



**PROPUESTA DEL USO DE LA BIOMASA COMO
COMBUSTIBLE PARA CENTRALES
TERMOELÉCTRICAS**

TESIS

**Para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta

Omar Benítez Abarca

Asesor

Dr. Gilberto González Ávalos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Junio del 2008

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por confiar siempre en mí, en especial a mis padres por haberme dado la vida y mantenerme todos estos años dándome su amor y paciencia, a mis hermanos por ser mis compañeros inseparables y a mis abuelos por siempre haberme dado cariño incondicional.

Agradezco a todos mis maestros de la facultad por haberme instruido en esta hermosa carrera, a todos y cada uno de ellos que me dieron sus consejos durante el transcurso de esta etapa de mi vida.

A mis compañeros y amigos que tuve la suerte de conocer en esta etapa, ya que con ellos pase momentos complicados y también felices y alegres y los cuales me ayudaron a hacer mas amena mi carrera.

Agradezco especialmente a mi asesor el Dr. Gilberto González Ávalos por su ayuda y apoyo en este trabajo, pues sin sus consejos no hubiese podido concluir mi investigación.

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico en primer lugar a mis padres, Salvador Benítez Contreras ya que gracias a su apoyo tanto económico como moral y a su amor pude terminar mi carrera y a Ma. Del Rosario Abarca Jasso que con su apoyo moral, consejos y amor siempre pude salir delante de cualquier situación.

A mis hermanos por ser mis compañeros de juegos, de cariño y de vida, por siempre hacerme sentir importante al ser su ejemplo a seguir y por que sin ellos mi vida hubiera sido vacía y aburrida.

A mi familia que sin su apoyo, comprensión y consejos no hubiera tomado decisiones importantes ni me hubiera sentido tan querido.

Resumen

La biomasa es la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica; esa energía la podemos recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles.

En la actualidad el uso de combustibles fósiles es más limitado y caro debido a su escasez es por ello que en esta tesis se propone el uso de la biomasa para uso en centrales termoeléctricas y así generar la energía necesaria. La biomasa al igual que otras fuentes de energía es renovable, relativamente limpia y eficiente, por lo que su uso es una vía alterna para usar como combustible en centrales.

En esta tesis se hace un estudio de una central que utiliza dos formas diferentes de usar la energía que proporciona la biomasa, una de ellas es por medio de la combustión directa de desechos orgánicos de diferentes cultivos (maíz, caña, trigo, arroz, etc.) o de diferentes plantas y árboles (aserrín, madera, etc.) y otra opción es generando biogas por medio de digestores, en los cuales al proporcionarles desechos orgánicos de plantas y animales (excremento) las bacterias los descomponen produciendo gas metano.

La presente tesis aborda también la factibilidad de un tipo de centrales como esta y a su vez proporciona una comparación con otras centrales para observar cual es la mas adecuada para generar energía eléctrica, sus ventajas, desventajas y sus costos.

Contenido

Agradecimientos	2
Dedicatoria	3
Resumen	4
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	8
Lista de Símbolos y Abreviaciones	8

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes, Descripción	10
1.2. Objetivos de la Tesis	11
1.3. Justificación	11
1.4. Metodología	11
1.3. Descripción de los Capítulos	12

Capítulo 2. Antecedentes 13

2.1. Fuentes de Biomasa	15
2.2. Algunas características de la biomasa	18
2.3. Aplicaciones de la biomasa	21
2.4. Conversión de biomasa en energía	22
2.5. ¿Cómo es una central de biomasa?	25
2.6. Combustión y emisiones	27
2.7. Aplicaciones de la biomasa	28
2.8. Contexto mundial	32
2.9. Contexto nacional	34
2.10. Importancia de la generación eléctrica a partir de biomasa para la energización rural biomasa?	40

Capítulo 3. ANÁLISIS Y PROPUESTA DE UNA CENTRAL

TERMOELÉCTRICA USANDO BIOMASA 42

3.1. Funcionamiento de una central termoeléctrica	42
3.1.1. Generadores eléctricos	43

3.1.2.	Generadores síncronos	44
3.2	Análisis de una central termoeléctrica con ciclo Rankine	46
3.3	Propuesta de una central termoeléctrica que usa biomasa	50
3.3.1.	Propuesta de una central termoeléctrica usando un biodigestor	50
3.3.1.1	Uso de biodigestores para la producción de biogás	52
3.3.2.	Propuesta de una central termoeléctrica de un ingenio azucarero	55
3.3.1.1	Parámetros de la propuesta	59

Capítulo 4. COMPARACIÓN Y VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIOMASA 61

4.1	Ventajas y desventajas de la introducción de la biomasa como fuente de energía	61
4.1.1.	Ventajas	61
4.1.2.	Ventajas ambientales del uso energético de la biomasa	62
4.1.3.	Ventajas socioeconómicas del uso energético de la biomasa	62
4.1.4.	Desventajas	63
4.2	Ventajas y desventajas de las Centrales térmicas de Biomasa	64
4.2.1.	Ventajas	64
4.2.2.	Desventajas	65
4.3	Comparación de las centrales termoeléctricas de biomasa contra las que usan otros combustibles	66
4.3.1.	Central térmica de biomasa comparada con una central solar ...	66
4.3.2.	Central térmica de biomasa comparada con una que utiliza carbón mineral	68
4.3.3.	Comparación entre una central eléctrica de biomasa usando biodigestor y una que utiliza bagazo de caña	70
4.4	Viabilidad de las propuestas de cogeneración de una central termoeléctrica con biomasa	70
4.5	Costos	71
4.5.1.	Costos de una central termoeléctrica	71
4.5.2.	Análisis de la rentabilidad	73

4.6	Lista de gestiones para desarrollar un proyecto de energía de la biomasa	74
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		76
5.1	Conclusiones	76
5.2	Recomendaciones	77
Referencias		78
Bibliografía		79

Lista de Figuras

2.1	Fotosíntesis	13
2.2	Origen de la biomasa	14
2.3	Distribución energética de un árbol	18
2.4	Ciclo del uso de Biomasa	21
2.5	Procesos de conversión de biomasa	23
2.6	Central de biomasa	26
2.7	Estufa de leña mejorada	29
2.8	Horno de cal en Centroamérica	30
2.9	Generación de gas metano por medio de café	31
3.1	Esquema de una central eléctrica	42
3.2	Campo magnético creado por un imán	43
3.3	Principio de un generador síncrono	44
3.4	Funcionamiento de una central eléctrica	46
3.5	Diagrama de una central eléctrica	47
3.6	Diagrama de una central eléctrica con generador de vapor auxiliar	49
3.7	Partes de un biodigestor	54
3.8	Ingenio Azucarero	60
4.1	Comparación entre dos centrales una que utiliza biomasa como combustible y otra con paneles solares	67

Lista de Tablas

2.1	Cantidad de biomasa de acuerdo a diversos usos de la tierra	15
2.2	Estados típicos de la biomasa	19
2.3	Procesos de conversión de biomasa en energía	25
2.4	Cantidad de biomasa de acuerdo a diversas coberturas en áreas bajo cultivo	32
2.5	Proyectos de investigación sobre digestores desarrollados en el IIE	36
3.1	Parámetros de operación de la propuesta	59
4.1	Poder calorífico de diferentes combustibles	69
4.2	Costos de elementos de una central termoeléctrica	72
4.3	Estimación esperada de venta de energía eléctrica de la central	73
4.4	Rentabilidad de una central termoeléctrica	75

Lista de Símbolos y Abreviaturas

K	kilo
M	mega
W	watts
m	metros
Wh	watt-hora
J	Joule
S	Entropía
h	Entalpía
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Agua
P	Presión
Q	Calor
Wt	Trabajo
n	Eficiencia
m	Flujo de vapor

CO ₂	Dióxido de carbono
N ₂ O	Óxido nitroso
CH ₄	Metano
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación
Semip	Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal
E.U.A	Estados Unidos de América
mbars	mili bars
KWt	Kilo Watts eléctricos
KWe	Kilo Watts térmicos
MXN	Moneda nacional
SO ₂	Dióxido de azufre
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
RD 2818/98	Real Decreto para co-generar en instalaciones con potencia igual o inferior a 50 MW

Capítulo 1

Introducción

En esta tesis se aborda el tema de la utilización de la biomasa para la generación de energía eléctrica, se decidió este tema por la importancia de utilizar combustibles alternos a los fósiles, que en la actualidad están escaseando. Por medio de la biomasa se obtiene también combustible barato y con los cuales daña mucho menos el medio ambiente además de que son muy pocas las centrales de energía eléctrica que utilizan este tipo de combustible. Con este trabajo se quiere hacer conciencia en las personas y a la vez informar de los beneficios de utilizar otras alternativas diferentes para la generación de energía eléctrica.

1.1 Antecedentes

En la actualidad se tiene muy pocos ejemplos de centrales que utilicen biomasa como combustible, un ejemplo de utilización de biomasa para combustible es en Andalucía España donde se produce biodiesel o en la comunidad cordobesa de El Tejar, España donde se utilizan residuos agrícolas para producir biomasa y por medio de este producen energía suficiente como para abastecer una ciudad de 200,000 habitantes.

En el caso de México se ha usado biomasa desde hace mucho tiempo en partes donde se tiene bajo nivel económico, estos utilizan leña que también se considera biomasa para algunas necesidades como por ejemplo calentar sus alimentos, o para calefacción, entre otras actividades.

Según la Comisión Reguladora de Energía (CRE) otorgó 313 permisos en abril 2005 para autoabastecimiento en diversos ingenios azucareros del país que les permite utilizar el bagazo de caña como energético primario para generar electricidad.

Existe también un proyecto en Monterrey que genera electricidad a partir del biogás concentrado en un relleno sanitario, del orden de los 7 MW.

1.2 Objetivo

El objetivo de la presente tesis es presentar las diferentes maneras en que se puede obtener biomasa y también el como aprovecharlas para la generación de electricidad pero centrándose en una central eléctrica que utilice este tipo de combustible, su mejoramiento y rendimiento de la central, así como dar a conocer este tipo de generación.

1.3 Justificación

En la actualidad se ha visto la necesidad de utilizar otros combustibles que sean más económicos, rindan más y a su vez no contaminen, todo esto debido al daño que han hecho los combustibles fósiles, a su costo elevado y a su escasez puesto que algunos países lo poseen y otros sólo lo importan, debido a esta situación es que muchas compañías, empresas, países y personas creen que el uso de energías renovables y no contaminantes entre ellas la biomasa es de uso urgente y por ello se hacen investigaciones sobre nuevas energías y el aprovechamiento y mejoramiento de las existentes.

La biomasa en este caso es una energía muy barata ya que se puede obtener de simples desechos, como madera, aserrín, excrementos de ganado, paja o también haciendo cultivos dedicados exclusivamente a la creación de combustible de biomasa, tal es el caso del arroz, trigo y maíz entre otros.

La biomasa es una fuente de energía no contaminante ya que no produce casi CO_2 comparado con otros combustibles como lo son los fósiles; además la biomasa es muy económica, si consideramos el hecho que viene de desechos que seguramente para cualquier persona solamente es un desperdicio inútil.

1.4 Metodología

Se realizó investigación utilizando libros especializados en el tema, artículos en Internet, investigación en CFE y cálculos para obtener datos utilizados en la investigación, se hicieron consultas en tesis anteriores para obtener información sobre algunos puntos, así como trabajos previos sobre la materia de centrales termoeléctricas para conocer fórmulas y métodos para la solución de las mismas y obtener datos necesarios que se requerían.

1.5 Contenido de la tesis

En el Capítulo 1 se da una introducción al tema, el por que de la elección, los objetivos de este, una justificación del uso de la biomasa y algunos antecedentes de la biomasa en el mundo y en nuestro país.

En el Capítulo 2 se dan antecedentes de centrales eléctricas que han usado y que usan en la actualidad la biomasa para la producción de energía, se abordan algunos ejemplos de estas centrales en cuanto a ubicación y capacidades de abastecimiento, y de su historia y el impacto que ha traído en la sociedad.

En el Capítulo 3 el tema a tratar es el de una propuesta de generación de energía eléctrica utilizando biomasa.

En el Capítulo 4 se presenta todo lo relacionado a ventajas, desventajas, la comparación con otro tipo de centrales termoeléctricas, los costos de una central de generación usando la biomasa y su viabilidad.

En el Capítulo 5 y último de esta tesis es exclusivamente para conclusiones y recomendaciones sobre la generación.

Capítulo 2

Antecedentes

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animales.

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. La energía química que se almacena en las plantas y los animales (que a su vez se alimentan de plantas u otros animales) o en los desechos que producen, se llama bioenergía, la cual se muestra químicamente en la Figura 2.1. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía a menudo en la forma de calor y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es la inversa de la fotosíntesis.

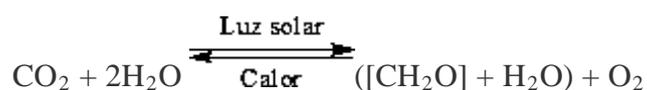


Figura 2.1 Fotosíntesis

Este proceso de captación de la energía solar y su acumulación en las plantas y árboles como energía química es un proceso bien conocido. Los carbohidratos, entre los que se encuentra la celulosa, constituyen los productos químicos primarios en el proceso de bioconversión de la energía solar y al formarse aquellos, cada átomo gramo de carbono absorbe 112kcal de energía solar, que es precisamente la que después se recupera, en parte con la combustión de la celulosa o de los combustibles obtenidos a partir de ella (gas, alcohol, etc.). En la Figura 2.2 se ilustra un diagrama del origen de la biomasa.

