se resumen en los siguientes puntos: poner en contacto el substrato con la población bacteriana, y proporcionar una densidad uniforme de la misma; prevenir la formación de capa superficial y de espumas, así como la sedimentación en el reactor, prevenir la formación de espacios muertos que reducirán el volumen efectivo del reactor, y la formación de caminos preferenciales en función de la hidráulica del sistema; eliminar la estratificación térmica manteniendo una temperatura uniforme en el reactor. (López y López, 2009). En función de la tipología del reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de substrato a cada población o agregados de bacterias, así como homogeneizar para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores (IDAE, 2007)

- Tiempo de retención: Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica, siendo éste determinado por lo que conocemos como tiempo de retención del cual podemos distinguir dos tipos:
 - TRH Tiempo de retención hidráulico
 - TRS Tiempo de retención de sólidos (López y López, 2009)

De manera más general, el tiempo de retención es definido como el período de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación. El tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura ambiente y en condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de 30°C, el tiempo de retención (Tr) debería ser de 20 días; sin embargo, algunos autores han sugerido para cada ambiente los respectivos tiempos de retención, que comúnmente se presentan en biodigestores, como se muestra en la tabla siguiente [Olaya; 2006], debido a la variación de la temperatura, la cual es difícil de controlar. Esta variación de temperatura afecta el tiempo de retención, el cual varía de acuerdo con el factor de corrección que puede ser determinado con la tabla 3.2 (Vargas 1992).

Tabla 3.2 Tiempo de retención (Olaya,2006)

Ambiente	Tiempo de retención (días)
Psicrofílico	> 40

Tabla 3.2 Tiempo de retención (Olaya,2006) (Cont.)

Ambiente	Tiempo de retención (días)
Mesofílico	10 a 40
Termofílico	< 10

- Velocidad de carga orgánica (OLR en inglés): Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos indican baja concentración del efluente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la OLR implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida figura 3.6 debiendo encontrar un valor óptimo técnico /económico para cada instalación y residuo a tratar (IDEA, 2007).

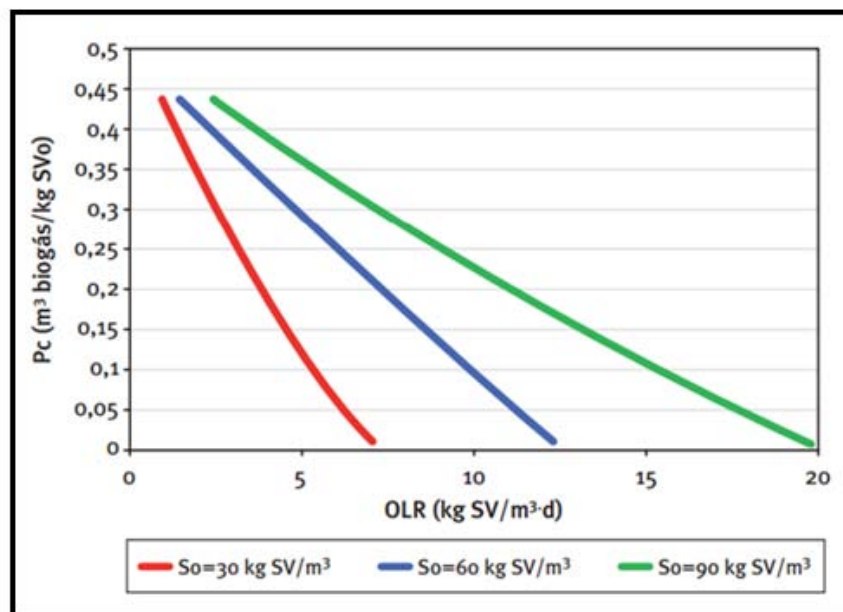


Figura 3.9 Producción de gas por unidad de carga en función de la velocidad de carga orgánica. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007).

3.2.3 Otros factores

Otro factor importante que influyen en la producción del biogás es la proporción entre carbono y nitrógeno, entre mayor sea dicha relación mayor será también la producción de biogás por unidad de residuo sólido orgánico, se recomienda que existan entre 20 y 30 partes de carbono por una de nitrógeno. Si la relación es muy baja, el nitrógeno será liberado y acumulado en forma de amoníaco, mismo que incrementará el pH de la carga en el digestor y cuando el pH sea mayor a 8.5 la carga se volverá tóxica para las bacterias metanogénicas, lo que significa que se detiene la producción de metano. (López y López, 2009).

La siguiente tabla muestra los residuos orgánicos con alta y baja relación Carbono/Nitrógeno (López y López, 2009).

Tabla 3.2 Residuos orgánicos con alta y baja relación carbono/nitrógeno (López y López, 2009)

Residuos Orgánicos Relación Carbono/Nitrógeno	
Alta	Baja
Cáscara de papa Cáscara de plátano Hojas de árboles Restos de caña de azúcar Papel Paja Ramas Residuos de algodón Fibras de coco Cáscaras de aguacate	Plantas frescas Vísceras de pescado Sangre deshidratada Vísceras de pollo Residuos de leche o productos lácteos Residuos de cerveza Vísceras de res Algas marinas

La presión es otro factor que aletarga el proceso de producción del metano, a pesar de que no lo inhibe completamente, debido a que presiones por encima de 0.27 Mpa reducen la velocidad de las reacciones que se llevan a cabo dentro del digester hasta en un 50%(López y López, 2009).

La razón principal por la que se creó un biodigester es para de alguna manera disminuir uno de los grandes problemas que presenta la sociedad en general; es decir a la gran cantidad de desechos sólidos orgánicos que se producen a diario y que no son aprovechados, llevando a cabo una biogásificación no sólo se usan los desechos que en realidad no tienen ningún valor económico sino que además se genera un biocombustible que puede utilizarse posteriormente.

3.3 Diseño y construcción de un biodigester

El biodigester diseñado puede clasificarse como un biodigester vertical de campana fija con retención de biomasa sin recirculación. Para el diseño y construcción del biodigester se tomaron en cuenta diversos factores técnicos entre los que se pueden mencionar:

Características del lugar: El lugar en donde estará operando el biodigester es la Facultad de Estudios Superiores Aragón ubicada en el Estado de México, en la zona oriente del municipio de Netzahualcóyotl cuya altitud promedio de 2,220 msnm.

En el municipio predominan dos climas: semiseco templado con lluvias en verano (verano cálido) en el 99.65% de la superficie municipal y templado subhúmedo con

lluvias en verano (de menor humedad) que corresponde al 0.35% de la superficie municipal.

- La temperatura máxima entre abril y junio oscila entre 30 y 32°C. Durante la estación de lluvias, julio a octubre, las temperaturas máximas oscilan entre los 26 y 29°C. En la estación fría las temperaturas máximas varían entre los 26 y 28°C.
- El tipo de proceso del biodigestor anaerobio es cíclico, ya que se alimentará con los desechos orgánicos del comedor de la Facultad, residuos de poda, y agua residual de la red de alcantarillado.

3.3.1 Volumen del biodigestor.

El volumen de los residuos sólidos orgánicos requeridos que se procesarán diariamente en el biodigestor anaerobio es de 10 kg. El diseño del biodigestor se efectuó en función del material con el que se contaba el cual consiste en tres tubos de PVC con las dimensiones siguientes 0.20m de diámetro y 2.10 m de altura.

Debido a que el cuerpo del biodigestor está constituido por 3 tubos y a que se dejaron 0.5m libres en la superficie del mismo para tener en esa zona una acumulación de gas (campana), el volumen se calculó de la siguiente manera:

$$V = [(\pi * r^2) * h] * n$$

Dónde:

V= volumen de proceso del biodigestor

h= altura del tubo del biodigestor.

r= radio del biodigestor.

n= número de tubos que componen el biodigestor.

Sustituyendo los valores se tiene:

$$V = [(\pi * 0.10^2) * 1.60] * 3$$

Entonces

$$V = 0.15m^3 = 150.8L$$

$$V_{Por\ tubo} = 50.27 L$$

El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa. El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido.

$$V_T = V_G + V_L$$

$$V_T = 15.71 L + 50.27L$$

$$V_T = 65.98 L$$

Por tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$V_L = V_T * .75$$

$$V_L = 65.98 * .75$$

$$V_L = 49.48$$

El cual fue adecuado por fines de dimensionamiento:

$$V_L = 50.27L$$

El volumen gaseoso es una cuarta parte del total:

$$V_G = V_T * .25$$

$$V_G = 65.98 * .25$$

$$V_G = 16.50 L$$

Adecuado por la misma razón anterior a:

$$V_G = 15.71 L$$

Recordando que el cuerpo principal del biodigestor está formado por tres tubos tenemos:

$$V_T = 197.94 L$$

$$V_L = 150.81L$$

$$V_G = 47.13 L$$

Para que la carga diaria de entrada pueda ser digerida por las bacterias, es necesario que esté en el interior del biodigestor tanto tiempo como el tiempo de retención estimado (según la temperatura del lugar). Ya que el biodigestor tubular es de flujo continuo, el volumen líquido será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria. De esta manera, si imaginamos el biodigestor vacío

inicialmente y se comenzará a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado en llenarse. Y así, “tiempo de retención +1 día”, al cargar el biodigestor, se desborda expulsando la carga del primer día ya digerida.

El volumen líquido de un biodigestor será el resultado de multiplicar la mezcla diaria de carga por el tiempo de retención.

Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaerobia (en ausencia de oxígeno) se va a producir biogás, y éste se acumulará en la parte superior. Al ser el biodigestor de polietileno tubular se formará una campana de biogás que sirve para almacenar gas y darle forma al biodigestor. El volumen gaseoso equivale a un tercio del volumen líquido. (Martí Herrero, 2008)

3.3.2 Construcción del biodigestor.

A continuación se presentan una serie de fotografías en las que se muestra el proceso de construcción del biodigestor.

El biodigestor se asentó sobre una base móvil de hierro, que se tenía en el laboratorio y la cual fue adecuada para sostener y soportar los tubos que serán la cámara de degradación anaerobia de los residuos sólidos y la formación del biogás.

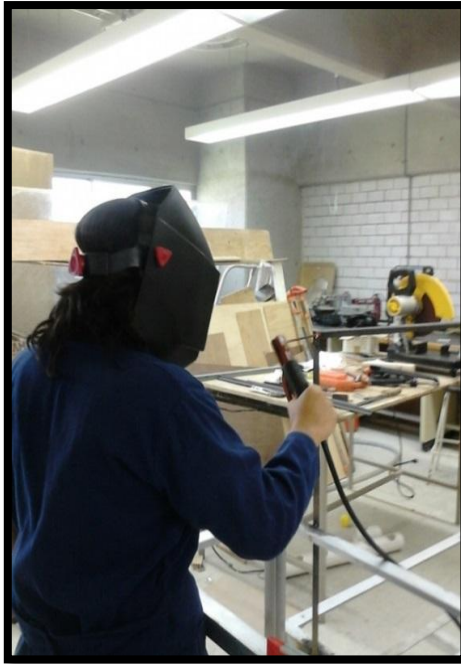


Figura 3.10. Base de metal sobre el cual se construyó el Biodigestor (Falcón y Sánchez, Agosto 2014).

En la base móvil de metal se soldaron algunos ángulos para dar el soporte requerido y conseguir que los tubos de PVC se mantuvieran estables y así dar suficiente apoyo a cada elemento del biodigestor.