En la naturaleza, en última instancia toda la biomasa se descompone a sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una tasa más rápida. Por lo tanto, la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. Al utilizar esta energía recicla al carbón y no añade dióxido de carbono al medio ambiente, en contraste con los combustibles fósiles. De todas las fuentes renovables de energía, la biomasa se diferencia en que almacena energía solar con eficiencia. Además, es la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

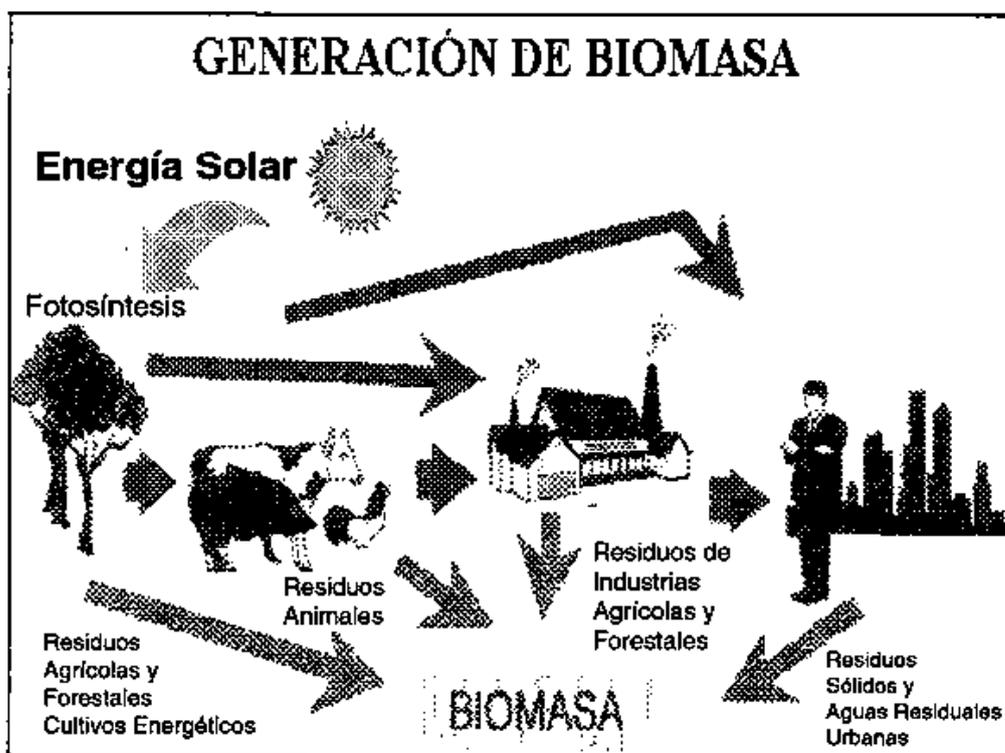


Figura 2.2 Origen de la biomasa

La biomasa puede utilizarse directamente (por ejemplo combustión de madera para la calefacción y cocinar) o indirectamente convirtiéndola en un combustible líquido o gaseoso (ejemplo: etanol a partir de cosechas del azúcar o biogás de la basura animal). La energía neta disponible en la biomasa por combustión es de alrededor de 8MJ/kg para la madera verde, 20MJ/kg para la materia vegetal seca en horno, 55MJ/kg para el metano; en comparación con cerca de 23 a 30MJ/kg para el carbón. La eficiencia del

proceso de la conversión se determina cuánto la energía real puede ser utilizada en forma práctica.

La biomasa como fuente de energía.

El uso cada vez mayor de energía procedente de combustibles fósiles, con el consiguiente agotamiento y alto costo, ha conducido a la obtención de nuevas fuentes de energía para el desarrollo económico mundial, en este contexto los recursos vegetales, residuos y productos procedentes de la silvicultura, sabanas, praderas y de la agricultura, son algunas de las principales fuentes de energía renovable que puede sustituir a la energía obtenida de los hidrocarburos, de acuerdo a datos proporcionados por el IIED y el Colegio de México, la biomasa acumulada y la producida cada año es como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Cantidad de biomasa de acuerdo a diversos usos de la tierra

Tipo de cobertura o uso de la tierra	% de biomasa
Areas forestales	92
Sabanas y praderas	4
Tierras cultivadas	1
Otros	3
Total	100

2.1 Fuentes de biomasa

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas, se usan, generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

Los residuos agrícolas, como la leña y el carbón vegetal, han sido usados en procesos tradicionales en los países en vías de desarrollo y a usos primarios en pequeña escala; por ejemplo, la cocción de alimentos o las pequeñas actividades productivas como panaderías, caleras, secado de granos, etc.

- **Plantaciones energéticas**

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos; además puede proveer otros beneficios a los agricultores. Una granja típica, usualmente, sólo genera uno o dos productos de mayor valor comercial como maíz, café, leche o carne. El ingreso neto de ello es, a menudo, vulnerable a las fluctuaciones del mercado, al aumento del costo en los insumos, a las variaciones climáticas y a otros factores. Dado que las plantas de generación de energía requieren un suministro estable de combustible, los cultivos asociados a ellas pueden proveer un ingreso permanente a los granjeros que decidan diversificar su producción.

La principal limitante para este tipo de plantaciones está en la escala, pues se requieren grandes extensiones de tierra para lograr una producción de energía rentable. Por esta razón, son factibles cuando se desarrollan con algún tipo de producción agrícola paralela, como por ejemplo, el maíz, la caña de azúcar y la palma de aceite.

- **Residuos forestales**

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el país. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor como se muestra en la figura 2.3, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa; en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

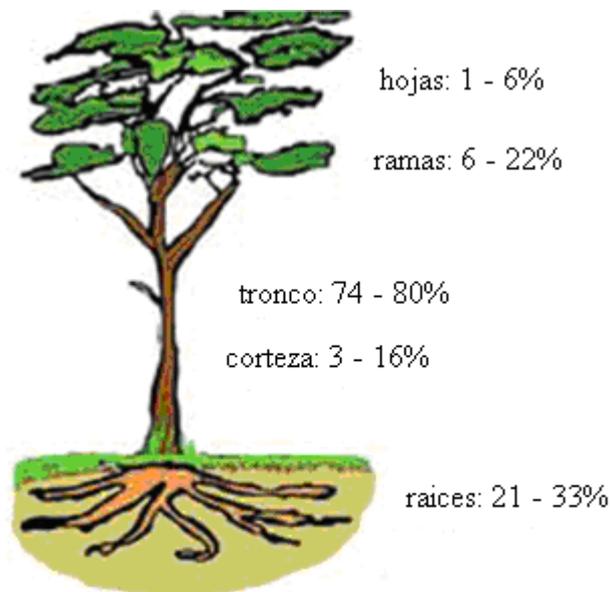


Figura 2.3 Distribución energética de un árbol

• Desechos agrícolas

La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60% y en desechos de proceso entre 20% y 40%.

Al igual que en la industria forestal muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo.

Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico: más del 50% del volumen total consumido.

Por otro lado las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en

los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobrefertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

- **Desechos industriales**

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

- **Desechos urbanos**

Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países latinoamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía “limpia”, es decir aquella energía que contamina menos comparada con las usadas actualmente.

En el corto y mediano plazo, la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de desechos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía.

2.2 Algunas características 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 caracterizan. Estos 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. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termoquímicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc.

El estado físico de la biomasa puede clasificarse según el tipo de recurso, como se indica en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Estados típicos de la biomasa

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.	Polvo, sólido, HR ² >50% Polvo sólido, HR 30 - 45% Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café). Estiércol. Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maíza, pastura.	Sólido, alto contenido humedad Polvo, HR < 25% Sólido, alto contenido humedad Sólido HR >55%
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales. Residuos de procesamiento de carnes. Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales. Grasas y aceites vegetales.	Sólido, humedad moderada Sólido, alto contenido humedad Líquido Líquido, grasoso
Residuos urbanos	Aguas negras. Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales). Basura orgánica (madera).	Líquido Sólido, alto contenido humedad Sólido a alto contenido humedad

- **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 (H.R.):** 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%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

- **Porcentaje de cenizas:** El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen 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 calórico 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.

- **Densidad aparente:** Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente, favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado materiales con baja densidad aparente necesitan algunas veces mayor volumen de almacenamiento y transporte, los cuales presentan problemas para fluir por gravedad lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.

- **Recolección, transporte y manejo:** Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructura 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. En la Figura 2.4 se muestra el ciclo de uso de biomasa.



Figura 2.4 Ciclo del uso de Biomasa

2.3 Aplicaciones de la Biomasa

Biocombustibles

La producción de biocombustibles tales como el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte. El uso extenso del etanol en Brasil ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente factibles en gran escala. La producción de biocombustibles en los E.U.A. y Europa (etanol y biodiesel) está aumentando, siendo la mayoría de los productos utilizados en combustible mezcla, por ejemplo E20 está compuesto por 20% de etanol y 80% de gasolina y se ha descubierto que es eficaz en la mayoría de los motores de ignición sin ninguna modificación. Actualmente la producción de biocombustibles es apoyada con incentivos del gobierno, pero en el futuro, con el crecimiento de los sembrados dedicados a la bioenergía, y las economías de la escala, las reducciones de costos pueden hacer competitivos a los biocombustibles.

Producción eléctrica

La electricidad puede ser generada a partir de un número de fuentes de biomasa y al ser una forma de energía renovable se le puede clasificar como "energía verde". La producción de electricidad a partir de fuentes renovables de biomasa no contribuye al efecto invernadero ya que el dióxido de carbono liberado por la biomasa cuando es quemado, (directa o indirectamente después de que se produzca un biocombustible) es igual al dióxido de carbono absorbido por el material de la biomasa durante su crecimiento.

Calor y Vapor

La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocinar, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado por la biomasa puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.

Gas Combustible

Los biogases producidos de la digestión o de la pirolisis anaerobia tienen un número de aplicaciones. Pueden ser utilizados en motores de combustión interna para accionar turbinas para la producción eléctrica, puede utilizarse para producir calor para necesidades comerciales y domésticas, y en vehículos especialmente modificados como un combustible.

2.4 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.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendro-energía y la cogeneración, en la figura 2.5 se resumen las formas de transformación de biomasa.

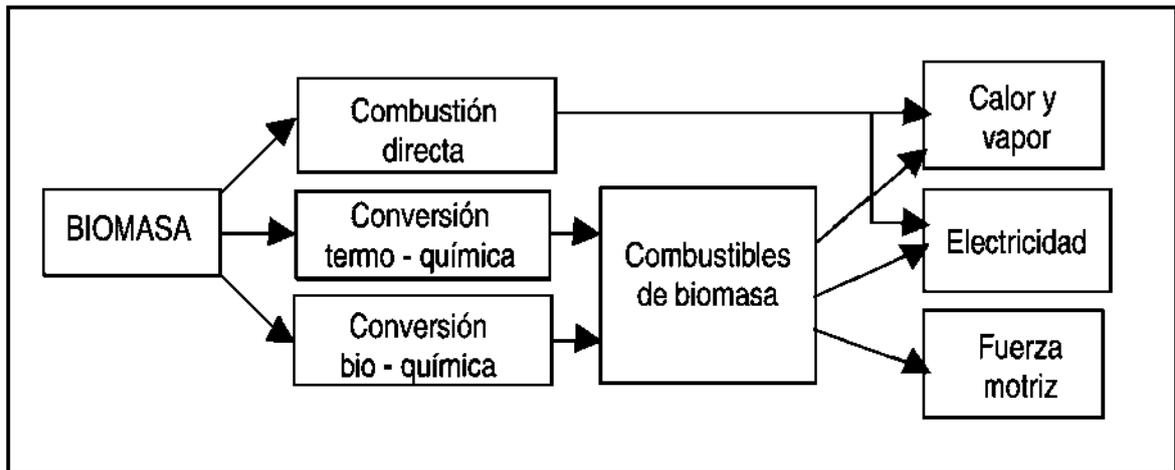
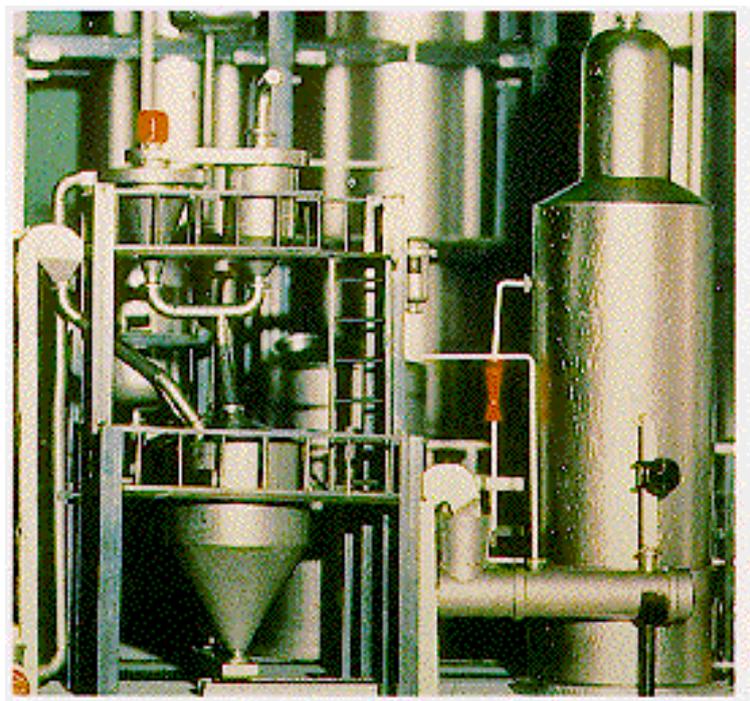


Figura 2.5 Procesos de conversión de biomasa

Métodos termoquímicos. Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y en particular, a los de la paja y de la madera.



La combustión: Oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.

La pirolisis: Combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 grados centígrados, se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Aparte de este, la pirolisis lleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de débil poder calórico, puede servir para accionar motores diesel, o para producir electricidad, o para mover vehículos. Una variante de la pirolisis, llamada pirolisis flash, llevada a 1000 grados centígrados en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirolisis. Las instalaciones en la que se realizan la pirolisis y la gasificación de la biomasa reciben el nombre de gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente como se indica antes, o bien servir la base para la síntesis de un alcohol muy importante, el metanol, que podría sustituir las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburo).

Gasificación: Es una de las tecnologías más avanzadas, y consiste en la utilización del gas combustible generado en una turbina de gas, donde se recupera el calor de los gases de salida para producir vapor y mover una turbina. El rendimiento de esta tecnología puede duplicar al de la combustión directa.

Métodos biológicos.

La fermentación alcohólica: Es una técnica empleada desde hace mucho tiempo con los azúcares, que puede utilizarse también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias. Pero la destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhidro, es una operación muy costosa en energía. En estas condiciones la transformación de la biomasa en etanol y después la utilización de este alcohol en motores de explosión, tienen un balance energético global dudoso. A pesar de esta reserva, ciertos países (Brasil, E.U.A.) tienen importantes proyectos de producción de etanol a partir de biomasa con un objetivo

energético (propulsión de vehículos; cuando el alcohol es puro o mezclado con gasolina, el carburante recibe el nombre de gasohol).

La fermentación metánica: Es la digestión anaerobia de la biomasa por bacteria. Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75% de humedad relativa). En los fermentadores o digestores, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico. El problema principal consiste en la necesidad de calentar el equipo para mantenerlo en una temperatura óptima de 30-35 grados centígrados. No obstante el empleo de digestores es un camino prometedor hacia la autonomía energética de las explotaciones agrícolas, por recuperación de las deyecciones y camas del ganado. Además, es una técnica de gran interés para los países en vías de desarrollo. Así, millones de digestores ya son utilizados por familias campesinas chinas. En la tabla 2.3 se resumen los procesos de conversión de biomasa en energía.

Tabla 2.3 Procesos de conversión de biomasa en energía

Tipo de biomasa	Características físicas	Procesos de conversión aplicables	Producto final	Usos
Materiales orgánicos de alto contenido de humedad.	Estiércoles. Residuos de alimentos. Efluentes industriales. Residuos urbanos.	Digestión anaeróbica y fermentación alcohólica.	Biogas. Metanol. Etanol. Bio diesel.	Motores de combustión. Turbinas 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 Turbinas de gas

2.5 ¿Cómo es una central de biomasa?

Una central de biomasa se ocupa de obtener energía eléctrica mediante los diferentes procesos de transformación de la materia orgánica.

Básicamente el funcionamiento de una central es el siguiente:

1. La biomasa recogida se prepara para transformarla en combustible líquido.

2. Este combustible se quema y se calienta agua.
3. Se produce vapor a alta presión que mueve la turbina y esta a su vez mueve el generador que producirá energía eléctrica.
4. La energía eléctrica producida es transportada por el tendido eléctrica.
5. El calor producido por el vapor se transmite en forma de agua caliente.

En la figura 2.6 se muestra el ejemplo de una central que usa biomasa, primero se recolecta el material biomásico, para después ser transportado a la central donde es preparado para ser utilizado y almacenado, después se utiliza como combustible para calentar agua que se convertirá en vapor, el cual servirá para mover una turbina acoplada a un generador el cual esta conectado a los transformadores que envían la energía a las subestaciones para su distribución a los usuarios.



Figura 2.6 Central de biomasa

En la figura 2.6 se muestran enumeradas las etapas de una central termoeléctrica que utiliza biomasa así como también se describen los procesos para conversión de la biomasa a energía eléctrica y están ordenados de la siguiente manera:

1) Cultivo y recolección de madera, 2) Transporte, 3) Astillado, 4) Preparación, 5) Almacenamiento de combustible grueso, 6) Almacenamiento de combustible fino, 7) Dosificador, 8) Entrada de aire, 9) Almacenamiento de combustible fino, 10) Caldera, 11) Economizador, 12) Cenizas, 13) Electrofiltro, 14) Tanque de agua de alimentación, 15) Tanque de condensado, 16) Generación de vapor, 17) Generador, 18) Turbina, 19) Transformadores, 20) Líneas de transporte de energía eléctrica

2.6 Combustión y emisiones

La biomasa consiste, principalmente, en carbono y oxígeno. También contiene hidrógeno, un poco de nitrógeno, azufre, ceniza y agua, dependiendo de la humedad relativa.

Cuando ésta se quema, se efectúa una reacción química que combina su carbono con oxígeno del ambiente, formándose dióxido de carbono (CO_2) y combinando el hidrógeno con oxígeno para formar vapor de agua. Cuando la combustión es completa, o sea la biomasa se quema totalmente, todo el carbón se transforma en CO_2 . Sin embargo, los árboles y plantas que están creciendo capturan nuevamente el CO_2 de la atmósfera y, al usar la biomasa en forma sostenible, en términos netos, no se agrega CO_2 a la atmósfera.

No obstante, cuando la combustión no es completa, se forman monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HCs, metano), N_2O y otros materiales. Estos sí pueden generar impactos serios en la salud de los usuarios. También son gases de efecto invernadero, por lo que se debería minimizar su formación.

Existen dos razones por las cuales la combustión de biomasa puede resultar incompleta: Cuando la entrada de aire no es adecuada, pues no hay suficiente oxígeno disponible para transformar todo el carbono en CO_2 . Esto puede ser causado por el diseño inadecuado del equipo, la falta de ventilación y la sobrecarga con el combustible.

Cuando la biomasa tiene una humedad alta, o sea está demasiado mojada; entonces, la temperatura de combustión no es suficientemente elevada como para completar las reacciones químicas.

2.7 Aplicaciones de la biomasa

Algunas aplicaciones donde se utiliza la biomasa son las siguientes:

- **Sector doméstico**

En México y Latinoamérica muchas familias utilizan leña u otras formas de biomasa para cocinar, particularmente en zonas rurales. Sus fuentes son los árboles alrededor de las viviendas, los campos agrícolas y los bosques. Además, en algunos lugares existe un mercado comercial, aunque informal, de leña, que constituye una fuente importante de ingresos para familias rurales.

Las estufas usadas para la cocción pueden ser fijas o portátiles y, a veces, tienen una chimenea.

Algunas familias hacen su propia estufa de materiales locales como se muestra en la Figura 2.7; otras buscan el servicio de un artesano, o la compran en el mercado. Generalmente, estas son simples y son de baja eficiencia. Además, emiten cantidades considerables de gases tóxicos que tienen un impacto en la salud del núcleo familiar.

Los procesos domésticos han sido muy ineficientes, pues han presentado pérdidas normales de energía entre 30% y 90% de la energía. Aunque los usuarios tratan de mejorar las estufas, por lo general carecen de los recursos financieros y técnicos para hacerlo considerablemente.

La baja calidad de estos aparatos produce emisiones de gases tóxicos como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y otros productos de la combustión incompleta. Estos causan problemas de salud como dolores de cabeza, enfermedades respiratorias, afectan los ojos de las mujeres embarazadas, etc. Las más afectadas son las mujeres y los niños, los cuales están expuestos a los gases durante varias horas al día.

Frecuentemente, los usuarios no son conscientes de ello y de la necesidad de buena ventilación; tampoco relacionan el humo como una causa de sus problemas de salud.



Figura 2.7 Estufa de leña mejorada

- **Sector comercial**

Muchos restaurantes y pequeños negocios, sobre todo en áreas rurales, utilizan leña para aplicaciones similares a las domésticas, por ejemplo, para preparación de comidas y panaderías. Los equipos, generalmente, son de mayor calidad que las estufas domésticas; sin embargo, aún se pueden mejorar, como la que se muestra en la Figura 2.8.

Por lo común, no hay información disponible sobre las cantidades de biomasa consumida por el sector comercial, ya que muchos negocios operan de manera informal. Se puede decir que, en comparación con el sector doméstico e industrial, el consumo es mucho menor; sin embargo, la biomasa es una fuente importante para este sector.

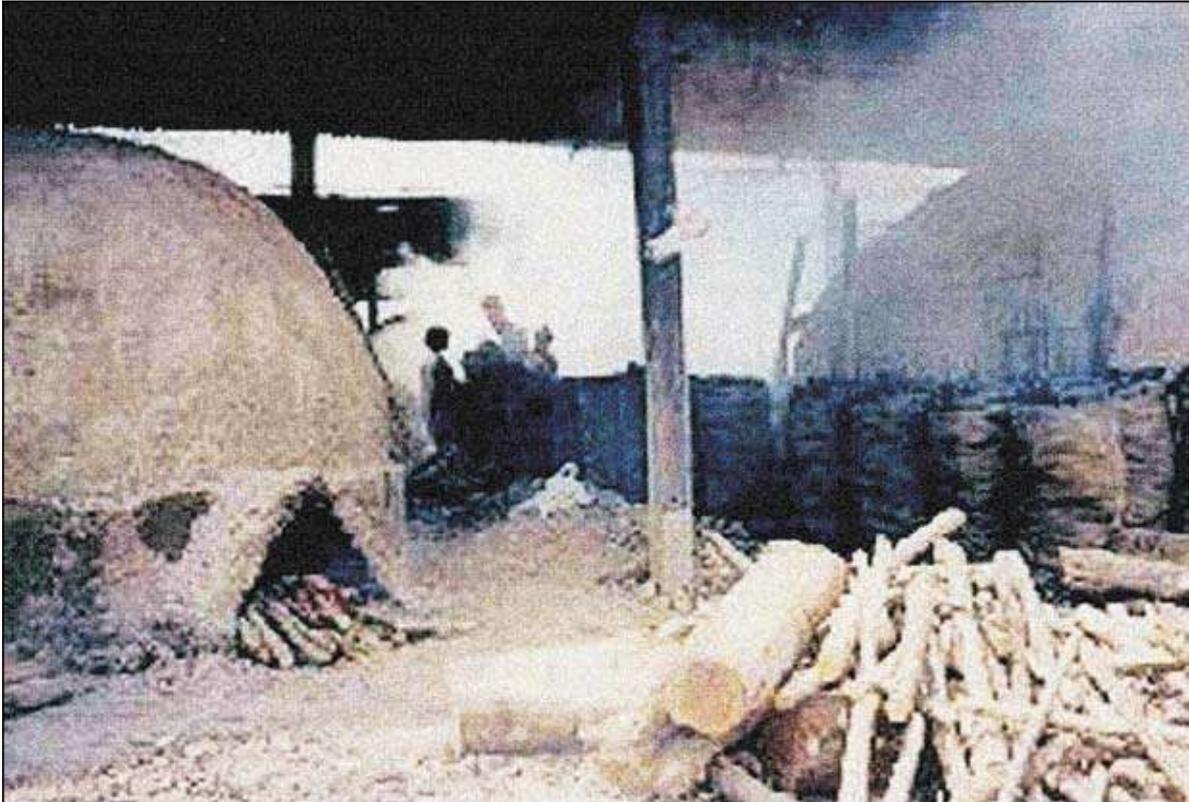


Figura 2.8 Horno de cal en Centroamérica

- **Industrias**

La biomasa es una fuente de energía importante para muchas industrias rurales en México; por ejemplo, para la fabricación de ladrillos y cal, y para el procesamiento de productos agrícolas. En comparación con el sector doméstico, su uso en el sector industrial es menor, pero todavía considerable. A continuación se mencionan las aplicaciones industriales más importantes:

Generación de calor: Particularmente en zonas rurales, varias industrias utilizan fuentes de biomasa para generar el calor requerido para procesos como el secado de productos agrícolas (café) y la producción de cal y ladrillos. En las pequeñas industrias, los procesos energéticos muchas veces son ineficientes debido a la baja calidad de los equipos y a procedimientos inadecuados de operación y mantenimiento.

Co-generación: Esta aplicación se refiere a la generación simultánea de calor y electricidad, lo cual resulta considerablemente más eficiente que los dos sistemas separados. Se utiliza con frecuencia en industrias que requieren de las dos formas de energía, como el procesamiento de café y azúcar. Su configuración depende de cuál es la forma de energía más importante; a veces se utilizan el calor y la electricidad en el

proceso de la planta industrial y se vende el excedente a otros usuarios o a la red eléctrica.

Generación eléctrica: En varios países industrializados se utiliza la biomasa, a gran escala, para la red eléctrica interconectada. También se usa en combinación con otras fuentes convencionales como el carbón mineral.

Hornos industriales: Los hornos de combustión directa están ampliamente difundidos en todas las operaciones agroindustriales. Básicamente consisten en una cámara de combustión en la que se quema la biomasa (leña, cascarilla de arroz o café, bagazo, cáscara coco, etc.), para luego usar el calor liberado en forma directa o indirecta (intercambiador de calor) en el secado de granos, madera o productos agrícolas. En la Figura 2.9 se muestra una instalación de este tipo.



Figura 2.9 Generación de gas metano por medio de café

- **Calderas:** Las calderas que operan con base en la combustión de biomasa (leña, aserrín, cascarilla de café, arroz, etc.) se usan en el secado de granos, madera y otros. Estos equipos están dotados de una cámara de combustión en su parte inferior (en el caso de las calderas a leña) en la que se quema el combustible; los gases de la combustión pasan a través del intercambiador de calor, transfiriéndolo al agua. En algunas calderas se usan inyectores especiales para alimentar biomasa en forma de polvo (aserrín, cáscara de grano, etc.), a veces, junto a algún otro tipo de combustible líquido (por ejemplo, búnker).

2.8 Contexto mundial

La biomasa es la fuente de energía más antigua utilizada por el hombre; no obstante, el estudio de la madera como combustible no llamó la atención de los investigadores, gobiernos y organismos de cooperación internacional si no hasta la década de los años 70 como resultado de la llamada crisis del petróleo. Los estudios realizados en los años posteriores mostraron que la biomasa constituye una de las principales fuentes de energía renovable, como se puede apreciar en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Cantidad de biomasa de acuerdo a diversas coberturas en áreas bajo cultivo

Tipo de cobertura	% de biomasa
Árboles y arbustos de cultivo	68,5
Sabanas y praderas	16,2
Tierras cultivadas	7,8
Desiertos y pantanos	7,5
Total	100,0

Se estima que casi el 6% de la energía consumida en el mundo proviene de la leña. De acuerdo con la FAO, en la década de los años 80, la mitad de la población del mundo dependía de este combustible para calentarse y para preparar sus alimentos, y en 45 países, con una población superior a 1 millón de habitantes presentaban déficit de leña. En estos países con déficit la vegetación se sobreexplota, se degrada al suelo, se acelera la desertificación y los recursos forestales dejan de tener un carácter renovable.

En los países subdesarrollados el 80% de la madera se destina a la producción de energía y el 20% de la energía consumida proviene de la biomasa, la cual de hecho es la cuarta fuente de energía, después del petróleo, gas y carbón mineral. En África, el 90% de la madera se destina a la generación de energía, la cual aporta más del 60% del consumo energético del subcontinente. En Asia el 20% de la energía consumida se obtiene a partir de madera, proporción que en algunas regiones sobrepobladas del sureste asiático podría ser más alta pero no existen suficientes recursos forestales para cubrir la demanda.

En América Latina, pese a que es una región con abundantes recursos energéticos fósiles, el consumo de biomasa como combustible es muy alto, principalmente en las regiones rurales. En América central se encuentran los países con mayor dependencia de la madera como combustible. En la región, aproximadamente, el 52% de la energía proviene de la leña y aproximadamente el 80% de la población depende de este energético como combustible doméstico. En Guatemala, Haití y Honduras dos tercios de la energía total se obtienen de la biomasa. En América del Sur, Brasil consume grandes cantidades de carbón vegetal; en 1990, este país utilizó 36 millones de m³ de carbón vegetal, de los cuales 18,6 millones se dedicaron a la industria siderúrgica, además, en la actualidad cuenta con importantes programas de sustitución de combustibles fósiles por combustibles derivados de la madera. Desde 1978 el aprovechamiento del bosque natural ha sido desplazado progresivamente por plantaciones forestales, las que en 1990 aportaron el 34% de carbón, consistente en 12,5 millones de m³ y podrían aportar hasta el 80% de la producción total.

Existen marcadas diferencias en cuanto a la forma de uso de la biomasa, ya que mientras en los países en vías de desarrollo tres cuartas partes de la madera empleada como combustible se destina a la preparación de alimentos y calefacción, en los países desarrollados tiene un papel cada vez más relevante en la producción de energía a gran escala. Con el uso de técnicas avanzadas tales como la producción de biogás y equipos de transformación modernos, la biomasa aporta el 4%, 16% y 10% de la energía primaria producida en los Estados Unidos, Suecia y Austria, respectivamente.

Con el conocimiento actual de los impactos negativos de la generación de energía a partir de biomasa y el desarrollo de los métodos de mitigación correspondientes desarrollados a la fecha, la biomasa se considera como una alternativa adecuada para la provisión sustentable de energía, de hecho para numerosos países de escasos recursos no será posible contar con una alternativa adecuada en los próximos 25 años. En el año 2050 la biomasa podría proporcionar el 17% de la energía eléctrica y el 38% de combustibles de uso directo, no obstante, al inicio del próximo siglo habrá un déficit estimado de 960 millones de m³ de leña.