Las barras verticales tienen una dimensión de 0.76 m de largo, mientras que las 2 barras horizontales tienen una dimensión de 1.57m. En cuanto a las barras más cortas que proporcionan la rigidez tienen una longitud de 0.17m cada una.

Una vez realizadas las soldaduras se procedió a dar un mejor acabado al trabajo lijando toda la base del biodigestor.



Figuras 3.11 y 3.12. Soldadura a las barras horizontales (Agosto, 2014).



Figura 3.13 Lijado de base de metal (Agosto 2014)



Figura 3.14. Barras de soporte horizontal (Agosto, 2014).



Figura 3.15. Barras de soporte terminadas (Agosto, 2014).

En la parte baja de cada tubo que compone el biodigestor, se colocaron válvulas para permitir el desalojo del residuo que no fue procesado en la biodigestión, dichas válvulas fueron conectadas con un codo de 90° y tubería de PVC de 2".

Fue necesario que esta instalación contara con una pendiente considerable para que el residuo pudiera desplazarse y salir.

Debido a que las válvulas que se utilizaron eran difíciles de abrir se tuvo que soldar un par de barras verticales en los extremos de cada válvula para que no se movieran, lo que permitió que las válvulas se mantuvieran firmes a la hora de abrirlas o cerrarlas.



Figura 3.16. Unión codo de 90° con un tubo de 2" y válvula (Agosto, 2014).



Figura 3.17. Detalle que se realizó a la tubería para obtener la inclinación necesaria para el desalojo de lodos (Agosto, 2014).

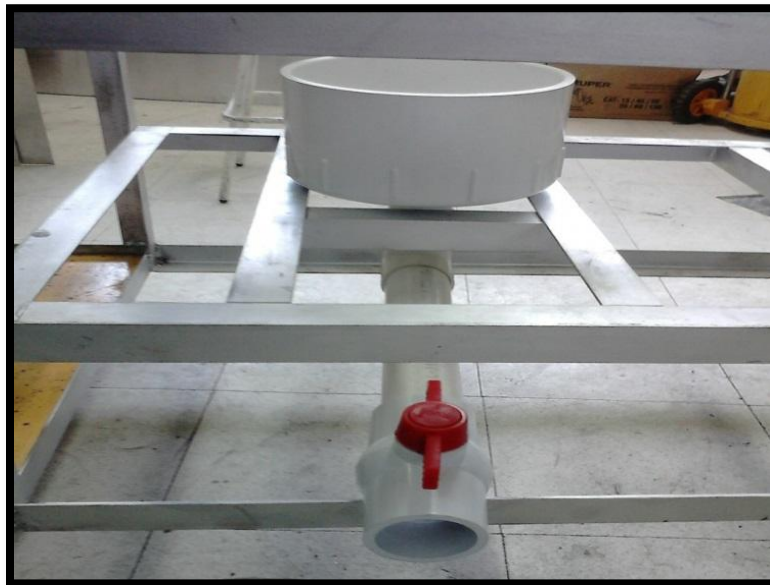


Figura 3.18 Montaje de la instalación de salida de lodos (Agosto, 2014).



Figura 3.19 Inclínación en la instalación para desecho de lodos (Agosto, 2014).



Figura 3.20 Ajuste de barras verticales (Agosto, 2014).

Una vez colocada y ajustada la instalación para el desecho de lodos, se procedió a colocar cada tapa en su respectivo sitio y pegar los tres tubos de 0.20m de diámetro y 2.10 m de altura, que compone el cuerpo principal del biodigestor.



Figura 3.21. Tubos que componen el cuerpo principal del biodigestor colocados (Agosto, 2014).

Lo siguiente a realizar fue una perforación a cada tubo a 1.80m, para poder colocar la instalación de alimentación.

La instalación de la alimentación se realizó en dos etapas, para la primera se utilizó tubo de PVC de 2", 3 válvulas, 2 codos de 90 y 2 Tesc. Las válvulas se colocaron con la finalidad de poder controlar el paso de la materia orgánica en cada uno de los tubos, es decir, alimentar a cada tubo con el mismo sustrato.



Figura 3.22. Realización de las perforaciones. (Agosto, 2014)



Figura 3.23. Perforaciones para la alimentación del biodigestor (Septiembre, 2014).

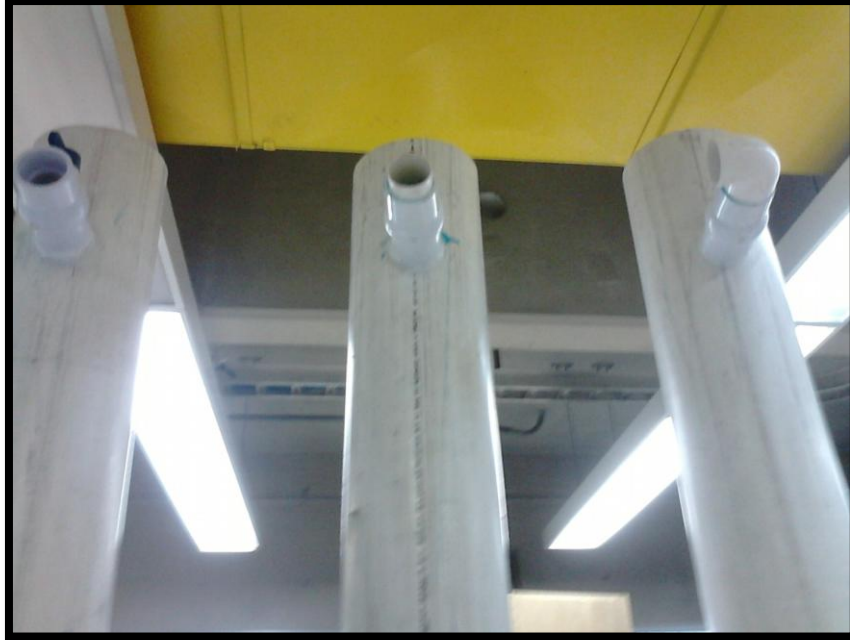


Figura 3.24. Colocación de las válvulas de alimentación (Septiembre 2014)



Figura 3.25 Primera conexión de la tubería de alimentación (Septiembre 2014)



Figura 3.26 Instalación de la alimentación primera etapa. (Septiembre, 2014).

La segunda etapa de la instalación de alimentación consistió en conectar las tres tuberías principales a una bomba trituradora sumergible, la cual se colocó en el interior de un contenedor de fibra de vidrio que fue restaurado y que será el encargado de resguardar la mezcla de materia orgánica y agua residual para alimentar el biodigestor.

Para la segunda etapa de la instalación de la alimentación se utilizó tubería de 2", tres codos de 90° y una tuerca unión, ésta última con el objetivo de poder desprender una parte de la instalación para dar mantenimiento a la bomba y poder realizar la limpieza del contenedor de material orgánico si se requiere.



Figura 3.27 Contenedor de material orgánico. (Octubre, 2014).



Figura 3.28 Bomba trituradora sumergible. (Octubre, 2014).

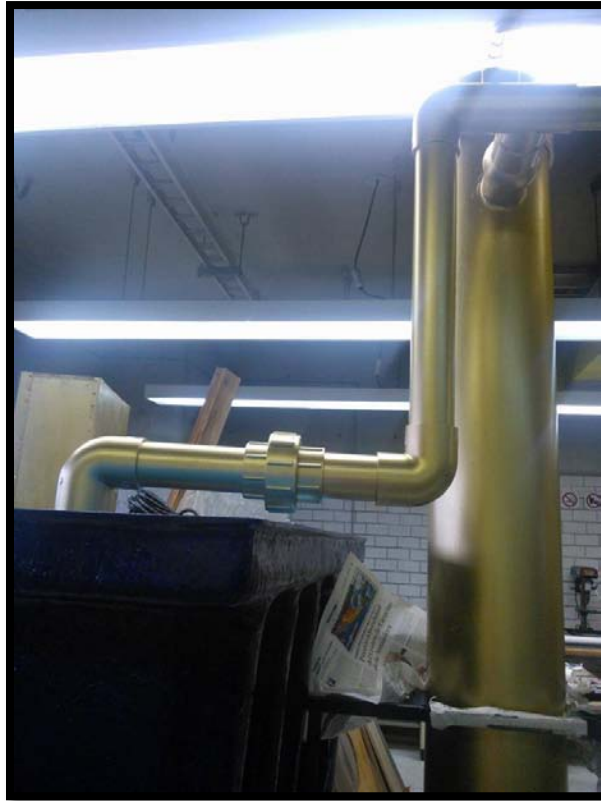


Figura 3.29 Segunda etapa de la instalación de alimentación. (Noviembre 2014).

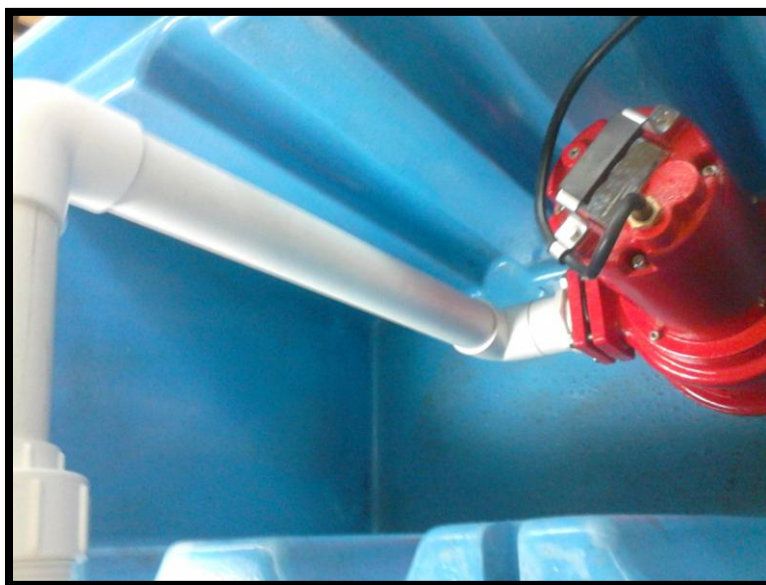


Figura 3.30 Segunda etapa de la instalación de alimentación al interior del contenedor. (Octubre 2014).



Figura 3.31 Tuerca unión usada en la instalación de alimentación. (Noviembre 2014).

Lo siguiente fue realizar toda la instalación interna, que se compone de una bajada del tubo de alimentación, otra tubería para el control de nivel hidrostático, y un mezclador. Estos tres componentes presentes en cada tubo que compone el cuerpo principal del biodigestor.

Para la bajada de la tubería de alimentación se utilizaron dos codos de 90° y una tubería de 2" con un largo de 1.80m, que llegaba hasta la parte baja del biodigestor, el primer codo se utilizó para realizar la conexión interna, mientras que el segundo codo compone la terminación de dicha bajada, que permite que al entrar el material y llegar a la parte baja se genere un vórtice que mezcle todo el material, tanto el que entra como el que se encuentra dentro del biodigestor

Las tuberías encargadas de controlar el nivel hidrostático en el interior fueron instaladas en la parte trasera y se construyeron con tubería de $\frac{1}{2}$ "", se encuentran instalados a una altura de 1.60m y un codo en la conexión.

El tercer componente de la instalación interna es el agitador, cuyo objetivo es que material vertido en el biodigestor sea correctamente diversificado, dicho mezclador se construyó con medias cañas de PVC (tubo de $\frac{1}{2}$ " cortados por la mitad), e hilo de nylon (que es más resistente al ambiente al que será expuesto) para sujetarlo. La función del mezclador es que con el vórtice que se genere al hacer la alimentación, estas medias cañas se muevan y funcione como un agitador dentro del biodigestor y mantenga la materia orgánica homogénea.



Figura 3.32. Tubo para la bajada de la alimentación (Septiembre, 2014).

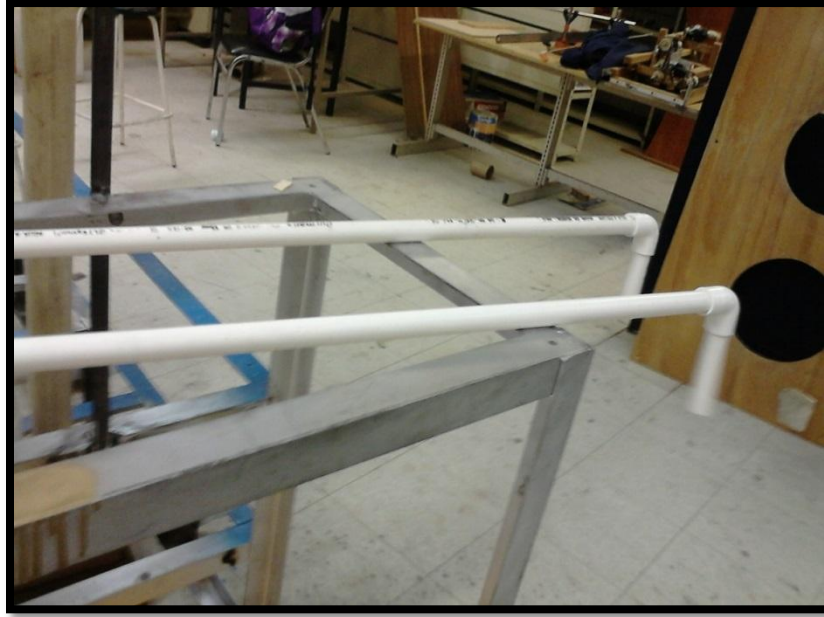


Figura 3.33. Tubo para el funcionamiento de nivel hidrostático (Septiembre, 2014).



Figura 3.34. Base del mezclador (Septiembre 2014)



Figura 3.35 Mezclador (Septiembre 2014)

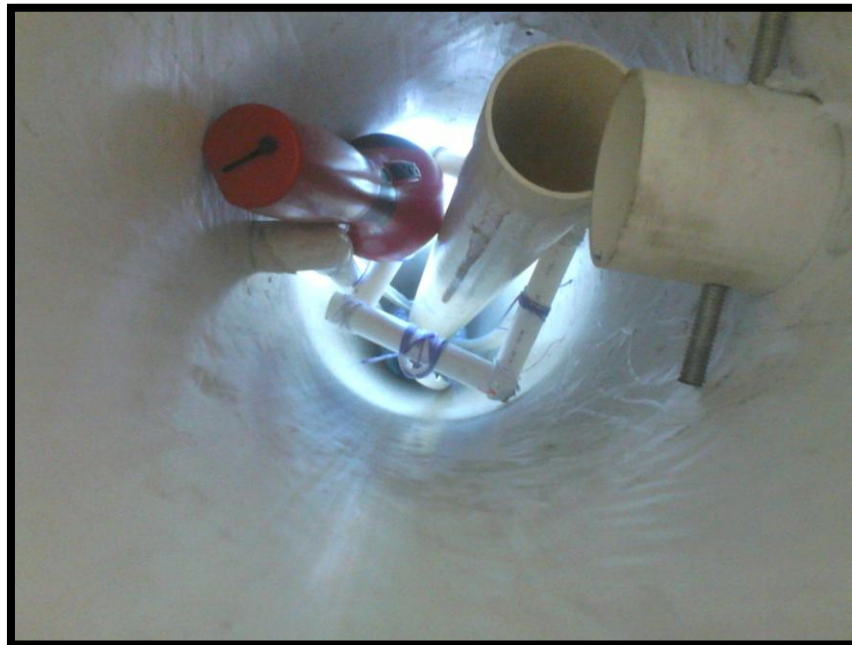


Figura 3.36. Instalación interna del biodigestor (Septiembre 2014)

Se continuó con la construcción y para esto se comenzó con la instalación de salida de gas, dicha instalación también constó de dos etapas. En la primera

unieron las tres tuberías principales y en la segunda se hizo una limpieza del gas que se generó.

Para la construcción de la primera etapa se utilizaron 3 válvulas, tubería de $\frac{1}{2}$ ", dos codos de 90° y dos codos en forma de T .



Figura 3.37 y 3.38 Perforación de las tapaderas (Septiembre 2014)



Figura 3.39. Instalación de gas primera parte (Septiembre 2014)

Para la segunda parte de esta instalación se recicló un tubo de vidrio pues de esta manera se observará en ciertos períodos que deben cambiarse los materiales que estarán dentro de él y que harán el correcto filtrado del gas. Entre los materiales a los que se les dará mantenimiento serán la sílica (material que absorbe humedad), fibra metálica encargada de transformar el ácido sulfhídrico en sulfato de hierro y para finalizar el agua, encargada de eliminar el gas carbónico contenido en el biogás, estos tres elementos permitirán que el gas salga con la calidad apropiada. Para este objetivo se optó por una longitud de tubo de 30cm.

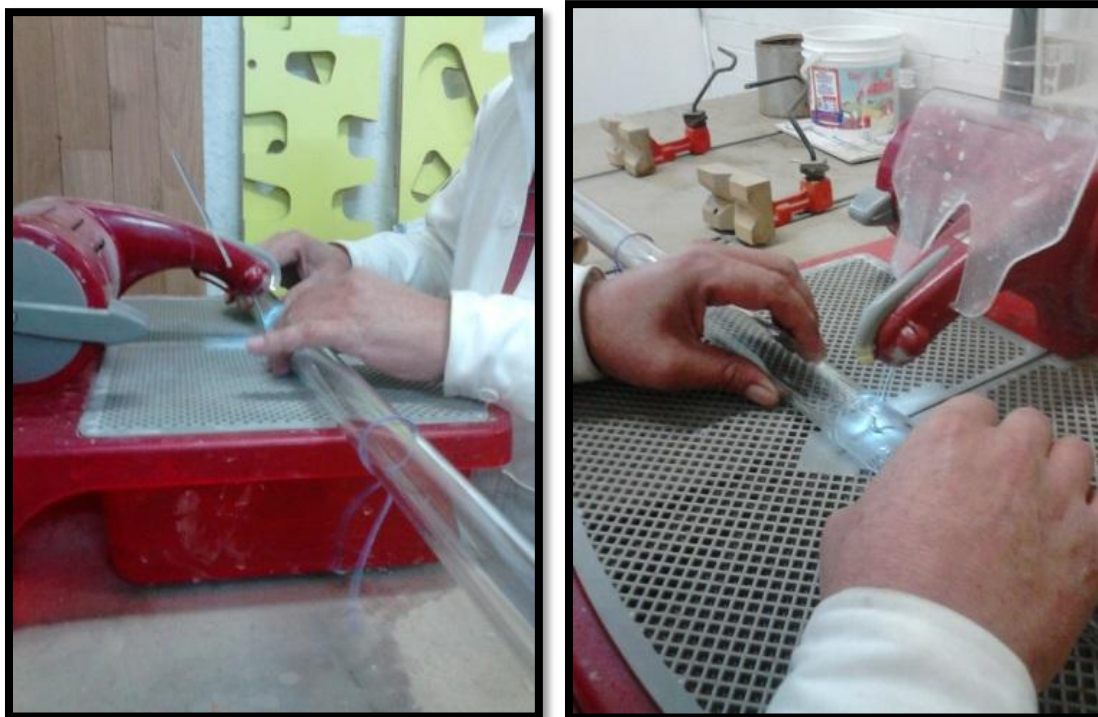


Figura 3.40 y 3.41 Cortado y ajuste de tubería de vidrio (Noviembre 2014)

Se utilizaron tuercas unión para poder dar mantenimiento a la instalación y un garrafón de $\frac{1}{2}$ litro para colocar el agua a través de la cual burbujeara el gas para quitar dicha humedad.

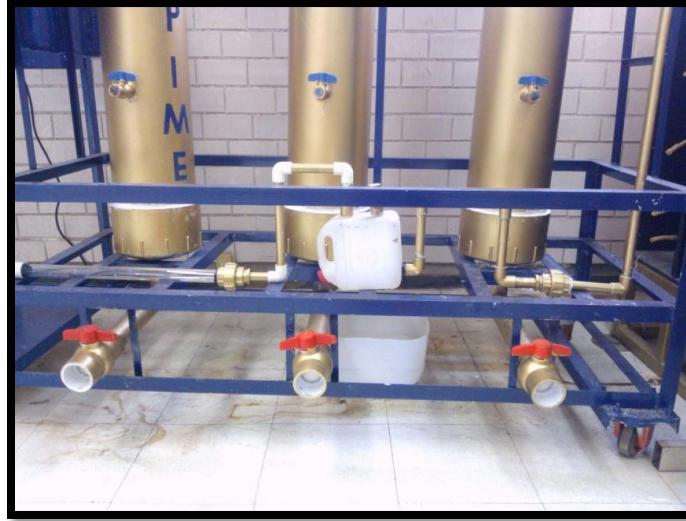


Figura 3.42. Segunda parte de la instalación de gas (Noviembre 2014)

Se realizaron nuevamente unas perforaciones y la colocación de válvulas a 0.45 m. ya que funcionaran para muestrear el mezclado y así tener el debido control de ésta al interior del biodigestor.

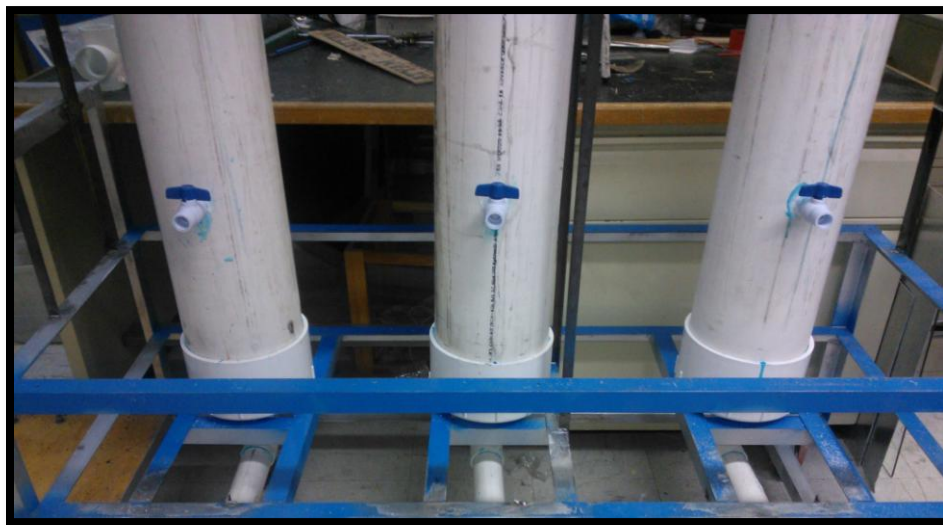


Figura 3.43. Válvulas de muestreo (Septiembre 2014)

Por último se procedió a pintar y a dar un acabado final al biodigestor.