2.9 Contexto nacional.

La biomasa es uno de los principales combustibles utilizados en México, cerca del 80% de la energía generada a partir de biomasa proviene de leña, la cual es el principal combustible doméstico en las áreas rurales y segundo después del gas en las áreas urbanas. La producción de leña es principalmente de autoconsumo ya que entre el 80 y el 96% de los consumidores recolectan su propia leña.

La leña se emplea en más de tres millones de viviendas, lo que representa una población superior a 18 millones de habitantes; en los municipios con altos índices de pobreza de los estados del sur del país, la proporción de hogares que emplean leña como combustible es superior al 60%.

De acuerdo con la información de los censos nacionales de población y vivienda, en las últimas décadas la población que consume leña disminuyó casi un 20%, sin embargo, en los próximos años la demanda continuará siendo alta.

El consumo anual de leña se estima en 22 millones de m³. En los estados de la región sur, Oaxaca, Guerrero y Chiapas el consumo es de los más altos del país, el cual es aproximadamente de 91 kg/mes/hab. (Semip energía rural en México).

Además de ser la fuente de energía más barata y al alcance de la población más pobre y marginada de las áreas rurales, la biomasa tiene gran importancia en el balance nacional de energía. En 1992 la energía primaria generada a partir de leña fue superior a la producida por medio de hidroeléctricas. La energía generada por leña y bagazo de caña representó 47,62 millones de barriles equivalentes de petróleo.

En 1992, de la energía primaria destinada directamente al consumo final el 68,6% se obtuvo de leña, 18,6% de bagazo de caña y 12,8% de gas natural; en el mismo año, se utilizaron 204 peta calorías en el sector residencial para cubrir la demanda de combustible doméstico, iluminación, calefacción, calentamiento de agua y alumbrado público, en este sector la leña aportó el 41,6% de la energía y el gas licuado el 39,5%.

El uso de leña en el país se realiza principalmente en fogones abiertos, en los cuales hay gran dispendio de energía. A nivel doméstico los fogones pueden tener una eficiencia cercana al 3% y de 27 a 30% en las estufas mejoradas para quemar carbón. No obstante

la aparente ventaja de utilizar carbón ésta no es tan alta si se considera que cada kg de carbón equivale de 5 a 8 kg de leña razón por la que en las áreas rurales se prefiera utilizar leña, en caso de existir amplia disponibilidad de madera.

El consumo de leña y carbón está determinado por numerosos factores, tales como la disponibilidad de otros combustibles, el tipo de localidad (rural o urbana), el nivel de ingresos y los aspectos culturales. En las zonas urbanas, donde prácticamente todos los combustibles deben comprarse, tiende a existir una escala de uso de combustibles de acuerdo con el aparente status social y nivel de ingreso de las familias. En esta escala la leña ocupa la parte baja, pasando por carbón, petróleo, gas y electricidad en la parte alta, por lo que los consumidores tienden a cambiar el tipo de combustibles de acuerdo como mejoran sus ingresos.

Electrificación rural con fuentes renovables de energía en México

Uno de los grandes problemas que presenta México es la dispersión de la población rural en su territorio, sin embargo, según informes de la Comisión Federal de Electricidad, hasta el año de 1992 se tenía una cobertura del 90% de la población; es decir más de 75 millones de habitantes contaban con este servicio. Con el objeto de atender las necesidades de energía eléctrica de las comunidades más alejadas, el Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía del Instituto de Investigaciones Eléctricas, inició sus actividades en el año de 1977 enfocando sus esfuerzos en el aprovechamiento de energía solar, energía eólica, pequeños aprovechamientos hidráulicos y biomasa.

Las investigaciones en estas áreas de actividad se mantienen a la fecha, sin embargo pronto constituyeron un proyecto llamado: "Sistemas energéticos integrados".

Este proyecto plantea la integración de las cuatro fuentes de energía renovables, integrando y complementando cada unidad para su operación de acuerdo a los recursos y equipo disponibles. En las cinco áreas se han logrado avances significativos, actualmente se encuentran en operación más de 10,000 centrales pequeñas en diversas poblaciones rurales del país.

El uso de la biomasa como fuente de energía eléctrica

En México se han desarrollado diversas tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía, entre los principales productos que se han investigado y en algunos de los casos ya se encuentran en operación, son los siguientes:

- Bagazo de caña de azúcar
- Residuos orgánicos
- Vinaza (desechos de la destilación del alcohol)
- Desechos de frutas y verduras
- Basura producida en áreas urbanas
- Cáscara de café
- Rastrojo de maíz, sorgo
- Estiércoles
- Lodos orgánicos
- Lirio acuático
- Otros

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas se han venido desarrollando cinco líneas de investigación utilizando biomasa (productos orgánicos citados anteriormente) para la producción de biogás, mediante la utilización de digestores. Actualmente se han puesto en marcha algunos de los proyectos desarrollados, en la tabla 2.5, se relacionan los tipos de digestores y su capacidad para ser adecuados a las diversas necesidades en las áreas rurales.

Tabla 2.5 Proyectos de investigación sobre digestores desarrollados en el IIE

Tipo de digestor	Capacidad (m³)
Nivel laboratorio	0,2
Escala familiar	10,0
Escala comunal	40,0

Las otras 2 líneas de acción se han enfocado a la utilización del (biogás) obtenido a través de digestores, relacionados básicamente con su análisis, purificación, secado,

compresión y almacenamiento. El gas obtenido, se utiliza actualmente en estufas domésticas de 2 quemadores, lámparas, refrigeradores de absorción, motores generadores de 700 W y motores generadores de 16 Kw Los desechos sólidos (lodos) del digestor, se evaluaron para ser utilizados como fertilizantes, se compararon con fertilizantes químicos y estiércol fresco en plantaciones de maíz y de lechugas en el Estado de Morelos, las investigaciones para mejorar la eficiencia en el uso de los digestores para producir abonos se llevan a cabo en la Universidad Autónoma Metropolitana de Iztapalapa, en la Ciudad de México.

Por otro lado, se llevaron a cabo en los principios de los años 80 la difusión de la tecnología, instalando digestores para su operación con capacidades de 3, 20, 30, y 40 m³ en diversas comunidades en el país, otros proyectos que se desarrollan actualmente, es el uso de digestores de alto contenido de sólidos como es el caso de bagazo de caña de azúcar y lirio acuático.

En México se ha trabajado poco en la extracción de alcoholes y aceites como productos de la madera y de otros desechos orgánicos, el uso de etanol y metanol, más bien ha estado enfocado a usos industriales, el carbón y la leña siguen siendo los productos de la biomasa forestal más empleados como fuente de energía calorífica en las áreas rurales.

A pesar de los avances que se han logrado en el país, mediante el uso de digestores para el tratamiento de desechos orgánicos, sometidos a fermentación en ausencia de aire para generar biogás, compuesto por metano y bióxido de carbono, el cual puede sustituir al gas natural. En México se requiere de un fuerte apoyo en actividades de difusión y divulgación para poder ser empleados a mayor escala, ya que la aplicación y uso de esta tecnología, se puede ampliar y puede ser adaptada para la industria rural, como son aserraderos en las áreas forestales y para la extracción y transformación de productos primarios. La tecnología desarrollada en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, se encuentra a disponibilidad de los usuarios, para que a través de convenios de colaboración y con apoyos financieros, se implementen y se lleven a cabo programas y acciones en áreas rurales y urbanas, para incrementar el uso de la biomasa en la producción de energía, así como para la producción de abonos orgánicos y por otro lado, al mismo tiempo contribuir a mejorar el medio ambiente y evitar impactos ambientales por contaminación de desechos orgánicos.

Otras acciones realizadas

En el país se tiene implementado el programa a nivel nacional de dendroenergía (energía proveniente de la leña y el carbón vegetal principalmente) cuyos objetivos son los siguientes:

- Optimizar el uso de la leña combustible en el medio rural.
- Reducción de la extracción de leña de las masas forestales naturales.
- Disminución de la deforestación y degradación por consumo de leña.
- Aumento del uso de la leña y del carbón sin degradar las áreas forestales.
- Mejoramiento condiciones de vida y salud de la población que utiliza leña.
- Revalorización en la sociedad, el papel de la leña y carbón como fuentes de energía.
- Participación de los gobiernos federal, estatal y municipal en la ejecución del programa.

Líneas de acción del programa

- Producción de planta y establecimiento de módulos de plantación con fines energéticos.
- Optimización del uso de la leña mediante la construcción de estufas rurales.
- Promoción y difusión a través de folletos, demostraciones, cursos y talleres.
- Estudios de diagnóstico en áreas críticas por extracción y uso de leña combustible.

Por otro lado, se han preparado síntesis de perfiles de proyectos con diversas alternativas para reducir la presión de las áreas arboladas y para proponer acciones concretas de manejo de recursos naturales en zonas críticas, dentro de los que se contempla el establecimiento de módulos dendroenergéticos y con otros fines como protección, restauración y para producción de forraje.

En el año de 1995 se firmó el proyecto, "TCP/MEX/4553(a) Dendroenergía para el Desarrollo Rural" entre el gobierno de México y la FAO, con una aportación por parte de la FAO de \$212,500 USD. El objetivo de la asistencia técnica es dotar al país con la experiencia necesaria para la planificación y realización de sistemas sostenibles y eficientes de producción, abastecimiento y uso de combustibles vegetales.

Existen en el país diversos centros de investigación que en la actualidad están llevando a cabo proyectos sobre fuentes renovables de energía entre los que se considera la biomasa.

Impactos ambientales

En México, por mandato constitucional, la nación tiene el derecho de administrar y regular el aprovechamiento de los recursos naturales y del medio ambiente para contribuir al mejoramiento de las condiciones de vida de sus habitantes y tender al desarrollo sustentable. Así mismo, tiene la responsabilidad de establecer las medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

Actualmente la política social y ambiental en México, se encuentra en una etapa de implementación y ejecución, los cambios en las instituciones y los programas de modernización sectorial, han creado condiciones administrativas favorables para lograrlo y se han ido acumulando experiencias exitosas en los aspectos productivos, sociales y ambientales, de esta manera y con el objeto de proteger el ambiente de los desechos industriales producidos por las diversas fuentes de energía, en México se llevan a cabo las siguientes acciones en el sector eléctrico nacional.

Control de emisiones a la atmósfera

- Mejoramiento continuo de quemadores y estabilizadores de flama.
- Diseño de los depósitos de automatización de combustible
- Empleo de gas natural en lugar de combustóleo en las centrales localizadas en las ciudades de México, Monterrey, Juárez y Río Bravo.
- Afinación permanente de los generadores de vapor de las centrales termoeléctricas.
- Capacitación permanente del personal para medir emisiones de gas de combustión en las centrales termoeléctricas.
- Mantenimiento preventivo de generadores de vapor y de instrumentos relacionados con la combustión.

-Evaluación de costo/beneficio de aditivos para combustóleo para verificar la disminución de emisiones.

-Adquisición e instalación de equipos y redes de monitoreo de calidad del aire y de emisiones.

Residuos sólidos

-Uso de aditivos supresores de polvo.

-Cubiertas para las bandas que transportan el carbón.

-Precipitadores electrostáticos para la recolección de partículas.

-Generadores ciclónicos y depósitos controlados.

-Instalación de redes de monitoreo.

-Reforestación en los depósitos de ceniza.

Aguas residuales

-Construcción y rehabilitación de fosas separadoras de aceite.

-Lagunas de evaporación y pozos de absorción.

-Plantas de tratamiento de aguas negras.

-Tratamiento y re-uso de aguas negras.

2.10 Importancia de la generación eléctrica a partir de biomasa para la energización rural

La importancia de la dendroenergía en las industrias rurales del país, se podría valorar en términos de consumo, valor económico, empleo, medio ambiente, generación de ingreso, como combustibles disponibles en comparación a aquellos importados y alternativos.

Las condiciones actuales en el país, permiten plantear que los ingenios y las industrias son actualmente una alternativa importante para desarrollar la energización rural como fuente de sustitución. Sin embargo, los ingenios y las industrias no son ni constituyen la única alternativa para ello; municipios enteros como San Francisco Libre, Las Maderas, Malpaisillo actualmente viven de la venta de leña y no disponen de energía eléctrica, los cuales deberían optar por una política energética a largo plazo, a partir de la

dendroenergía. Primero incorporando al manejo forestal las enormes áreas que actualmente explotan para leña y segundo plantando para producir más leña y materia prima para futuras plantas dendroenergéticas pequeñas que puedan solucionar los problemas de los propios habitantes y de la industria.

Además de contribuir la dendroenergía a mejorar el medio ambiente, los programas de producción renovables, de transformación racional y de uso adecuado de la dendroenergía pueden constituirse en importante elementos de dinamización de un proceso de desarrollo rural integrado.

Capítulo 3

ANÁLISIS Y PROPUESTA DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA USANDO BIOMASA

En la actualidad en el mundo la mayoría de la generación eléctrica se realiza mediante centrales termoeléctricas, que usan ya sea carbón o combustibles fósiles, pero muy pocas aprovechan otro recurso para abastecer de combustibles estas centrales, debido a que no se tiene la tecnología y por no tener conocimiento de estas vías alternas o simplemente por que se cree más conveniente seguir usando combustibles fósiles. En el mundo se tienen muy pocas centrales que utilizan biomasa para sustituir a los combustibles ya mencionados o para usarlos alternadamente, en México muy poco se ha estudiado esta posibilidad, y son contadas las centrales que utilizan biomasa, aunque sí se tienen en funcionamiento sobre todo en lugares donde abunda este recurso.