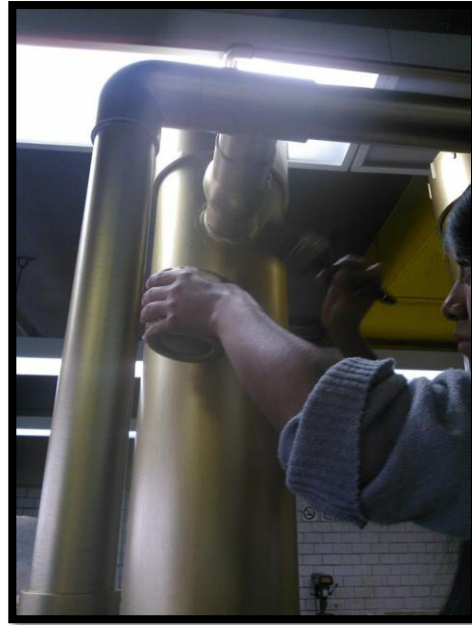
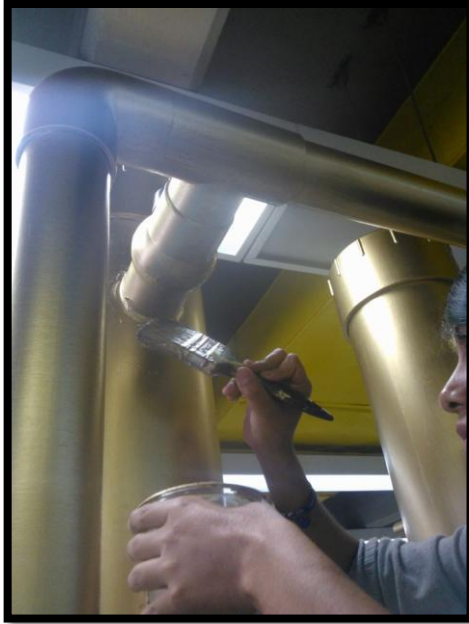
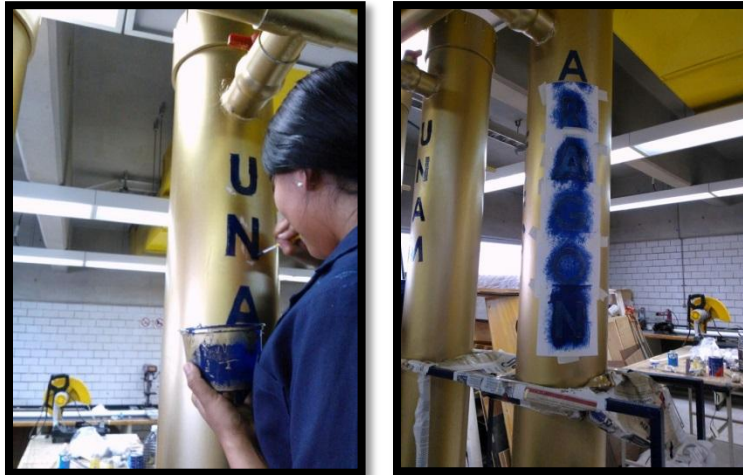


Figura 3.44 y 3.45 Pintado de las tuberías (Noviembre 2014)



Figura 3.46 Pintado de la base (Noviembre 2014)



Figuras 3.47 y 3.48 Colocación y retocado de las letras (Noviembre 2014)

Una vez terminado el biodigestor antes de arrancarlo se realizó una prueba de fugas. Para la realización de esta prueba se procedió a llenar cada una de las tuberías que componen el cuerpo principal del biodigestor con agua, e identificar en qué lugares existían escapes para después proceder a su sellado. El llenado de cada tubo será a 1.60m de altura, ya que es ahí donde se encuentra instalado el tubo que controla el nivel hidrostático, y cuando llegara a dicho nivel el agua saldría desalojada por el tubo mencionado, el tiempo aproximado en el que cada tubo se llenó fue de 15 segundos.



Figuras 3.49 y 3.50 Llenado de cada tubo con agua (Noviembre 2014)



Figuras 3.51 y 3.52 Vaciado de las tuberías (Noviembre 2014).

Las complicaciones que se tuvieron fueron pocas, ya que en la prueba fueron mínimas las fugas presentadas en el biodigestor.



Figuras 3.53 Biodigestor terminado. (Enero 2015).

Terminada la construcción del biodigestor se realizó el llenado con 10 kg de residuos orgánicos y 130 L de agua residual. El material usado para el llenado del contenedor es procedente de la facultad así como el agua residual.



Figura 3.54. Clasificación y peso de la materia orgánica (Febrero 2015)



Figura 3.55. Vaciado del material orgánico al contenedor (Febrero 2015)

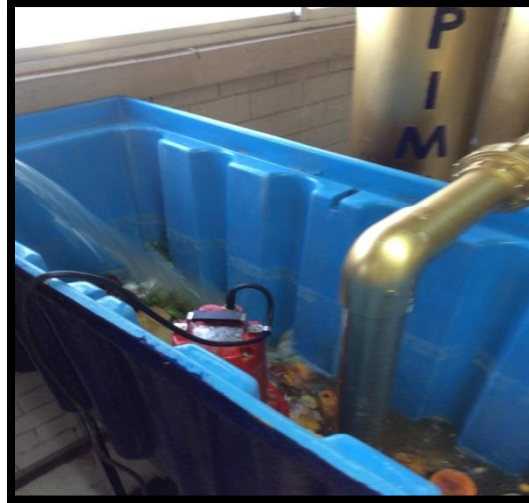


Figura 3.56. Vaciado de agua residual al contenedor (Febrero 2015)

Después del llenado del contenedor se procedió a mezclar el contenido, para lograr una homogeneidad, continuando enseguida con el arranque del biodigestor.



Figura 3.57. Mezcla del material (Febrero 2015)

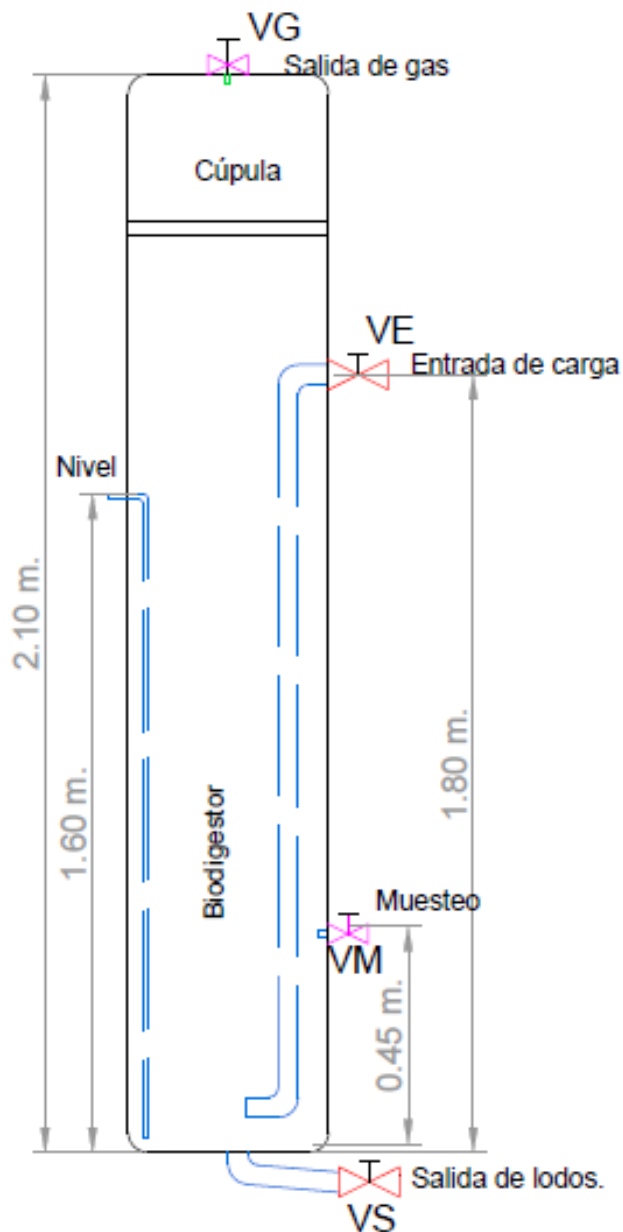
Por último se arrancó el biodigestor por lo que se encuentra en etapa de estabilización, por lo que se mide DQO cada semana para poder calcular la producción de biogás producido de forma regular.




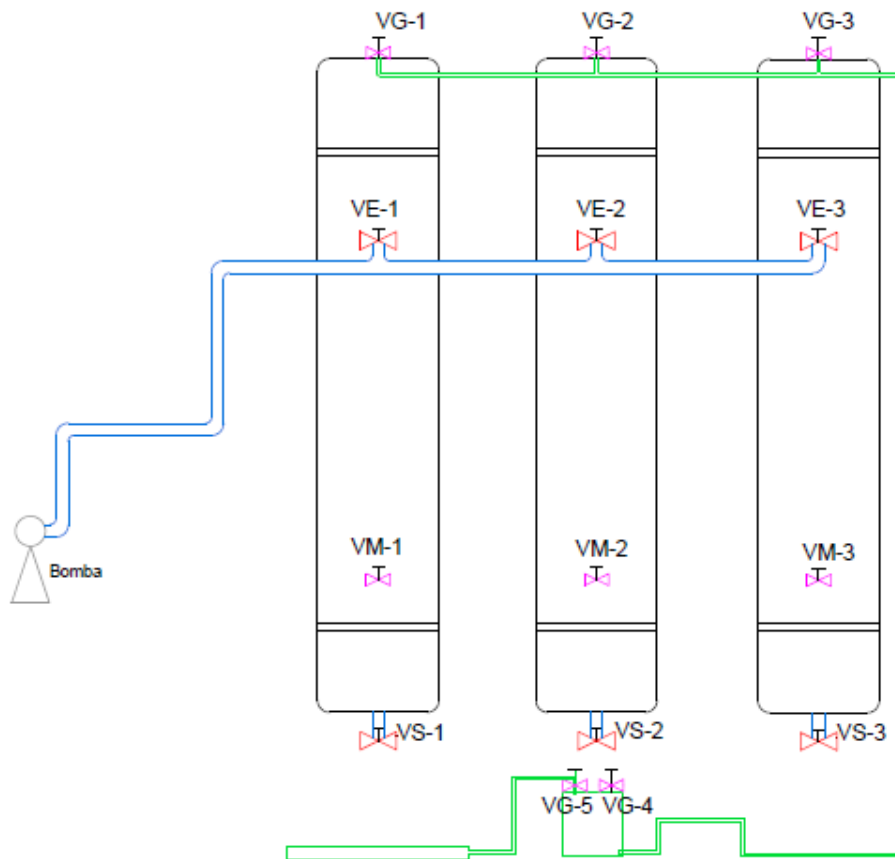
Figura 3.58. Toma de muestra para la obtención de la DQO (Febrero 2015).