3.1 Funcionamiento de una central termoeléctrica

Una central eléctrica es una instalación capaz de convertir la energía mecánica, obtenida mediante otras fuentes de energía primaria, en energía eléctrica. Podemos considerar que el esquema básico de funcionamiento de una central eléctrica es como se muestra en la Figura 3.1:

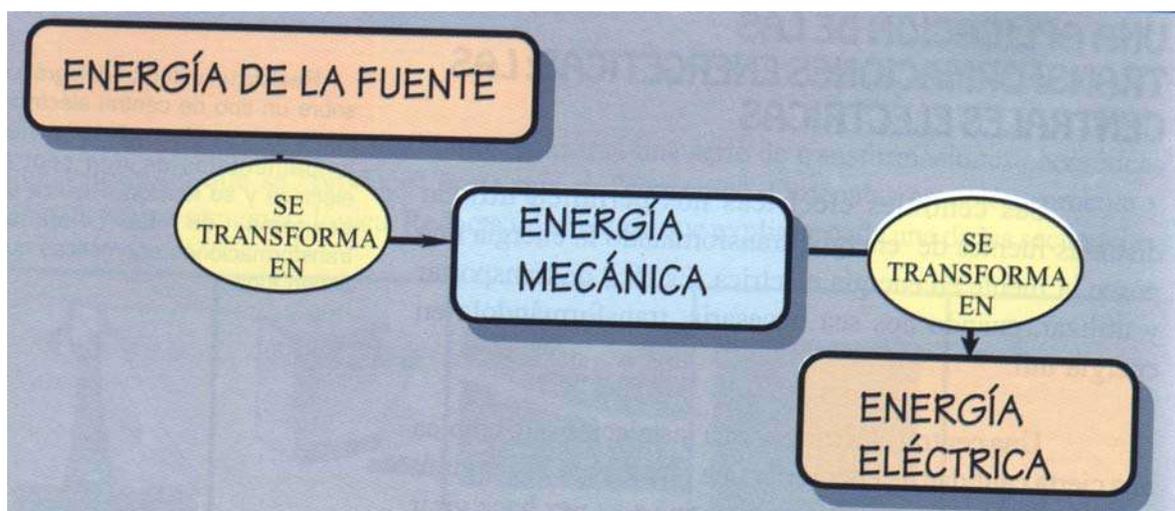


Figura 3.1 Esquema de una central eléctrica

En general, la energía mecánica procede de la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un embalse; de la energía térmica suministrada al agua mediante la combustión del carbón, gas natural, combustóleo ó a través de la energía de fisión del uranio y es aquí donde se utiliza la Biomasa.

Una central termoeléctrica consta de varios elementos, como son:

- Caldera
- Turbina
- Generador
- Condensador
- Calentador auxiliar
- Bombas

El funcionamiento de una central eléctrica se menciona a continuación:

3.1.1 Generadores eléctricos

La energía eléctrica se produce en los aparatos llamados generadores eléctricos. Un generador consta en su forma más simple de:

- Una espira que gira impulsada por algún medio externo.
- Un campo magnético uniforme, creado por un imán, en el seno del cual gira la espira anterior (Figura 3.2).

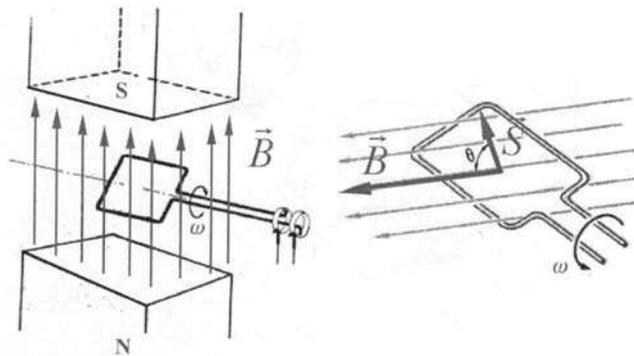


Figura 3.2 Campo magnético creado por un imán

A medida que la espira gira, el flujo magnético a través de ella cambia con el tiempo, induciéndose una fuerza electromotriz y si existe un circuito externo, circulará una corriente eléctrica.

Para que un generador funcione, hace falta una fuente externa de energía (hidráulica, térmica, nuclear, etc.) que haga que la bobina gire con una frecuencia deseada.

3.1.2 Generadores síncronos

El generador síncrono es un tipo de [máquina eléctrica](#) rotativa capaz de transformar [energía mecánica](#) (en forma de rotación) en [energía eléctrica](#). El generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o [rotor](#) y de una parte fija o [estator](#). El rotor gira recibiendo un empuje externo desde (normalmente) una turbina. Este rotor tiene acoplada una fuente de "corriente continua" de excitación independiente variable que genera un flujo constante, pero que al estar acoplado al rotor, crea un campo magnético giratorio que genera un sistema trifásico de fuerzas electromotrices en los devanados del estator. Todos los generadores trifásicos utilizan un campo magnético giratorio. En el dibujo de la figura 3.3 se observa instalados tres electroimanes alrededor de un círculo. Cada uno de los tres imanes está conectado a su propia fase en la red eléctrica trifásica. Como se puede ver, cada [electroimán](#) produce alternativamente un polo norte y un polo sur hacia el centro. La fluctuación en el magnetismo corresponde exactamente a la fluctuación en la tensión de cada fase. Cuando una de las fases alcanza su máximo, la corriente en las otras dos está circulando en sentido opuesto y a la mitad de tensión. Dado que la duración de la corriente en cada imán es un tercio de la de un ciclo aislado, el campo magnético dará una vuelta completa por ciclo.

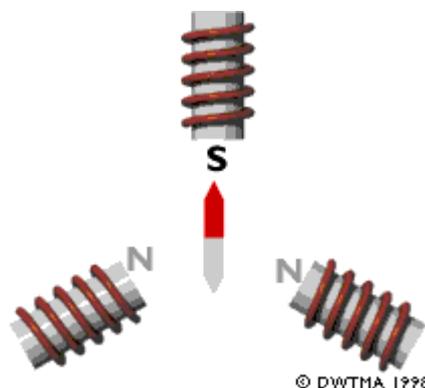


Figura 3.3 Principio de un generador síncrono

- **Operación de un generador síncrono**

Si empieza a forzar el imán para que gire (en lugar de dejar que la corriente de red lo mueva) se descubrirá que trabaja como generador, devolviendo corriente alterna a la red (si se tiene un imán más potente se produce mucha electricidad). Cuanta más fuerza (par torsor) se le aplique, mayor electricidad producirá, aunque el generador seguirá girando a la misma velocidad, impuesta por la frecuencia de la red eléctrica.

Se puede desconectar completamente el generador de la red y construir una red eléctrica trifásica, enganchando bombillas a tres bobinas arrolladas a electroimanes. Sin embargo, si se desconecta el generador de la red principal se tendrá que accionarlo a una velocidad de giro constante para que produzca corriente alterna a una frecuencia constante. Por lo tanto, con este tipo de generador, normalmente se usa una conexión indirecta a red del generador.

En la práctica, los generadores síncronos de imán permanente no son muy usados. Hay varias razones para que así sea. Una de ellas es que los imanes permanentes tienden a desmagnetizarse al trabajar en los potentes campos magnéticos en el interior de un generador. Otra de las razones es que estos potentes imanes (fabricados a partir de tierras raras, como el neodimio) son bastante caros, a pesar de que los precios han disminuido últimamente.

Para realizar la conversión de energía mecánica en eléctrica, se emplean unos generadores, más complicados que los que acabamos de ver en la pregunta anterior, que constan de dos piezas fundamentales:

- **El estator:** Armadura metálica, que permanece en reposo, cubierta en su interior por unos hilos de cobre, que forman diversos circuitos.
- **El rotor:** Está en el interior del estator y gira accionado por la turbina. Está formado en su parte interior por un eje, y en su parte más externa por unos circuitos, que se transforman en electroimanes cuando se les aplica una pequeña cantidad de corriente.

Cuando el rotor gira a gran velocidad, debido a la energía mecánica aplicada en las turbinas, se produce unas corrientes en los hilos de cobre del interior del estator. Estas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz, capaz de

producir energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él, tal como se muestra en el dibujo animado de la Figura 3.4.

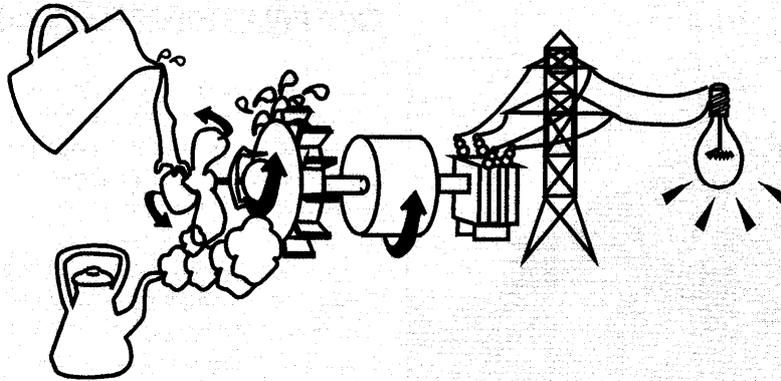


Figura 3.4 Funcionamiento de una central eléctrica

Como hemos visto la turbina es la encargada de mover el rotor del generador y producir la corriente eléctrica. La turbina a su vez es accionada por la energía mecánica del vapor de agua a presión o por un chorro de agua.

Todas las centrales eléctricas constan de un sistema de "turbina-generador" cuyo funcionamiento básico es, en todas ellas, muy parecido, variando de unas a otras la forma en que se acciona la turbina, o sea, dicho de otro modo en que fuente de energía primaria se utiliza, para convertir la energía contenida en ella en energía eléctrica.

3.2 Análisis de una central termoeléctrica con ciclo Rankine

A continuación se presenta el análisis de una central termoeléctrica en general, donde por medio de presiones, temperaturas, etc., podemos tener fórmulas generalizadas que sirven más adelante para ser usadas en el siguiente apartado que se trata sobre la propuesta de una central con datos reales. La central a la cual se aplicó este análisis se trata de la central eléctrica de Salamanca la cual cuenta con 4 generadores, 2 de ellos de 360 MW de potencia y 2 de 160 MW, para el análisis se recurrió a uno de los generadores de menor potencia; cabe mencionar que esta central es una central térmica, la cual no utiliza biomasa, pero es útil para hacer la comparación más adelante con una central que utilice biomasa.

Su funcionamiento es el siguiente: el vapor saturado descargado por la caldera a una presión P_1 es suministrado a la turbina, en donde se expande isoentrópicamente hasta la

presión P_2 . En el condensador se transforma el vapor húmedo isobárica e isotérmicamente, en el líquido saturado mediante la remoción de calor. Puesto que la presión $P_2 = P_3$ es mucho menor que la presión del vapor en la caldera $P_4 = P_1$, el líquido saturado mediante la remoción de calor. Se bombea isoentrópicamente hasta alcanzar la presión P_4 .

El líquido comprimido es suministrado a la caldera, en donde se calienta primero hasta su temperatura de saturación correspondiente a la presión P_1 , y luego se evapora hasta transformarse finalmente en vapor saturado seco para terminar el ciclo.

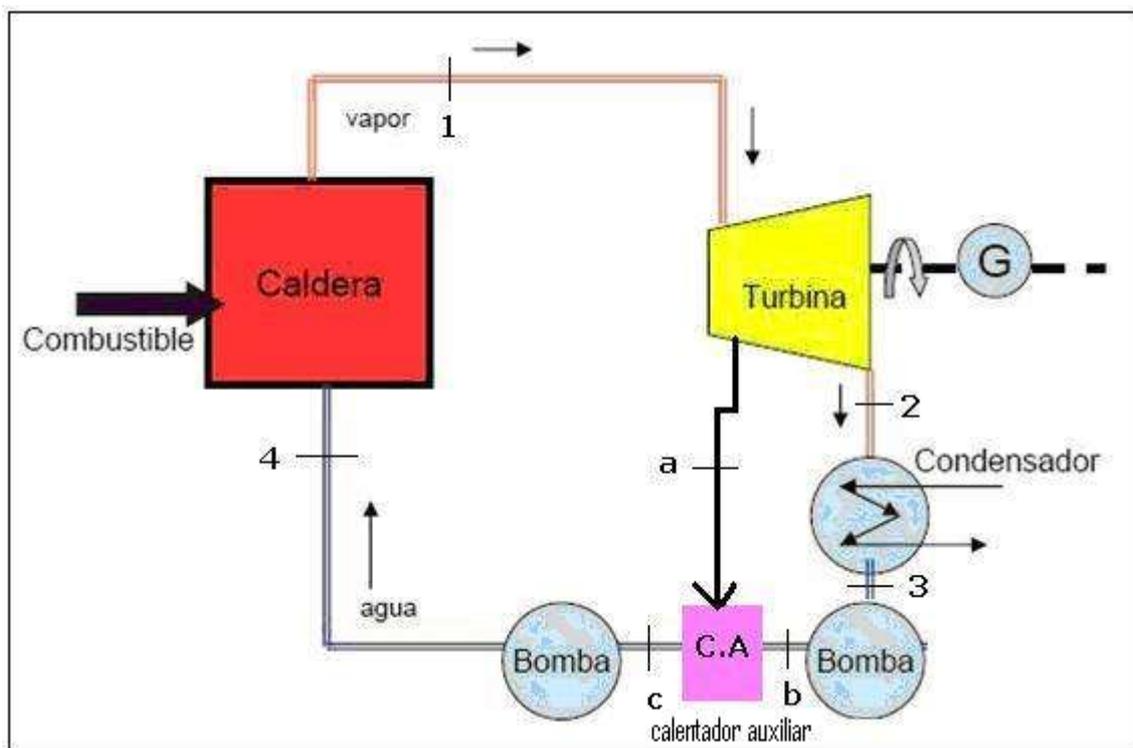


Figura 3.5 Diagrama de una central eléctrica

- Basándose en la figura 3.5 se debe tener en cuenta que las presiones en el ciclo son:

$$P_1 > P_a > P_2$$

$$P_a = P_b = P_c$$

- Analizando el balance de energía y de masa en el calentador se tiene:

Balance de energía:

$$m_b \cdot h_b + m_a \cdot h_a = m_c \cdot h_c \quad (3.1)$$

Balance de masa:

$$m_a + m_b = m_c \quad (3.2)$$

Además teniendo en cuenta que:

$$\dot{m}_c = \dot{m}_1 \quad (3.3)$$

$$\text{y } \dot{m}_b = \dot{m}_c - \dot{m}_a \quad (3.4)$$

- Sustituyendo en la ecuación (3.1)

$$\begin{aligned} (\dot{m}_c - \dot{m}_a) \cdot h_b + \dot{m}_a \cdot h_a &= \dot{m}_1 \cdot h_c \\ \dot{m}_1 \cdot h_b - \dot{m}_a \cdot h_b + \dot{m}_a \cdot h_a &= \dot{m}_1 \cdot h_c \\ \dot{m}_a \cdot (h_a - h_b) &= \dot{m}_1 \cdot (h_c - h_b) \end{aligned} \quad (3.5)$$

- Entonces:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_c - h_b)}{h_a - h_b} \Rightarrow \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_a} = \frac{h_b - h_a}{h_b - h_c} \quad \text{ó} \quad \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_c - h_b}{h_a - h_b} \quad (3.6)$$

- Pero se tiene que:

$$h_b = h_3 = h_{f2} \Leftarrow \text{Agua}$$

$$h_c = h_{fa} \Leftarrow \text{liquido Saturado}$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} \quad (3.7)$$

- El trabajo de la turbina es:

$$W_t = \dot{m}_1(h_1 - h_a) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_a) \cdot (h_a - h_2) \quad (3.8)$$

- El calor generado en la caldera es:

$$Q = h_1 - h_4 \quad (3.9)$$

- Ahora calculando la eficiencia del ciclo:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_t}{Q} \\ \eta &= \frac{(h_1 - h_a) + \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1}\right) \cdot (h_a - h_2)}{(h_1 - h_4)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Donde: m= flujo de vapor.

h= entalpía.

hf= entalpía de liquido saturado.