3.4 Recomendaciones

A continuación se muestran unos esquemas que servirán para una correcta operación del biodigestor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN	
Elaboro: Sánchez Aparicio Olivia y	
Falcón Arellano Berenice Itzel	
Perfil de biodigestor	
Estado de México a 9 de Enero de 2015	
	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

Elaboro: Sánchez Aparicio Olivia y

Falcón Arellano Berenice Itzel

Diagrama del biodigestor

Estado de México a 9 de Enero de 2015



Antes de la puesta en operación del biodigestor es necesario realizar la mezcla de la materia orgánica que será introducida a cada tubo, se necesitan 10 Kg de residuos sólidos mezclados en 130 L de agua residual

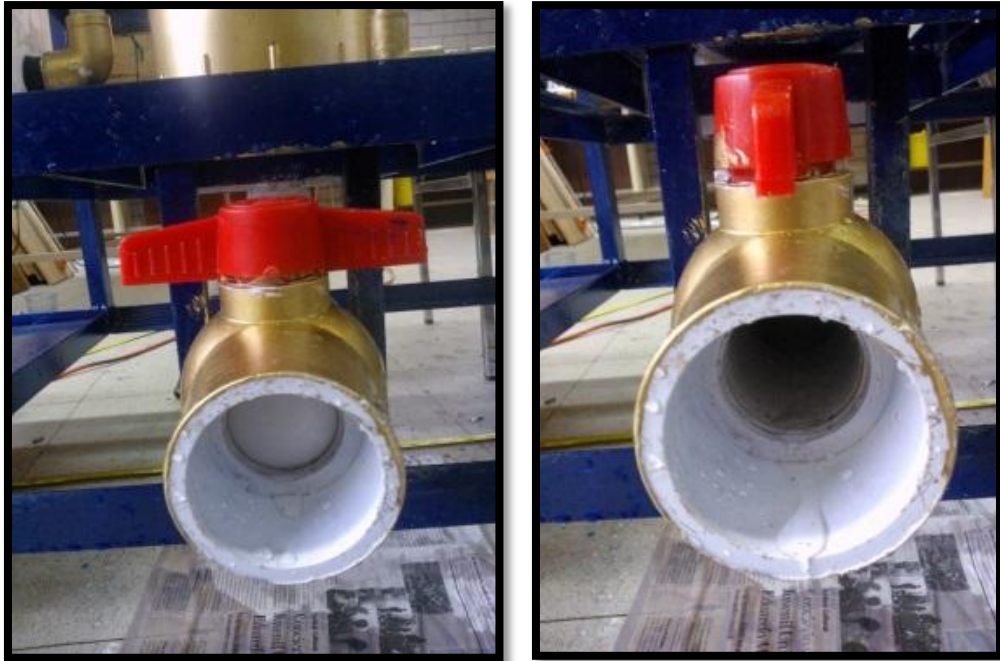
Una vez realizada la mezcla se debe verificar que ésta ocupe $\frac{3}{4}$ partes del contenedor designado para ese objetivo, para garantizar que los 3 tubos se llenarán, esto solo si los tubos están completamente vacíos, es decir es la primera vez que se llenaran.

- 1) Lo primero que debe verificarse antes de prender la bomba es que todas las válvulas se encuentren cerradas a excepción de la válvula VE-1, VG-1 Y VG4, para realizar el llenado del primer tubo. Se encenderá la bomba por alrededor de 15 segundos o hasta que comience a salir materia orgánica

por el nivel que se ubica en la parte trasera de cada tubo, por lo cual se sugiere que mínimo dos personas realicen esta operación, una será la encargada de encender la bomba y la otra estará en la parte de atrás con una cubeta en el nivel, para evitar ensuciar el área de trabajo.

- 2) Para el llenado del segundo tubo se procede a cerrar las válvulas VE-1 Y VG-1 y a abrir las válvulas VE-2 y VG-2, para después poner en marcha nuevamente la bomba siguiendo las recomendaciones anteriormente descritas.
- 3) Para llenar el último tubo es necesario cerrar las válvulas VE-2 y VG-2 y abrir las válvulas VE-3 y VG-3, y repetir la operación de los pasos anteriores.
- 4) Una vez llenos los tres tubos se cerrara la válvula VE-3 y se abrirán las 2 válvulas de gas restantes que se encuentran cerradas VG-1 Y VG-2, y se cerrara la válvula VG-4 (cuya función es liberar la presión a la hora del llenado). La válvula VG-5 nos permite regular la salida del gas hacia un quemador o un lugar de almacenamiento.

Las imágenes nos permiten conocer la ubicación de cada parte del biodigestor e identificar como luce una válvula cerrada y una válvula abierta, si se tiene alguna duda se recomienda usarlas como apoyo.



Figuras 3.52 y 3.53 Válvula cerrada y válvula abierta (Noviembre 2014).

- 5) Una vez concluido el llenado se recomienda realizar el lavado del contenedor donde se encuentra la bomba y los utensilios que se hayan empleado.

En caso de **no ser la primera vez** que se realiza el llenado lo primero que se debe de hacer es sacar el gas acumulado en el sitio destinado para esta tarea y hacer una purga de al menos del 50% del material contenido dentro de cada tubo para poder ingresar la nueva carga, posteriormente se deben de seguir los pasos anteriores desde el punto 1 hasta el 5.

La segunda parte de la instalación de gas cuenta con 3 elementos necesarios para la realización de la limpieza del gas producido, el primero es el agua nos permite quita el gas carbónico contenido en el biogás, el segundo es una fibra metálica que reacciona con el ácido sulfhídrico y lo convierte en sulfato de hierro, se recomienda que esta fibra sea cambiada cada 6 meses, y el tercero es la sílica gel

encargada de quitar la humedad, estos tres elementos tienen cierta durabilidad en especial la sílica gel, la cual deberá ser cambiada cada vez que notemos que existe un cambio de color ya que al inicio es de un azul marino y cuando comienza a absorber la humedad cambia a color rosado. Es por eso que esta parte de la instalación es removible para su fácil mantenimiento.



Figuras 3.54 Detalle de unión removible en instalación (Noviembre 2014).

Se sugiere realizar un monitoreo continuo de la mezcla para calcular la producción de biogás y usarlo para evitar un exceso de acumulación lo que provocaría una sobrepresión.

3.5 Conclusiones

- Las energías limpias componen un esquema global que involucra grandes alternativas para mejorar el medio ambiente.
- La creación de proyectos sustentables debe mantenerse vigente, ya que se trata de una necesidad histórica para que se garantice el derecho a que los humanos vivan en los próximos años en un ambiente más sano.
- El desarrollo de proyectos de ingeniería sustentable crean un camino de grandes oportunidades para el futuro en la preservación y cuidado del ambiente.
- Este proyecto es una alternativa sustentable que genera un equilibrio de reducción-producción.
- Un biodigestor anaerobio permite un amigable aprovechamiento de gas y evita el consumo de combustibles fósiles que se encuentran hoy en día en declive.
- A partir de la generación de biogás surgen otros proyectos que pueden utilizarlo para producir otro tipo de energías sustentables.
- Los biodigestores son una solución para la disminución y aprovechamiento de desperdicios de tipo orgánico.
- El tratamiento de residuos sólidos orgánicos permite evitar que gases de efecto invernadero sigan siendo depositados en la atmósfera.
- La implementación de un biodigestor anaerobio permite generar ricas cantidades de metano para su aprovechamiento a micro y macro escala.

- La materia orgánica que es generada dentro de la Facultades es utilizada adecuadamente evitando así la acumulación de desperdicios orgánicos en grandes cantidades.
- La generación de lodos “estabilizados” pueden ser usados ya que contienen ricas concentraciones de nutrientes para su implementación como abono.
- Los lodos “estabilizados” también pueden usarse para alimentar otro tipo de dispositivos cuya finalidad es el tratamiento de agua.
- Los digestores anaerobios pueden utilizar agua residual como materia prima, lo cual sirve para tratar el agua. .
- Los beneficios económicos son grandes ya que se realiza un aprovechamiento de desperdicios orgánicos derivados de otras actividades, y que de no ser así terminarían en un basurero sin ninguna utilidad.
- La conversión de los residuos orgánicos para la generación de energía reduce los problemas que trae el manejo de estos desechos.
- Trae beneficios económicos a largo plazo, ayudando así a disminuir los gastos excesivos derivados de la compra de gas doméstico.
- La mezcla de materia orgánica realizada en este proyecto se hizo con los residuos disponibles en la facultad sin embargo, no son los más eficientes para la producción de biogás, por lo que la mezcla puede ser mejorada.

CAPITULO IV REFERENCIAS.

- Albadi M.H., El-Saadany E.F., Albadi H.A. (2009). Wind to power a new city in Oman.
- Abuelnuor A.A.A., Wahid M.A., Ehsan Hossein Seyedi, Saat A., M. Saqr Khalid, H.Sait Hani, M.Osman (2014). Characteristics of biomass in flameless combustion: Areview.
- Agbor V., Carere C. , Cicek N. ,Sparling R. ,Levin D. (2014). Biomass pretreatment for consolidated bioprocessing (CBP).

- Agrafiotis Christos, von Storch Henrik, Roeb Martin, Sattler Christian (2014). Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production. A review.
- Agredano J, Huacuz J. (2012). PV technology: status and prospects in Mexico.
- Aguilar, F.X., Botero R. (2006). Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo.
- Akdag SA, Dinler A.(2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications.
- Alcayaga, S.; Glaría, J.; Guerrero L. (1999). Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida.
- Alcocer, S. M. y G. Hiriart (2008). An applied research program on water desalination with renewable energies.
- Alva (2001). Esterificación. Documento en línea: <http://docencia.izt.uam.mx/docencia/alva/esterificacion.html>.
- Ammari H.D., Al-Maaitah A. (2003). Assessment of wind-generation potentiality in Jordan using the site effectiveness approach.
- Angelidaki I, Ahring BK. (1992). Effects of free long-chain fatty acids on thermophilic an aerobic digestion.
- Antal MJ, Gronli M (2003). The art, science, and technology of charcoal production.
- Antoniou N, Zabaniotou A (2013). Features of an efficient and environmentally attractive used tires pyrolysis with energy and material recovery.
- Appels L, Degreève J, Van der Bruggen B, Van Impe J, Dewil R (2010). Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilization, heavy metal release and anaerobic digestion. Bioresour Technol.
- Appels Lise, Lauwers Joost, Degreève Jan, Helsen Lieve, Lievens Bart, Willems Kris, Van Impe Jan, Dewil Raf (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges.

- Arancibia Bulnes Camilo y Best y Brown Roberto (2010). Energías Alternativas.
- Arent Douglas J., Wise Alison, Gelman Rachel (2011). The status and prospects of renewable energy for combating global warming.
- Arias B, Pevida C, Feroso J, Plaza MG, Rubiera F, Pis JJ (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass.
- Assefa G, Frostell B. (2007). Social sustainability and social acceptance in technology assessment: a case study of energy technologies.
- AWS Scientific (1997). Wind resource assessment handbook.
- Azeem Khalid, Muhammad Arshad, Muzammil Anjum, Tariq Mahmood, Lorna Dawson (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste.
- Bakos G. (2009). Distributed power generation: a case study of small scale PV power plant in Greece.
- Balat M, Balat M, Kirtay E, Balat H (2009). Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals.
- Ben-Ghedalia D. y Miron J. (1981). The effect of combined chemical and enzyme treatment on the saccharification and in vitro digestion rate of wheat straw.
- Bertani R, (2007). World geothermal generation in 2007.
- Biodisol (2014). Tecnologías de producción de biogás.
- Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat y Power (2012). Guía para diseñar procesos de secado de biomasa.
- Blanco M.I. (2009). The economics of wind energy.
- Bollini Braga Lúcia, Luz Silveira Jose, Evaristo da Silva Marcio, Eduardo Tuna Celso, Blanco Machin Einara, Travieso Pedroso Daniel (2013). Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical economic and ecological analysis.
- Botero B., R.; Preston, T.R.; (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización.
- Bouallagui, H., Cheikh, R.B., Marouani, L., Hamdi, M., (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in tubular digester.

- Bridgeman TG, Jones JM, Shield I, Williams PT (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties.
- Bridgwater (2001). Pirolisis un proceso para derretir la biomasa.
- Bridgwater AV (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass.
- Brown TR, Wright MM, Brown RC (2011). Estimating profitability of twobiochar production scenarios: slow pyrolysis vs.fast pyrolysis. Biofuels, Bioproducts and Biorefining.
- Buchwalder J, Scheidig K, Schingnitz M, Schmöle P (2006). Results and trends on the injection of plastics and ASR into the blast furnace.
- Burton Tony, David Sharpe y Nick Jenkins (2001). Wind energy handbook.
- Cadenas E., Rivera W. (2009). Short term wind speed forecasting in La Venta, Oaxaca, México, using artificial neural networks.
- Campbell RJ (2010.). China and the United States—a comparison of green energy programs and policies.
- Cancino Solórzano Y, Xiberta Bernat J. (2008). Situación Actual de la Energía Eólica en México: Alcances y Perspectivas.
- Cancino Solórzano Y., Xiberta Bernat J (2007). Las energías renovables en el Programa Sectorial de Energía de México. In: XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales.
- Cancino-Solórzano Y., Xiberta-Bernat J. (2009). Statistical analysis of wind power in the region of Veracruz (Mexico).
- Cancino-Solórzano Yoreley, Gutiérrez - Trashorras Antonio J., Xiberta-Bernat Jorge (2011). Current state of wind energy in Mexico, achievements and perspective.
- Cancino-Solórzano Yoreley, Villicaña-Ortiz Eunice, Gutiérrez-Trashorras Antonio J., Xiberta-Bernat Jorge (2010). Electricity sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable an ergy sources.
- Cárdenas R., Pena R., Tobar G., Clare J., Wheeler P., Asher G. (2009). Stability analysis of a wind energy conversion system based on a doubly fed induction generator fed by a matrix converter.
- CER (Centro de Energías Renovables) (2012). Energía Biomasa.

- Cirne DG, Paloumet X, Björnsson L, Alves MM, Mattiasson B (2007). Anaerobic digestion of lipid-rich waste—effects of lipid concentration.
- Clark TA y Mackie KL (1987). Steam explosion of the soft-wood *Pinus radiata* with sulphur dioxide addition.
- Cleveland, C. J., Morris, C. (2006). Dictionary of Energy.
- Collison M, Collison L, Sakrabani R, Tofield B, Wallage Z (2009). Biochar and carbon sequestration: a regional perspective.
- Comisión Federal de Electricidad (2006). Fomento a proyectos hidroeléctricos para inversión social y privada.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONAE) (1995), Situación actual de la hidráulica y determinación del potencial aprovechable en una región de los estados de Veracruz y Puebla, CONAE, México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE); 2010.
- Documento en línea: <http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/CONA>
- Conferencia Internacional sobre Energías Renovables y Tecnologías del Agua (CIERTA 2008).
- Corro Grisel., Paniagua Laura, Pal Umapada, Bañuelos Fortino, Rosas Minerva (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: infrared studies of postcombustion emission.
- Couhert C, Salvador S, Commandré JM (2009). Impact of torrefaction on syngas production from wood.
- Cruz-Peragon F. , Palomar JM., Casanova PJ., Dorado MP., Manzano-Agugliaro F. (2012). Characterization of solar flat plate collectors.
- Cuervo Laura, Folch Jorge Luis, Quiróz Rosa Estela (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol.
- Dale BE, Henk LL, Shiang M (1984). Fermentation of lignocellulosic materials treated by ammonia freeze-explosion.
- Damartzis T, Zabaniotou A. (2011). Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design – a review.
- De Mol, RM., Jogems, MAH., van Breek, P., y Gigler, JK. (1997). Simulation and optimization of the logistic of biomass fuel collection.

- Del Rio P., Burguillo M (2009). An empirical analysis of the impact renewable energy deployment on local sustainability.
- Demirbas A (2000). Recent advances in biomass conversion technologies.
- Demirbas A, Arin G (2002). An overview of biomass pyrolysis.
- Demirbas A. (2008). Energy issues and energy priorities.
- Deng J, Wang G-j, Kuang J-h, Zhang Y-l, Luo Y-h (2009). Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction.
- Denny E, O'Malley M, (2006). Wind generation power system operation and emission reduction.
- Denny E. (2009). The economics of tidal energy.
- Denver Colorado, USA: NREL (2009). National Renewable Energy Laboratory.
- Deublein D, Steinhauser A (2008). Biogas from waste and renewable resources.
- Diario Oficial de la Federación (2006).
- Diekema, WH, de Mol, RM., Annevelink, E., y Elbersen, H.W. (2005). Combining goals in the logistics bio-energy chains.
- Director of Middle East Center for Energy u Environment Technologies (MCEET) (2007). Energy efficiency and renewable technologies: the way to sustainable energy future.
- Domac J, Trossero M (2008). Industrial charcoal production.
- Duff SJB, Murray WD (1996). Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review.
- Duku MH, Gu S, Hagan EB (2011). Biochar production potential in Ghana—a review.
- Economou A. (2010). Renewable energy resources and sustainable development in Mykonos (Greece).
- Eggeman T, Elander RT (2005). Process and economic analysis of pre-treatment technologies.

- Eleni K. Stigka, Paravantis John A., Giouli K. Mihalakakou (2014). Social acceptance of renewable energy sources: A review of contingent valuation applications.
- Energía de las mareas (s.f.). Documento en línea: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo23>
- EREC (2010). Renewable energy technology roadmap 20% by 2010.
- EREC, European Renewable Energy Council. (2006). Renewable energy scenario to 2040, half of the global energy supply from renewables in 2040.
- Estrada G, Islas S. (2007). Energías renovables, una alternativa de desarrollo sustentable para México.
- Estrada Gasca Claudio A. y Arancibia Bulnes Camilo A. (2010). Las Energías Renovables: la energía solar y sus aplicaciones.
- EU renewable energy policy 2010.
- Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (2011). Renewable Energies. Perspective for a Sustainable Energy Future.
- Felfli FF, Luengo CA, Suárez JA, Beatón PA (2005). Wood briquette torrefaction.
- Fischer, C., Newell, R., (2008). Environmental and technology policies for climate mitigation.
- FOCER (Fortalecimiento de capacidad de energía renovable para América Central) (2002). Manual sobre energía renovable: biomasa.
- Freni S., Cavallaro S. (2010). Catalytic partial oxidation of methane in a molten carbonate fuel cell.
- Galvagno A., Chiodo V., Urbani F., Freni F. (2013). Biogas as hydrogen source for fuel cell applications.
- "Glasnovic Z., Margeta J. (2011). Vision of total renewable electricity scenario.
- Global trends in green energy (2009). New power capacity from renewable.
- Global wind (2008). Global Wind Energy Council (GWEC).

- Göransson K, Söderlind U, He J, Zhang W (2001). Review of syngas production via biomass.
- Grob G, citado por Elliot D, (2011). A sustainable future? The limits to renewables. Before the wells run dry.
- Guevara V. A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes.
- Gupta M., Coylel.,Thambimuthu K. (2003). CO2 capture technologies and opportunities in Canada.
- "Gupta, H. K. y S. Roy (2007). Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century.
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. y Quijano-León J. L. (2005), "Update of geothermics in Mexico.
- Hamelinck CN, Faaij APC. (2002). Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass.
- Hau Erich (2005). Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics.
- Hendriks A.T.W.M., Zeeman G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass.
- Hernandez-Berriel M.C., Benavides L.M., Perez D.J.G., Delgado O.B., (2008). The effect of moisture regimes on the anaerobic degradation of municipal solid waste from Metepec (Mexico).
- Hernández-Escobedo Q., Manzano-Agugliaro F., Zapata-Sierra A. (2010). The wind power of Mexico.
- Higman C (2003). Gasification.
- Hilbert Jorge (2010). Manual para la producción de biogás.
- Hilbert Jorge A. (s.f.). Manual para la producción de biogás.
- Hiriart Gerardo, Gutiérrez-Negrín C.A. Luis (2003). Main aspects of geothermal energy in Mexico.
- Holtzapple MT, Humphrey AE, Taylor JD (1989). Energy requirements for the size reduction of poplar and aspen wood.

- Hon y Shiraishi (2001). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos
- Huacuz Jorge M. (2005). The road to green power in Mexico—reflections on the prospects for the large-scale and sustainable implementation of renewable energy.
- Huacuz Jorge M., Agredano J. (2010). National survey report of PV power applications in Mexico 2010.
- Huacuz V., Jorge M., (2001). Barriers and strategies.
- Iceland Deep Drilling Project (2010). Documento en línea: www.iddp.is.
- IEA (2008). IEA Work for the G8.
- IEA. (2008). Now or never – IEA energy technology perspectives shows pathways.
- IEA. Bioenergy (2010). Technology roadmaps: International Energy Agency (IEA).
- IEA-IOES (2009). Ocean Energy Systems.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2007). Biomasa, digestores anaerobios.
- IPCC-WGIII (2001). In: Climate Change.
- Islas J., Manzini F., Martínez M.(2004). CO2 mitigation costs for new renewable energy capacity in the Mexican electricity.
- Izquierdo U., Barrio V.L, Cambra J.F., Cambra M.B., Requies J., Güemez M.B., Arias P.L., Kolb G., Zapf R., Gutierréz A.M., Arraibi J.R. (2012). Hydrogen production from methane and natural gas steam reforming conventional and microreactor system.
- J.J. Chew, V. Doshi (2011). Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology.
- Jaramillo Salgado Óscar A. y Borjas Díaz Marco A. (2010). Energía del viento.
- Karkania V, Fanara E, Zabaniotou A (2012). Review of sustainable biomass pellets production—a study for agricultural residues pellets' market in Greece.

- Khalid Azeem, Arshad Muhammad, Anjum Muzammil, Mahmood Tariq, Dawson Lorna (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste.
- Kim J, Park C, Kim T.H., Lee M, Kim S, Kim S.W, Lee J, (2003). Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge.
- Klass DL (1998). Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals.
- Klug, Michael (2012). Pirolisis un proceso para derretir la biomasa.
- KMEC Engineering Henan Kingman (2014). Guía para diseñar procesos de secado de biomasa.
- Komiyama M., Misonou T., Takeuchi S., Umetsu K., Takahashi J. (2006). Biogas as a reproducible energy source: Its steam reforming for electricity generation and for farm machine fuel.
- Komor, P., Bazilian, M., (2005). Renewable energy policy goals, programs, and technologies.
- Kumar A, Jones DD, Hanna MA (2009). Thermo chemical biomass gasification: a review of the current status of the technology.
- Lansing S, Martin JF, Botero Botero R, Nogueira da Silva T, Dias da Silva E (2010). Waste water transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters.
- Larson ED, Jin H, Celik FE (2009). Large-scale gasification - based co production of fuels and electricity from switch grass. Bio fuels, Bio products and Biorefining
- Lasse Rosendahl (2013). Biomass combustion science, technology and engineering.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosys-tems—a review.
- Leone P., Lanzini A., Santaarelli M., Calí M., Sagnelli F., Boulanger A., Scaletta A., Zitella P. (2010). Methane-free biogas for direct feeding of solid oxide fuel cells.
- Lokey Elizabeth (2009). Barriers to clean development mechanism renewable energy projects in Mexico.