Recordando de las definiciones básicas de termodinámica se tiene que:

Entalpía: Magnitud termodinámica de un cuerpo físico o material equivalente a la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión exterior.

Entropía: Función termodinámica que es una medida de la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema o materia.

3.3 Propuesta de una central termoeléctrica que usa biomasa

A continuación se explica la propuesta de dos centrales termoeléctricas pero que utilizan como combustible principal la biomasa, una es un ejemplo de un ingenio azucarero y otra que utiliza desechos de granjas, pero además también utiliza combustible fósiles como combustible auxiliar, como se observa en la figura 3.6, en la cual tenemos un generador de vapor auxiliar el cual va a ayudar para mejorar el ahorro de combustible para el ciclo; el análisis se hizo basándose en datos técnicos para generar una potencia de 2 MW aproximadamente, la cual es suficiente para dar energía a una unidad habitacional pequeña de aproximadamente 150 casas.

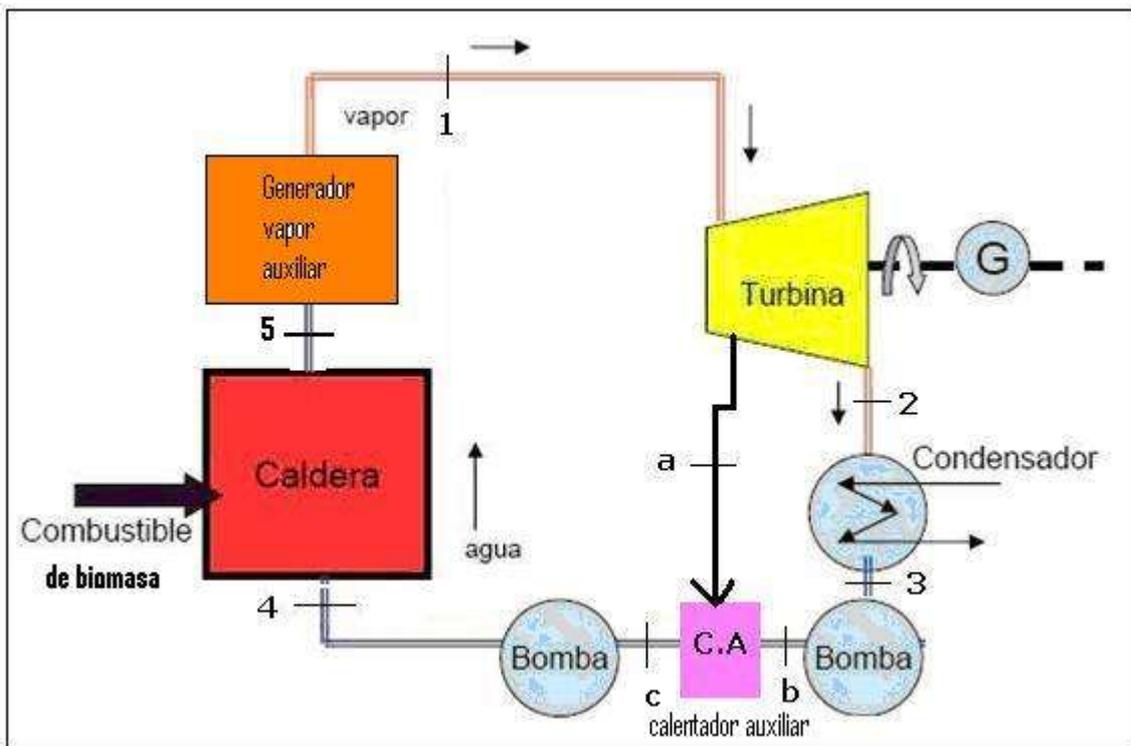


Figura 3.6 Diagrama de una central eléctrica con generador de vapor auxiliar

El objetivo del análisis con datos reales es para comprobar la eficiencia de nuestra central la cual debe ser de por lo menos el 30% que es la eficiencia que tienen la mayoría de las centrales eléctricas y con la cual se considera que se tiene buena eficiencia de energía. Para el análisis debemos encontrar los valores que son necesarios en la ecuación 3.10 para conocer la eficiencia del ciclo.

3.3.1 Propuesta de una central termoeléctrica usando un biodigestor

Esta propuesta se basa en la anterior con la diferencia de que usa un biodigestor para producir biogás que es el combustible que se usa para calentar el agua y poder generar vapor para el sistema, se tienen básicamente los mismos datos técnicos de turbogenerador, pero se tienen diferentes presiones y temperaturas para un análisis diferente y hacer una comparación mas adelante.

Los datos técnicos de ésta central propuesta con biogás son las siguientes:

Datos técnicos:

Potencia 2 MW

- **Caldera:**

Producción de vapor 12,000 Kg/h

Presión 17 bar

Temperatura 320 °C

- **Grupo turbogenerador:**

Potencia 2.2 Mw.

Caudal de vapor 11 T/h

Velocidad 6,500/1,500 rpm

Presión de entrada 16 bar

T del vapor de entrada 300 °C

Consumo específico de vapor 6.19 Kg/KWh

- Teniendo los datos técnicos de la central empezamos buscando la entalpía h_1 y la entropía S_1 :

$P_1=17$ bars.

$T_1=320^\circ\text{C}$

Utilizando las tablas de vapor sobrecalentado hacemos una interpolación entre 15 y 20 bars.

320°	H	S
15 bars	3081.9	6.9938
20 bars	3069.5	6.8452
20-15=5	=12.4	=0.1480
20-17=3	<u>3074.46</u>	<u>6.905</u>

Entonces tenemos

$$h1 = 3074.46$$

$$S1 = 6.905$$

- Ahora para la salida de la turbina, o sea, el punto 2 (Figura 3.4) se tiene la presión número 2:

$$P2 = 0.111 \text{ bars}$$

Utilizando la siguiente ecuación para obtener la entalpía 2:

$$h = hf + X \cdot hfg \quad (3.11)$$

Podemos conocer las entalpías, mas no se conoce X2, pero si se toma en cuenta que en el ciclo S1=S2 se puede utilizar la ecuación de la entropía y despejar X2:

$$S = Sf + X \cdot Sfg \quad (3.12)$$

Sabiendo que Sfg = Sg - Sf , que S2=S1 y despejando X2 tenemos:

$$X = \frac{S - Sf}{Sfg} \quad (3.13)$$

Donde: S= entropía.

Sf= entropía de liquido saturado.

Sfg= entropía de evaporado.

X= calidad del agua.

Ahora solamente se hace una interpolación entre 0.1 bars y 0.2 bars para obtener las entalpías y entropías de 0.111 bars y sustituir en las ecuaciones 3.13 y 3.11 respectivamente:

	hf (KJ/Kg)	hfg	Sf (kJ/kg*K)	Sg
0.1 bars	191.83	2392.8	0.6493	8.1502
0.2 bars	251.46	2358.3	0.8320	7.9085
0.2-0.1=0.1	=59.63	=-34.5	=0.1827	=-0.2417
0.2- 0.111=0.089	<u>198.38</u>	<u>2389.005</u>	<u>0.6694</u>	<u>8.1236</u>

Ya que se tiene los datos que se ocupan sólo se sustituye:

$$X2 = \frac{6.905 - 0.6694}{7.4542} = 0.8365$$

$$h_2 = 198.38 + (0.8365)(2389.005) = 2196.78$$

- Falta conocer las entalpías h_a y h_4 , para esto se puede basar en la presión de entrada a la caldera (punto 4 en la figura 3.5) la cual según datos propuestos es de 5 bars y por ende encontrar h_4 la cual es igual a h_{fa} y poderla obtener de las tablas de vapor saturado y seco o de diagramas de moullier.

$$P_4 = 5 \text{ bars}$$

$$h_4 = h_{fa} = 640.23$$

Con estos datos se logra encontrar h_a usando la ecuaciones 3.12 y 3.13, teniendo en cuenta que $S_a = S_1$:

$$X_a = \frac{6.905 - 1.8607}{5.0446} = 0.999$$

$$h_a = 640.23 + (0.999) \cdot (2108.5) = 2746.6215$$

- Ya que se obtuvieron las entalpías y entropías necesarias es necesario encontrar las relaciones de flujos \dot{m}_a y \dot{m}_1 que sirven para la ecuación de la eficiencia, solo se sustituyen las entalpías en la ecuación 3.7 y así por ultimo obtener la eficiencia del ciclo:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} = \frac{640.23 - 198.38}{2746.6215 - 198.38} = \frac{441.85}{2548.2415} = 0.1734$$

$$\eta = \frac{(3074.46 - 2746.6215) + (1 - 0.1734) \cdot (2746.6215 - 2196.78)}{(3074.46 - 640.23)} = 0.3214$$

$$\eta = 32.14\%$$

Como se observa, la eficiencia resulta mayor a 30% que es la mínima requerida, entonces este ciclo es válido para esta propuesta.

3.3.1.1 Uso de biodigestores para la producción de biogás

- **Biogás:**

El biogás es una fuente de energía renovable cuyo comportamiento principal es el gas metano. Este genera a través de la descomposición de la materia orgánica. Para la generación de biogás y de energía eléctrica se puede utilizar cualquier tipo de desecho orgánico como: estiércol de ganado, desechos agrícolas, grasas orgánicas, desechos forestales, etc.

El biogás es un producto de metabolismo de materias metanogénicas que participan en la descomposición de tejidos orgánicos en un ambiente húmedo y carente de oxígeno. La producción de biogás va a depender, principalmente, de los materiales utilizados, la temperatura y el tiempo de descomposición. A mayor temperatura más rápido será el proceso de descomposición; esto significa que el material requiere menos tiempo dentro del fermentador.

- **Principios de combustión del biogás:**

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO_2 y H_2O . El requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero se debe aumentar para mejorar la combustión.

La presión para un uso correcto del gas oscila entre los 7 y los 20 mbar.

- **Biodigestores y principio de producción de biogás:**

El principio básico para obtener el biogás es el siguiente, el biodigestor posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica se suministra la materia orgánica, en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por la acción bacteriológica abandona el biodigestor, la temperatura del biodigestor debe de ser de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se espera un periodo de 10 a 30 días dependiendo de la eficiencia del biodigestor (la cual depende de temperatura, presión y construcción), para que los organismos anaerobios descompongan la materia orgánica y produzcan biogas, una vez cumplido el tiempo de espera, se puede producir el biogas necesario diariamente. Los materiales que entran y salen del fermentador se les denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás. Esto se ilustra en la figura 3.7 de un biodigestor, que es de tipo chino de tercera generación.

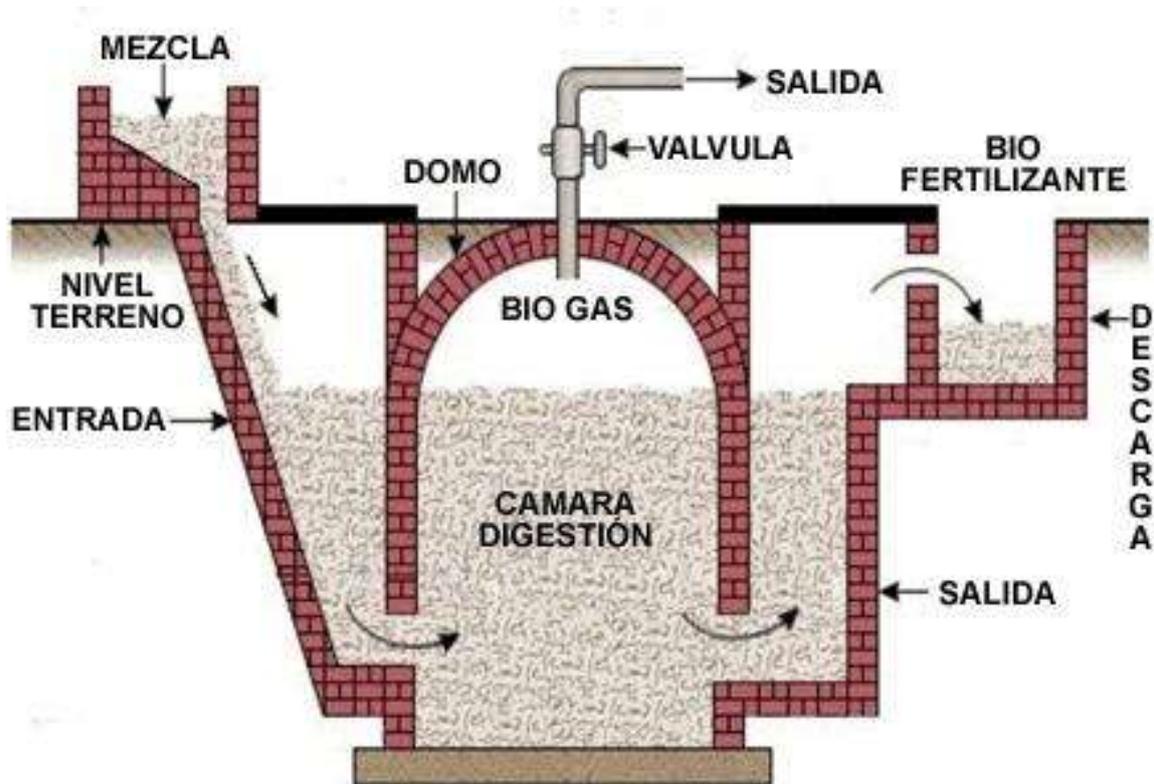


Figura 3.7 Partes de un biodigestor

- **Producción de biomasa en Michoacán:**

AGRICULTURA

En el estado de Michoacán se dedican a cultivos agrícolas es de 1,143,162 hectáreas, de las cuales el 77% en promedio corresponde a la temporada de primavera-verano.

GANADERIA

Es la segunda actividad de importancia económica en la entidad, ocupando el 43% del territorio estatal; ello es debido a que la ganadería se basa en sistemas de producción extensivos.

PESCA Y ACUACULTURA

Se capturan alrededor de 1,052 toneladas anuales de especies marinas, que conforman el 4% de la producción pesquera estatal, está constituida por especies como el guachinango, sierra, pargo, ostión, tiburón y cazón. Esta captura se destina tanto al autoconsumo de la población ribereña, como para el abasto del mercado regional.

- **Cantidad de biomasa que utiliza esta propuesta**

Las actividades mencionadas generan grandes cantidades de desechos orgánicos a los cuales se les da mal uso, la mayoría son tirados al medio ambiente generando un problema de contaminación.