- Longo A., Markandya A., Petrucci M. (2008). The internalization of externalities in the production of electricity: willingness to pay for the attributes of a policy for renewable energy.
- López Eva Y Sebastián Nogués Fernando (2010). Energías renovables. Energía de la biomasa.
- López Mendoza Claudia y López Solís Omar (2009). Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Veracruzana.
- Luecke, A., (2011). Renewable energy best practices in promotion and use for Latin America and the Caribbean.
- Lund, J. W., Freeston D. H. y Boyd T. L. (2005). Worldwide direct-uses of geothermal energy 2005.
- Mackie KL, Brownell HH, West KL, Saddler JN (1985) Effect of sulphur dioxide and sulphuric acid on steam explosion of aspen wood.
- Manahan SE (2000). Fundamentals of environmental chemistry.
- Manwell J. F., J. G. Mc Gowan y A. L. Rogers (2002). Wind energy explained.
- Manzano-Agugliario F., Alcayde A., Montoya F.G., Zapata-Sierra A., Gil C. (2013). Scientific production of renewable energies worldwide: an overview.
- Manzano-Agugliario F., Hernandez-Escobedo Q., Zapata-Sierra A. (2010). Use of bovine manure for ex situ bioremediation of diesel contaminated soils in Mexico.
- Manzano-Agugliario F., Sanchez-Muros MJ., Barroso FG., Martínez-Sánchez A., Rojo S., Pérez-Bañón C. (2012). Insects for biodiesel production.
- Manzini F., J. Islas, Martinez M.(2001). Reduction of greenhouse gases using renewable energies in Mexico 2025.
- Manzini F., J. Islas, Martinez M.(2004). CO2 mitigation costs for new renewable energy capacity in the Mexican electricity sector.
- Martí Herrero Jaime (2008). Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación.

- Martinot, E., Dienst, C., Weiliang, L., Qimin, C., (2007). Renewable Energy Futures: Targets, Scenarios, and Pathways.
- Masek O, Budarin V, Gronnow M, Crombie K, Brownsort P, Fitzpatrick E, (2013). Micro wave and slow pyrolysis biochar—comparison of physical and functional properties.
- Massachusetts Institute of Technology (2006). “The future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century.
- Mc Kendry P (2002). Energy production from biomass (part1): overview of biomass.
- McKendry P. (2002). Energy production from biomass (part3): gasification technologies.
- Menegaki Angeliki N. (2013). Growth and renewable energy in Europe: Benchmarking with data envelopment analysis.
- Mes-Hartree M, Dale BE, Craig WK (1988). Comparison of steam and ammonia pretreatment for enzymatic hydrolysis of cellulose.
- Míguez JL, Morán JC, Granada E, Porteiro J. Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:3867–75.
- Mohan D, Pittman CU, Steele PH (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review.
- Moller HB, Sommer SG, Ahring BK (2004). Biological degradation and greenhouse gas emissions during pre-storage of liquid animal manure.
- Moller HB, Sommer SG, Ahring BK (2005). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass Bioenergy*.
- Mosier N, Wyman C, Dale B, Elander R, Lee YY, Holtzapple M (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass.
- Mourelatos D, Assimacopoulos L, Papagiannakis A, Zervos A. Large-scale integration of renewable energy sources an action plan for Crete. *Energy*.
- Mundo-Hernández Julia, de Celis Alonso Benito, Hernández-Álvarez Julia, de Celis-Carrillo Benito (2011). An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany.

- Muradov Nazim, Smith Franklyn, T-Raissi Ali (2008). Hydrogen production by catalytic possessing renewable methane rich gases.
- "Nielsen H.A., Nielsen T.S., Madsen H., M.J.S.I. (2007). Pin dado optimal combination of wind power forecasts Wind Energy.
- Nobusuke Kobayashi, Linag, Shih Fan (2011). Biomass direct chemical looping process: A perspective.
- OCEANA, Reportaje de las energías renovables marinas s.f. recuperado el 23 de abril de 2014 documento en línea: <http://oceana.org/es/eu/prensa-e-informes/reportajes/las-energias-renovables-marinas>.
- Olaya Arboleda Yeison y González Salcedo Luís Octavio (2009). Fundamento para el diseño de biodigestores.
- Olaya Y. (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija.
- OVAM (Open bare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij) (2010). Inventarisatie biomass 2007–2008.
- Owens JM, Chynoweth DP (1993). Biochemical methane potential of municipal solid waste (MSW) components.
- Panwar N.L., Kothari Richa, Tyagi V.V. (2012). Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes.
- Panwar NL., Kaushik SC, Kothari S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection a review.
- Parker D (2008). 90% renewable energy target is achievable.
- Pedraza G, Chará J., Conde N., Giraldo S, Giraldo L, (2002). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino.
- Pérez Medel Javier Andrés (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para la aplicación en pequeños ganaderos y lecheros.
- Perez-Moreno L., Soler J., Herguido J., Menéndez M. (2013). Stable hydrogen production by methane steam reforming in a two zone fluidized bed reactor: Experimental assessment.
- Phanphanich M, Mani S (2010). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass.

- Pimchuai A, Dutta A, Basu P (2010). Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties.
- Pirólisis (s.f.). SEDESOL.
- Popp, D., (2010). NBER Working Paper Series: Innovation and Climate Policy.
- Pounyapor Aunsup, Yaneeporn Patcharavorachot, Suttichai Assabumrungrat, Amornchai Arpornwichanop (2011). Comparison of different hydrogen production processes from biogas: thermodynamic analysis.
- Prins MJ, Ptasinski KJ, Janssen FJJG (2006). More efficient biomass gasification via torrefaction.
- PTME, Energía de las corrientes marinas, 2010 recuperado el 23 de abril de 2014 documento en línea: <http://www.ptmaritima.org/renovables/desarrollo.asp?apartado=14>
- Ramírez Ana María, Sebastián P.J., Gamboa S.S. , Rivera M.A., Cuevas O. , Campos J. (2000). A documented analysis of renewable energy related research and development in Mexico.
- Ramón, J.A., Romero L.F., Simanca J.L., (2006). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo.
- Ramón, JA (2003). Manual para la producción de biogás.
- Rapp Bárbara, Bremer Jorg, Sonnenschein Michael (2010). Simulating the transport performance of online traded biomass.
- Reed Czitrom Steven Peter, Trelles Sergio Armando e Hiriart Gerardo (2010). Energía del Agua.
- REN21 (2010). Renewables 2010 global status report Paris: REN21 Secretariat.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2009.
- Reporte Mundial de la Energía Eólica (2009). Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA).
- Reshamwala S, Shawky BT, Dale BE (1995). Ethanol production from enzymatic hydrolysates of AFEX-treated coastal.

- Ress BB, Calvert PP, Pettigrew CA, Barlaz MA (1998). Testing anaerobic biodegradability of polymers in a laboratory-scale simulated landfill.
- Revista AgroWaste (2013). Pirólisis.
- Robles-Gil S. (2001). Información climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa.
- Rosillo-Calle F (2007). Biomass assessment handbook – bioenergy for a sustainable environment.
- Ruiz G. Rosaura (2010). Revista de la academia de ciencias UNAM.
- "Salazar Cuaila Jean Lui, Amusquivar Coaquira Cristian, Llave Pérez Juan José, Rivasplata Cabanillas César (2012). Producción de biogás y bioetanol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna.
- Sánchez Riaño, Gutiérrez Morales, Muñoz Hernández, J. A. y Rivera Barrero (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos.
- Santoyo Édgar y Barragán-Reyes Rosa María (2010). Energía Geotérmica.
- Sebitosi AB, y Pillay P. (2008). Renewable energy and the environment in South Africa: a way forward.
- Secretaria de Energía, SENER. (2010).
- "SENER, GTZ. (2009). Renewable energies for sustainable development in Mexico.
- Sensöz S, Can M (2002). Effect of pyrolysis temperature and heating rate on the product yields.
- Singh J, Gu S (2010). Biomass conversion to energy in India-a critique.
- Sitorusa Berlian, Sukandar, Panjaitan Seno D. (2013). Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes.
- Soria F. M.D.J., Ferrera-Cerrato, R., Etchevers B. J., Alcántar G., G., Santos, J.T., Borges G. L. Pereyda P. G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo.
- Sun Y y Cheng J (2002) Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review.

- Suopajärvi Hannu, Pongrácz Eva, Fabritius Timo (2013). The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermo chemical conversion technologies and assessments related to sustainability.
- Surendra K.C., Takara Devin, Hashimoto Andrew G., Kumar Khanal Samir (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: opportunities and challenges.
- Swain PK, Das LM, Naik SN (2011). Biomass to liquid prospective challenge to research and development in 21 st century.
- Syred C, Griffiths AJ, Syred N, Beedie D, James D (2006). A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP).
- Textos científicos (2014). Factores que afectan la producción de gas.
- Tijmensen MJA, Faaij APC, Hamelinck CN, van Hardeveld MRM (2002). Exploration of the possibilities for production of Fischer–Tropsch liquids and power via biomass gasification.
- Tolón-Becerra A., Lastra-Bravo X ., Bienvenido-Bárcena F . (2011). Proposal for territorial distribution of the EU 2020 political renewable energy goal.
- Torres D. M., FOLLARI J. (sf). Un biodigestor de boñigas de cabra calefaccionado con colectores planos.
- Trane R., Dahl S., Skoth-Rasmussen M.S., Jensen A.D. (2012). Catalytic steam reforming of bio-oil.
- Turbina francis (2002). Documento en línea: <http://www.global-hydro.eu/es/tecnologia/turbinas-francis/> referenciar se sacó imagen
- Turbinas (s.f.). Documento en línea: <http://www.exatecno.net/>
- Turn S, Kinoshita C, Zhang Z, Ishimura D, Zhou J (1998). An experimental investigation of hydrogen production from biomass gasification.
- Twidell J, Weir T (2005). Biomass and biofuels. In: Renewable energy resources.
- UBET Unified Bioenergy Terminology (2004). Food and Agricultural Organization of the United Nations
- Uemura Y, Omar WN, Tsutsui T, Yusup SB (2011). Torrefaction of oil palm wastes.