Por ejemplo, en total en una granja de 500 puercos, 100 toros y 5000 pollos aproximadamente, se desechan 150 Kg. de estiércol por día aproximadamente. Por el tipo de estiércol tenemos que 1 Kg. de estiércol produce hasta 0.5 m^3 de biogás, por lo tanto se tiene:

$$150 \text{ Kg. Estiércol/día} (0.5 \text{ m}^3 \text{ biogás/Kg. Estiércol}) = 75 \text{ m}^3 \text{ biogás/día}$$

También un metro cúbico de biogás, puede producir hasta 2.2 KWh de energía eléctrica, dependiendo de la eficiencia de la maquinaria, llegando hasta 6 KWh cuando se tiene una eficiencia en el biodigestor de alrededor de 40%.

$$75 \text{ m}^3 \text{ biogás/día} (2.2 \text{ KWh}/1 \text{ m}^3 \text{ biogás}) = 165 \text{ KWh/día}$$

Basándose en lo anterior se pueden producir 165 KWh al día de energía eléctrica, para la central propuesta anteriormente de 2 MW se ocuparían entonces un total de 772.72 m^3 de biogás/día lo que es igual al desecho de excremento de 10 granjas como la mencionada.

3.3.2 Propuesta de central termoeléctrica de un ingenio azucarero

Los residuos generados por un ingenio azucarero se pueden aprovechar para obtener dos tipos de energía útiles: energía térmica y energía eléctrica, con lo cual se propicia el mejor desarrollo empresarial de la comunidad donde se establezca. Para poner a funcionar una central de este tipo se deben de tener en cuenta varios requisitos:

- **Biomasa generada:**

Generación media = $96,701 \text{ m}^3/\text{año}$

- **Energía térmica:**

Requerimiento máximo = $4,216 \text{ kWt}$

Requerimiento medio = $1,717 \text{ kWt}$

- **Energía eléctrica:**

Potencia máxima instalada = $2,000.2 \text{ kWe}$

Requerimiento máximo = 429 kWe

Requerimiento medio = 115 kWe Biomasa energética

Por medio de las formulas desarrolladas en el apartado anterior y aplicándolas a los datos de presión y temperatura característicos de la central propuesta se puede notar la eficiencia del ciclo.

Los datos técnicos de ésta central propuesta son las siguientes:

Datos técnicos:

Potencia 2 MW

- **Caldera:**

Producción de vapor 90,900 Kg/h

Presión 28.5 bar

Temperatura 400 °C

- **Grupo turbogenerador:**

Potencia 2.2 Mw.

Caudal de vapor 11 T/h

Velocidad 6,500/1,500 rpm

Presión de entrada 16 bar

T del vapor de entrada 390 °C

Consumo específico de vapor 6.19 Kg/kWh

Con ellos podemos empezar el análisis de la central que se esta proponiendo, recordando que estos datos son propuestos, para el objetivo que se busca y que estos datos se basan en una central real.

- Teniendo los datos técnicos de la central empezamos buscando la entalpía h_1 y la entropía S_1 :

$P_1=28.5$ bars.

$T_1=400$ °C

Utilizando las tablas de vapor sobrecalentado hacemos una interpolación entre 15 y 20 bares.

400 °	H	S
20 bars	3247.6	7.1271

30 bars	3230.9	6.9212
30-20=10	=16.7	=0.2059
28.5-30=1.5	<u>3245.095</u>	<u>7.0962</u>

Entonces tenemos

$$h1 = 3245.095$$

$$S1 = 7.0962$$

- Ahora para la salida de la turbina, o sea, el punto 2 (Figura 3.4) se tiene la presión numero 2:

$$P2 = 0.111 \text{ bars}$$

Utilizando la siguiente ecuación para obtener la entalpía 2:

$$h = hf + X \cdot hfg \quad (3.11)$$

Podemos conocer las entalpías, mas no se conoce X2, pero si se toma en cuenta que en el ciclo S1=S2 se puede utilizar la ecuación de la entropía y despejar X2:

$$S = Sf + X \cdot Sfg \quad (3.12)$$

Sabiendo que Sfg = Sg - Sf , que S2=S1 y despejando X2 tenemos:

$$X = \frac{S - Sf}{Sfg} \quad (3.13)$$

Donde: S= entropía.

Sf= entropía de liquido saturado.

Sfg= entropía de evaporado.

X= calidad del agua.

Ahora solamente se hace una interpolación entre 0.1 bars y 0.2 bars para obtener las entalpías y entropías de 0.111 bars y sustituir en las ecuaciones 3.13 y 3.11 respectivamente:

	hf (kJ/kg)	hfg	Sf (kJ/kg*K)	Sg
0.1 bars	191.83	2392.8	0.6493	8.1502

0.2 bars	251.46	2358.3	0.8320	7.9085
0.2-0.1=0.1	=59.63	=-34.5	=0.1827	=-0.2417
0.2- 0.111=0.089	<u>198.38</u>	<u>2389.005</u>	<u>0.6694</u>	<u>8.1236</u>

Ya que se tiene los datos que se ocupan solo se sustituye:

$$X_2 = \frac{6.905 - 0.6694}{7.4542} = 0.8365$$

$$h_2 = 198.38 + (0.8365)(2389.005) = 2196.78$$

- Falta conocer h_a y h_4 , para esto se puede basar en la presión de entrada a la caldera (punto 4 en la figura 3.5) la cual según datos propuestos es de 5 bars y por ende encontrar h_4 la cual es igual a h_{fa} y poderla obtener de las tablas de vapor saturado y seco o de diagramas de moullier.

$$P_4 = 2.5 \text{ bars}$$

$$h_4 = h_{fa} = 535.37$$

Con estos datos se logra encontrar h_a usando la ecuaciones 3.12 y 3.13, teniendo en cuenta que $S_a = S_1$:

$$X_a = \frac{7.0462 - 1.6072}{7.0527 - 1.6072} = 1.008$$

$$h_a = 535.37 + (1.008) \cdot (2181.5) = 2734.322$$

- Ya que se obtuvieron las entalpías y entropías necesarias es necesario encontrar las relaciones de flujos \dot{m}_a y \dot{m}_1 que sirven para la ecuación de la eficiencia, solo se sustituyen las entalpías en la ecuación 3.7 y así por ultimo obtener la eficiencia del ciclo:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} = \frac{535.37 - 6.905}{2734 - 32 - 6.905} = 0.1934$$

$$\eta = \frac{(3245.095 - 2734.32) + (1 - 0.1934) \cdot (2734.32 - 2192.78)}{(3245.095 - 535.37)} = 0.35$$

$$\eta = 35\%$$

En esta propuesta el valor de la eficiencia es mayor que la anterior que era de 32.14% y supera la mínima requerida.

3.3.2.1 Parámetros de la propuesta

Para producir combustible para abastecer la central eléctrica propuesta se tiene el ejemplo de un ingenio azucarero, ya que la caña de azúcar es un producto abundante en Michoacán sobre todo en la región de Tacambaro y de él se puede recuperar los desechos (bagazo) considerando además que este es el material más usado en las centrales que usan biomasa. En la tabla 3.1 se muestran todos los parámetros que se tienen en una propuesta de este tipo.

Tabla 3.1 Parámetros de operación de la propuesta

Variable	Unidad	Extracción- Condensación
Capacidad eléctrica	kWe	2,120.0
Capacidad térmica	kWt	4,216.0
Relación Q/E	kWt/kWe	2.0
Flujo de vapor a proceso	ton/h	5.0
Flujo de vapor total	ton/h	14.7
Biomasa requerida	m ³ /año	63,221.3
Requerimiento de combustóleo	kg/h	0.0
Agua enfriamiento en sistema cerrado	m ³ /h	354.4
Agua de reposición enfriamiento	m ³ /h	3.5
Agua de reposición caldera	m ³ /h	0.9 – 1.2
Eficiencia ciclo	%	35

Un ingenio ideal para este tipo de propuesta, son muy comunes (figura 3.8), ya que el ingenio por lo general procesa 450,000 toneladas de caña anuales, 3,500 toneladas al día, lo cual genera unas 125,000 toneladas de bagazo. Además el ingenio cumple con las siguientes características:



Figura 3.8 Ingenio Azucarero

- El 30% de la producción de bagazo se utiliza para generar vapor en la caldera. El vapor residual se utiliza para el calentador auxiliar.
- Se genera vapor a partir de biomasa residual de la industria azucarera, y posteriormente se produce electricidad en una turbina y generador.
- Se autoabastece de combustible, con lo cual la inversión ha sido de 15,735 pesos MXN/KW. El kilo de combustible se sitúa aproximadamente en 0.1475 pesos MXN, mientras que la rentabilidad podría mantenerse con precios hasta de 0.4 MXN/kilo, el costo de producir vapor es de \$43.7/ton.
- La central cubre las necesidades energéticas de la industria y produce un importante excedente que se vende a la red. Está acogida al régimen especial, según el RD 2818/98, en el grupo correspondiente a centrales que utilizan biomasa.

Capítulo 4

COMPARACIÓN Y VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIOMASA

Ningún sistema es perfecto, todos los sistemas tienen ventajas y desventajas, en el uso de la biomasa no es la excepción y como ya se mencionó anteriormente no es una energía 100% limpia, en este capítulo se aborda las ventajas y desventajas del uso de la biomasa, en cuanto a su uso como combustible para la generación de energía eléctrica así como una pequeña comparación con otro tipo de energía y entre las diferentes formas de utilizar la biomasa y si es viable su uso o no.

4.1 Ventajas y desventajas de la introducción de la biomasa como fuente de energía

4.1.1 Ventajas

Aunque la energía de la biomasa ha sido aprovechada desde que el hombre descubrió el fuego, la consideración actual de la biomasa como una fuente de energía limpia se hace bajo nuevos criterios y enfoques.

- El balance de CO₂ emitido es neutro. La combustión de biomasa, si se realiza en condiciones adecuadas, produce agua y CO₂, pero la cantidad emitida de este último gas, principal responsable del efecto invernadero, fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, el CO₂ de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación continuo entre la atmósfera y la vegetación, sin que suponga incremento de ese gas en la atmósfera tal que la vegetación se renueve a la misma velocidad que se degrada.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas.
- Una parte de la biomasa para fines energéticos procede de materiales residuales que es necesario eliminar. El aprovechamiento energético supone convertir un residuo en un recurso.
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentes en el mercado de alimentos. Eso puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola.

- La producción de biomasa es totalmente descentralizada, basada en un recurso disperso en el territorio, que puede tener gran incidencia social y económica en el mundo rural.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.
- La tecnología para su aprovechamiento cuenta con un buen grado de desarrollo tecnológico para muchas aplicaciones.
- Es un importante campo de innovación tecnológica. Las respuestas tecnológicas en curso están dirigidas a optimizar el rendimiento energético del recurso, minimizar los efectos ambientales de los residuos aprovechados y de las propias aplicaciones, incrementar la competitividad comercial de los productos y posibilitar nuevas aplicaciones de gran interés como los biocombustibles, entre otros.

4.1.2 Ventajas ambientales del uso energético de la biomasa

- Se considera que todo el CO₂ emitido en la utilización energética de la biomasa había sido previamente fijado en el crecimiento de la materia vegetal que la había generado, por lo que no contribuye al incremento de su proporción en la atmósfera y, por tanto, no es responsable del aumento del efecto invernadero.
- La biomasa tiene contenidos en azufre prácticamente nulo, generalmente inferior al 0,1%. Por este motivo, las emisiones de dióxido de azufre, que junto con las de óxidos de nitrógeno son las causantes de la lluvia ácida, son mínimas.
- Por otra parte, el uso de biocarburantes en motores de combustión interna supone una reducción de las emisiones generadas (hidrocarburos volátiles, partículas, SO₂ y CO).

4.1.3 Ventajas socioeconómicas del uso energético de la biomasa

- El aprovechamiento energético de la biomasa contribuye a la diversificación energética, uno de los objetivos marcados por los planes energéticos actualmente discutidos en el congreso de nuestro país.
- La implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas evita la erosión degradación del suelo ya que se permite la utilización de tierras en retirada para la producción de cultivos no alimentarios, como son los cultivos energéticos.

- El aprovechamiento de algunos tipos de biomasa (principalmente la forestal y los cultivos energéticos) contribuyen a la creación de puestos de trabajo en el medio rural.

4.1.4 Desventajas

- En estado natural, la biomasa tiene baja densidad relativa de energía. Su transporte puede aumentar los costos y reducir la producción energética neta debido al mal manejo de la biomasa durante el transporte. La biomasa tiene densidad a granel baja. Es decir, grandes volúmenes son necesarios en comparación con los combustibles fósiles. Es necesario que el proceso de conversión de la biomasa a energía se realice cerca de donde se produce la biomasa.
- Puede haber conflicto por el uso de tierra y agua para producción de biomasa y otras aplicaciones, tales como producción de alimentos y de fibras. Sin embargo, hay suficiente tierra disponible.
- Competencia de las nuevas plantas de gas natural, altamente eficientes. Sin embargo, la economía de la producción energética de biomasa está mejorando, y la preocupación cada vez mayor por las emisiones de gas de invernadero está haciendo a la energía de biomasa más atractiva.
- La producción y procesos pueden implicar consumo de energía significativo, tales como combustible para los vehículos y fertilizantes agrícolas, dando por resultado un balance energético reducido para el uso de la biomasa. En la producción de biomasa hay que reducir el consumo de combustibles fósiles, y maximizar la conversión y recuperación de energía.
- Restricciones políticas e institucionales al uso de biomasa, políticas energéticas, impuestos y subsidios que fomentan el uso de combustibles fósiles. Los costos de la energía no reflejan a menudo las ventajas ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.
- La incineración puede resultar peligrosa y producen sustancias tóxicas. Por ello se deben utilizar filtros y realizar la combustión a temperaturas mayores a los 900 °C.
- No existen demasiados lugares idóneos para su aprovechamiento ventajoso.

- Se fabrica a partir de productos como la soja o el arroz, lo que supone un peligro para los países pobres en vías de desarrollo, porque si los países ricos utilizan estos productos en lugar de la gasolina el precio de los mismos puede subir tanto que los países pobres no pueda pagarlo provocando la falta de alimento y por tanto el hambre, la miseria y la muerte, ejemplo de ello se tuvo en nuestro país cuando la escasez de maíz produjo un aumento en el costo de la tortilla y los más pobres fueron los que resintieron esta medida.

4.2 Ventajas y Desventajas de las Centrales Termoeléctricas de Biomasa

El empleo energético de la biomasa presenta numerosas ventajas, no sólo para el propietario de la instalación de aprovechamiento, también para el conjunto de la sociedad, así como desventajas como en todo sistema eléctrico.