- UNEP (2010). Global trends in renewable energy investment.
- Van der Drift A, Boerrigter H, Coda B, Cieplik MK, Hemmes K (2004). Entrained-flow gasification of biomass. ash behavior, feeding issues, system analyses.
- Vargas L. L. (1992). Los biodigestores, alternativa de tratamiento para residuos pecuarios.
- Vargas P, M.A. (2006). Introducción a las energías alternativas con experimentos sencillos.
- Varnero Moreno Maria Teresa (2011). Manual del biogás
- Varun SK, Singal. (2007). Review of augmentation of energy needs using renewable energy sources in India.
- Vaskiluodon Voima (2013). Biomass gasification plant to operate at full power.
- Verbruggen Aviel, Fishedick, Manfred, Moomaw William, Weir Tony, Nadai Alain, Nilsson Lars J., Nyboer John, Sathaye Jayant (2010). Renewable energy costs, potentials, barriers: Conceptual issues.
- Vidal PF y Molinier J (1988) Ozonolysis of lignin, improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust.
- Vlasenko EY, Ding H, Labavitch JM, Shoemaker SP (1997). Enzymatic hydrolysis of pretreated rice straw.
- Wang G, Luo Y, Deng J, Kuang J, Zhang Y (2011). Pretreatment of biomass by torrefaction.
- Wannapeera J, Fungtammasan B, Worasuwanarak N (2011). Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass.
- Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, Jones DL (2008). Review: optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources.
- Weaver M (2011). Generation of renewable heat and sustainable bio-based products from biomass.
- Wei-Hsin Chen, Mu-Rong Lin, Tzong-Shyng Leu, Shan-Wen Du (2011). An evaluation of hydrogen production from the perspective of using blast furnace gas and coke oven gas as feed stocks.

- WWS Charters Developing markets for renewable energy technologies (2001). Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Yank L, Martina P, Corace J, Aeberhard A (s.f.). Construcción de un biodigestor pequeño para su uso en investigación y docencia.
- Zhang W (2010). Automotive fuels from biomass via gasification.
- Zhou J, Chen Q, Zhao H, Cao X, Mei Q, Luo Z (2009). Biomass-oxygen gasification in a high-temperature entrained-flow gasifier.
- Zoellner J., Schweizer-Ries P., Wemheuer C. (2008). Public acceptance of renewable energies: results from case studies in Germany.
- Zografakis N, Sifaki E, Pagalou M, Nikitaki G, Psarakis V, Tsagarakis KP (2010). Assessment of public acceptance and willingness to pay for renewable energy sources in Crete.

4.1 Referencias de imágenes.

- Fig 1.1 Manzano--Agugliario F., Alcayde F. G., Montoya A., Zapata-Sierra, Gil C. (2013), Scientific production of renewable energies world wide: an overview.
- Fig. 1.2 Cancino-Solórzano Y., Villicaña-Ortiz E., Gutiérrez-Trashorras A. J., Xiberta-Bernat J. (2010), Electricity sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable energy sources.
- Fig. 1.3 Cancino-Solórzano Y., Villicaña-Ortiz E., Gutiérrez-Trashorras A. J., Xiberta-Bernat J. (2010), Electricity sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable energy sources.
- Fig. 1.4 Cancino-Solórzano Y., Villicaña-Ortiz E., Gutiérrez-Trashorras A. J., Xiberta-Bernat J. (2010), Electricity sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable energy sources.
- Fig. 1.5 Jaramillo Salgado O. A. y Borjas Díaz M.A., (2010), Energía del viento.
- Fig 1.6 Cancino-Solórzano Y., Gutiérrez-Trashorras A.J., Xiberta-Bernat J., (2011), Current state of wind energy in Mexico, achievements and perspectives.
- Fig. 1.7 Jaramillo Salgado O. A. y Borjas Díaz M.A., (2010), Energía del viento.

- Fig. 1.8 Jaramillo Salgado O. A. y Borjas Díaz M.A., (2010), Energía del viento.
- Fig. 1.9 Hernández-Escobedo Q., Mnazano-Agugliaro F., Zapata-Sierra A. (2010), The wind power of Mexico.
- Fig. 1.10 Hernández-Escobedo Q., Mnazano-Agugliaro F., Zapata-Sierra A. (2010), The wind power of Mexico.
- Fig. 1.11 Hernández-Escobedo Q., Mnazano-Agugliaro F., Zapata-Sierra A. (2010), The wind power of Mexico.
- Fig. 1.12 Arancibia Bulnes C. y Best y Brown R., (2010), Energías alternativas.
- Fig 1.13 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, (2011), Renewable Energies. Perspective for a Sustainable Energy Future.
- Fig. 1.14 Arancibia Bulnes C. y Best y Brown R., (2010), Energías alternativas.
- Fig 1.15 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, (2011), Renewable Energies. Perspective for a Sustainable Energy Future.
- Fig 1.16 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, (2011), Renewable Energies. Perspective for a Sustainable Energy Future.
- Fig 1.17 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, (2011), Renewable Energies. Perspective for a Sustainable Energy Future.
- Fig. 1.18 Arancibia Bulnes C. y Best y Brown R., (2010), Energías alternativas.
- Fig. 1.19 Arancibia Bulnes C. y Best y Brown R., (2010), Energías alternativas.
- Fig. 1.20 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2007). Biomasa, digestores anaerobios.
- Fig. 1.21 Reed Czitrom S. P., Trelles S.A. y Hiriart G.,(2010), Energía del Agua.

- Fig. 1.22 Turbina Kaplan (s.f), recuperado el 18 de Febrero de 2014, de <http://www.exatecno.net/ampliacion/energia/TurbinaKaplan.htm> Solo se saco imagen.
- Fig. 1.23 Turbina Francis de Global Hydro (s.f) recuperado el 18 de Febrero de 2014, de <http://www.global-hydro.eu/es/tecnologia/turbinas-francis/>.
- Fig. 1.24 Faeich (2011), Turbina Pelton. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014 de <https://faeitch2011.wordpress.com/unidad-2-turbinas-hidroelectricas/2-turbina-pelton/>
- Fig. 1.25 Energía de las mareas (s.f), recuperado el 3 de Marzo de 2014, de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo23.pdf>
- Fig. 1.26 Energía de las mareas (s.f), recuperado el 3 de Marzo de 2014, de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo23.pdf>.
- Fig. 1.27 Energía de las mareas (s.f), recuperado el 3 de Marzo de 2014, de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo23.pdf>.
- Fig. 1.28 Energía de las mareas (s.f), recuperado el 3 de Marzo de 2014, de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo23.pdf>
- Fig 1.29 Cruz, J., (2008), Ocean wave energy, current status and future perspectives, Springer.
- Fig. 1.30 Bienes Comunes A. C., (2012), ¿Qué es la energía Undomotriz?, recuperado el 10 de Marzo de 2014, de <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/12/que-es-la-energia-undimotriz/>
- Fig 1.31 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, (2011), Renewable Energies. Perspective for a Sustainable Energy Future.
- Fig 1.32 IEA-IOES (2009). “Ocean Energy Systems”.
- Fig 1.33 SENER, GTZ. (2009). Renewable energies for sustainable development in Mexico.
- Fig. 1.34 Santoyo E. y Barragán-Reyes R.M., (2010), Energía Geotérmica.

- Fig. 1.35 Santoyo E. y Barragán-Reyes R.M., (2010), Energía Geotérmica.
- Fig. 1.36 Santoyo E. y Barragán-Reyes R.M., (2010), Energía Geotérmica.
- Fig. 1.37 Santoyo E. y Barragán-Reyes R.M., (2010), Energía Geotérmica.
- Fig 1.38 Hiriart G., Gutiérrez-Negrín L.C.A., (2003), Main aspects of geothermal energy in Mexico.
- Fig 2.1 Pach M, Zanzi R, Bjornbom E (2002).Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal.
- Fig. 2.2 FOCER (Fortalecimiento de capacidad de energía renovable para América Central) (2002). Manual sobre energía renovable: biomasa
- Fig. 2.3 FOCER (Fortalecimiento de capacidad de energía renovable para América Central) (2002). Manual sobre energía renovable: biomasa.
- Fig. 2.4 Chen W-H, Cheng W-Y, Lu K-M, Huang Y-P (2011). An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction.
- Fig. 2.5 López Eva Y Sebastián Nogués Fernando (2010). Energías renovables. Energía de la biomasa.
- Fig 2.6 Brown TR, Wright MM, Brown RC (2011). Estimating profitability of two biochar production scenarios: slow pyrolysis vs.fast pyrolysis. Biofuels, Bioproducts and Biorefining.
- Fig 2.7 van der Meijden CM, Veringa HJ. Rabou LPLM (2010). The production of synthetic naturalgas (SNG): a comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency.
- Fig. 2.8 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2007). Biomasa, digestores anaerobios.
- Fig. 2.9 Varnero Moreno María Teresa (2011). Manual del biogás
- Fig. 3.1 Robles-Gil S. (2001). Información climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa.
- Fig. 3.2 Robles-Gil S. (2001). Información climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa.

- Fig. 3.3 Soria F. M.D.J., Ferrera-Cerrato, R., Etchevers B. J., Alcántar G., G., Santos, J.T., Borges G. L. Pereyda P. G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo.
- Fig. 3.4 Olade (2011). Manual del biogás.
- Fig. 3.5 Biodisol (2014). Tecnologías de producción de biogás.
- Fig. 3.6 Biodisol (2014). Tecnologías de producción de biogás.
- Fig. 3.7 Biodisol (2014). Tecnologías de producción de biogás.
- Fig. 3.8 Biodisol (2014). Tecnologías de producción de biogás.
- Fig. 3.9 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), (2007).

Glosario

Desarrollo sostenible: es aquél desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones

Bioenergía: Es la energía obtenida a partir de la biomasa, en otras palabras es la materia constituida por los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos.

Celulosa: Celulosa es la principal componente de las paredes celulares de los árboles y otras plantas. Es una fibra vegetal que al ser observada en el microscopio es similar a un cabello humano, cuya longitud y espesor varía según el tipo de árbol o planta.

Petroquímica: La Petroquímica es aquella rama de la química que en forma de industria explota, refina y produce todos los derivados del petróleo y el gas natural.

Nafta: Líquido incoloro, volátil, más ligero que el agua y muy combustible, que se utiliza como disolvente industrial, es una fracción ligera del petróleo natural que se obtiene en la destilación de la gasolina como una parte de esta.

Anemómetros: Instrumento utilizado para medir la velocidad del viento (fuerza del viento).

Helióstatos: Son espejos planos que se mueven continuamente para dirigir el reflejo solar hacia la torre, y cuyos tamaños máximos llegan a ser de alrededor de 120 metros cuadrados.

Boya: Cuerpo flotante sujeto al fondo del mar, de un lago, de un río, etc., que se coloca como señal, y especialmente para indicar un sitio peligroso o un objeto sumergido.

Fenómeno de la ósmosis: Paso de disolvente pero no de soluto entre dos disoluciones de distinta concentración separadas por una membrana semipermeable.

Biocombustibles: son los obtenidos a partir de la biomasa y pueden ser o no transformados o procesados.

Torrefacion: Torrefacción de la biomasa técnicamente se refiere a un proceso de tostado en el que se calienta la biomasa, o piroliza, en un ambiente libre de oxígeno.

Biosólidos: Sólidos remanentes generados a partir de un tratamiento de agua residual.

Ácidos grasos: Los ácidos grasos son ácidos orgánicos monoenoicos, que se encuentran presentes en las grasas, raramente libres, y casi siempre esterificando al glicerol y eventualmente a otros alcoholes.

Proceso transesterificación: La transesterificación es un proceso químico a través del cual aceites se combinan con alcohol (etanol o metanol) para generar una reacción que produce ésteres grasos como el etil o metilo ester.