4.2.1 Ventajas

- No emite gases que provocan el efecto invernadero.
- Tiene contenidos de azufre prácticamente nulos por lo que la emisión de dióxido de azufre es mínima. El dióxido de azufre, junto con los óxidos de nitrógeno, son causas de la lluvia ácida.
- El uso de la biomasa como biocombustible en motores de combustión interna reduce el empleo de los motores alimentados por combustibles fósiles que provocan altos índices de contaminación.
- El empleo de la tecnología de digestión anaerobia para tratar la biomasa residual húmeda además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de digestión anaerobia pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura.
- 1 kilogramo de gasolina es igual a 3 kilos de biomasa, 1 kg. de gasolina proporciona 10,000 Kilocalorías y 1 Kg. de biomasa puede proporcionar 3,500 Kilocalorías.
- En cuanto al equipo, hay ausencia de depósitos de carbono en la caldera, debido a una combustión mas completa, y por lo tanto se necesita de menos

mantenimiento, hay menos cantidad de monóxido de carbono en los gases de escape.

- Se produce biofertilizante, en el caso de utilizar biodigestores, rico en nitrógeno, fósforo y potasio, capaz de competir con fertilizantes líquidos, que además de ser más caros, dañan el medio ambiente y también se eliminan desechos orgánicos, como son excrementos animales y basura orgánica.
- Se genera empleo en el área donde se establezca este tipo de centrales, así como generar electricidad en zonas rurales donde no se tenga servicio de red eléctrica.
- Costo de combustible relativamente barato.

4.2.2 Desventajas

- El rendimiento de las calderas de biomasa es inferior a las que usan combustible fósil.
- Se necesita mayor cantidad de biomasa para conseguir la misma cantidad de energía con otras fuentes.
- Los canales de distribución de biomasa están menos desarrollados que los de combustibles fósiles.
- La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores.
- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costes de operación y mantenimiento (respecto a las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente.
- Los canales de distribución de la biomasa no está tan desarrollados como los de los combustibles fósiles (sólo aplicable en el caso de que los recursos no sean propios).
- Muchos de estos recursos tienen elevados contenidos de humedad, lo que hace que en determinadas aplicaciones puede ser necesario un proceso previo de secado.

- En el caso del biodigestor este debe tenerse en las cercanías donde se recoge el material orgánico para la zona de consumo, ya que el coste de transporte sería extra; debe tenerse a temperaturas cercanas a 35°C por lo que su construcción en zonas frías se vuelve costosa.
- Hay un riesgo de explosión si no se cumple con las normas de seguridad para los gases combustibles.
- Se tiene oxidación del equipo debido a las impurezas del biogás, ya que este presenta sustancias como el ácido sulfhídrico (H₂S), que en el caso de combustibles derivados del petróleo están exentos de estas impurezas.
- Costo de operación muy elevado.

4.3 Comparación de las centrales termoeléctricas de biomasa contra las que usan otros combustibles

En la actualidad las centrales térmicas utilizan diferentes tipos de combustibles para mejorar su eficiencia, bajar costos o simplemente por que es ideal para utilizar, en esta sección se realiza un análisis de comparación de diferentes tipos de combustibles de las centrales térmicas y conocer cual es el mas viable.

4.3.1 Central térmica de biomasa comparada con una central solar

Para realizar esta comparación se compartieron primero los datos de otra central elaborada en la tesis de una central termoeléctrica que usa paneles solares para recalentar agua y usa como combustible principal carbón mineral, el esquema se muestra en la figura 4.1, donde se puede notar la diferencia con la central propuesta en el Capitulo 3, los datos del análisis de la planta con paneles se usaron para en esta sección obtener una diferencia entre este tipo de central y el propuesto en esta tesis. El análisis de la central que utiliza paneles se muestra a continuación.

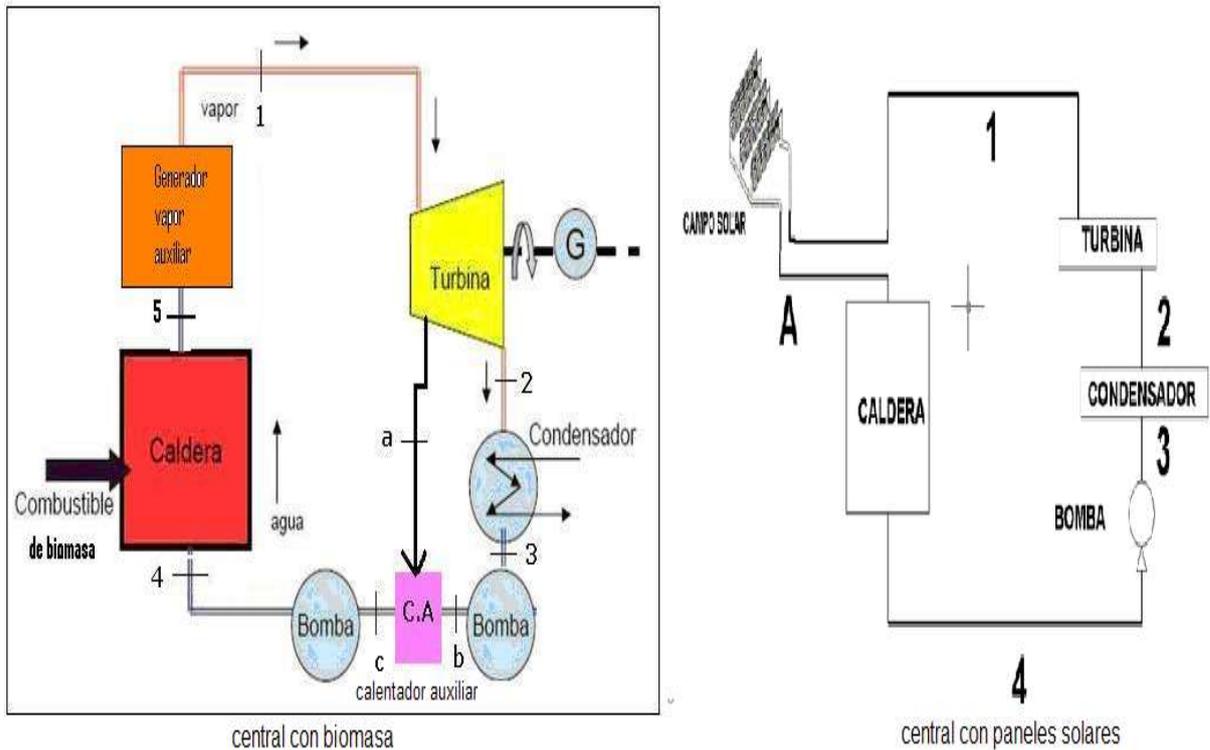


Figura 4.1 Comparación entre dos centrales una que utiliza biomasa como combustible y otra con paneles solares

Con los datos necesarios y realizando el análisis para obtener la eficiencia del ciclo se obtienen los siguientes resultados:

PARA EL PUNTO A

$$P1 = 30 \text{ bar}$$

$$S1 = 6.1869$$

$$h 1 = 2804.2$$

$$T = 233.9$$

PARA EL PUNTO 1

$$P1 = 30 \text{ bar}$$

$$T = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h 1 = 3114.87$$

$$S1 = 6.7412$$

PARA EL PUNTO 2

$$P2 = 0.075 \text{ bar}$$

$$S2 = S1 = 6.7412$$

$$hfg = 2406.3$$

$$sf = 0.5747$$

$$hf = 168.2925$$

$$sg = 8.2541$$

$$X2 = (S2 - Sf2)/Sfg2$$

$$h2 = hf2 + X2 * hfg2$$

$$X2 = 0.802$$

$$**h2 = 2098.1451**$$

Y como $h4 = h3 = hf2$

Por lo tanto la eficiencia es:

$$e = 0.345 = \mathbf{34.5\%}$$

Si comparamos la eficiencia de esta central con las eficiencias calculadas para las dos propuestas en el capítulo 3, se aprecia que esta central es más eficiente que la central que utiliza biodigestor que tiene una eficiencia del 32.14%, pero si la comparamos con la que utiliza bagazo para combustión directa que es de 35%, pues es muy poco lo que varían ambas, lo que hace competitiva a la propuesta con biomasa.

En cuanto a costos es más económica al inicio la central con bagazo, pues el costo de la central que usa paneles hay que adicionarle además de los componentes de una central termoeléctrica todo el equipo para adaptarle los paneles que son aproximadamente de \$782,100 MXN que incluye, 40 paneles 1 inversor trifásico, 5 cargadores de baterías y 20 baterías, pero a largo plazo es más económico puesto que no se tiene que gastar en mucho combustible.

4.3.2 Central térmica de biomasa comparada con una que utiliza carbón mineral

En la actualidad en el mundo y específicamente en nuestro país la mayoría de las centrales termoeléctricas usan como combustible principal el carbón mineral debido a

varios factores, entre ellos su facilidad de obtención, su costo y a que es necesario tener este tipo de centrales ya que no siempre las condiciones para tener centrales hidráulicas, geotérmicas, eólicas, etc. son las que se necesitan para instaurar este tipo de centrales.

Para hacer una comparación entre ambas centrales, se debe enfocar en los combustibles utilizados por estas que son la biomasa, el biogás y el carbón mineral. Entonces se debe tener en cuenta primero que poder calorífico produce cada uno de ellos en combustión directa, esto se observa a continuación en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Poder calorífico de diferentes combustibles

TIPO DE COMBUSTIBLE	PODER CALORIFICO (MJ/Kg.)
CARBÓN DE LEÑA	27
CARBÓN MINERAL	30
BAGAZO DE CAÑA	9
DESECHOS ORGANICOS	13
BIOGÁS	21
PAJA, CEREALES	17

Como se observa en la tabla anterior se tiene que el poder calorífico del carbón mineral es mayor que el del bagazo de caña y que del biogás y el combustible que más se acerca es el carbón de leña.

Si ahora se analizan los costos de los tres combustibles de interés se tiene que el precio en el mercado del carbón es aproximadamente de \$22.22 MXN/Kwh. o \$45 MXN/Kg., mientras que en el caso del estiércol usado por el biodigestor para producir biogás es de \$0.2 MXN/Kg., relativamente barato

Por lo tanto, si se hace una relación Costo-Beneficio, la biomasa, en este caso el biogás es el combustible ideal para utilizarse en centrales térmicas, teniendo en cuenta que es para centrales térmicas pequeñas, alrededor de 10 MW, ya que no sería útil para alimentar centrales grandes como por ejemplo las que producen más de 160 MW., donde el biogás sería insuficiente para abastecer una central de tal producción, aunque si se podría utilizar como combustible para calderas auxiliares, donde se requiere recalentar agua para ahorrar combustible.

4.3.3 Comparación entre una central eléctrica de biomasa usando biodigestor y una que utiliza bagazo de caña

En la comparación de estos dos tipos de combustible biomásico se toma en cuenta tanto sus costos y su poder calorífico del bagazo de caña y del biogás para hacer una relación Costo-Beneficio y saber cual es más conveniente.

El poder calorífico de ambos se encuentra en la tabla 4.1, el del bagazo de caña es de 9 MJ/kg mientras que el del biogás es de 21 MJ/Kg., entonces se observa que el biogás es más eficiente, ya que da más poder de calentamiento.

En cuanto a costos, la instalación para adaptar ambos combustibles a una central térmica como la analizada en el Capítulo 3, en el caso de un biodigestor de capacidad de 1000 m³ que se utiliza para la central analizada es de \$ 2,029.365 MXN, en cuanto a la inversión de la instalación tomando en un ingenio azucarero, en cuenta que se autoabastece, es de \$15,735 MXN/Kwh. , el kilogramo de estiércol para producir biogás es de \$0.2 MXN y el kilogramos de bagazo es de alrededor de \$0.147 MXN, casi cuestan lo mismo relativamente.

Entonces si se realiza el análisis Costo-Beneficio se observa que es mejor producir biogás para mantener una central eléctrica con biomasa que con bagazo de caña, pero se deben tener en cuenta otros factores, como los que se proponen en el capítulo 3, donde la central que usa bagazo sirve para autoabastecer un ingenio azucarero, entonces el bagazo no se tendría que comprar, pero los costos de instalación son muy altos, pues tan solo la caldera está en \$1,123,490 USD., aunque el sistema en el caso del bagazo tiene una eficiencia mayor (35% contra 32% del biodigestor).

4.4 Viabilidad de las propuestas de cogeneración de una central termoeléctrica con biomasa

Una de las principales ventajas de cogenerar o si se desea, generar únicamente con biomasa es el costo del combustible el cual es relativamente barato y en nuestro estado abunda, ya sea por medio de estiércol y desechos orgánicos, bagazo de caña de azúcar o de maíz, aserrín, etc.

Pero el costo de instalación en el caso de una central que usa bagazo es muy elevado si se plantea tener una central eléctrica el cual es de \$2, 624,180 USD por todo el equipo, ahora si se tiene en cuenta que esta inversión se recupera en 4 años aproximadamente, se puede decir que es un sistema muy rentable si se toma en cuenta que su eficiencia es

muy buena y más aun si se decide vender a CFE esta energía y no solamente autoabastecerse de ella.

En el caso de una central termoeléctrica que usa biodigestor lo único que disminuye el costo a comparación de la propuesta anterior es el precio del biodigestor, pero el precio del equipo sigue siendo elevado, sin embargo su eficiencia es buena y se puede decir que es muy buen proyecto, la recuperación de la inversión es más rápida y la rentabilidad de este sistema está más que demostrado en varias partes del mundo como son Centroamérica, España, China que fue donde surgió la idea y Alemania líder mundial en este tipo de centrales para cogeneración.

Entonces es un hecho que si se desea arriesgarse a utilizar este tipo de centrales termoeléctricas se tendrán resultados a corto y largo plazo favorables, en cuanto a rentabilidad y operación, además que es una realidad que en nuestro país este tipo de cogeneración se esta empezando a aprovechar y por lo tanto es una muy buena opción.

4.5 Costos

En cuanto a costos se refiere, la construcción de una central eléctrica es muy costosa, es por eso que el gobierno necesita muchas veces pedir prestamos para poner en funcionamiento proyectos tan grandes como lo es una central termoeléctrica, pero si se quiere poner una en funcionamiento de forma particular, se deben de pedir varios permisos y para su recuperación se debe vender la energía tanto a CFE como a la industria o al municipio donde se establezca la central.

4.5.1 Costo de una central termoeléctrica

El costo de una central termoeléctrica, ya sea utilizando biodigestor o en combustión directa de la biomasa, se puede medir por medio del costo de todos sus componentes los cuales se muestran en la tabla 4.2 (la cual hay que agregarle el costo del biodigestor en caso de la utilización de este que es de aproximadamente US\$ 195):

Tabla 4.2 Costos de elementos de una central termoeléctrica

<i>Elemento</i>	<i>Costo Kw. instalado (US\$/Kw.)</i>	<i>Costo (US\$)</i>
Caldera de vapor	529.95	1,123,490
Turbina de vapor	390.00	826,800
Generador eléctrico	97.47	206,640
Bomba de agua de alimentación	65.40	138,605
Sistema de enfriamiento	50.80	107,664
Calentador Auxiliar	28.20	59,805
Bomba de condensados	9.90	20,998
Otros	66.10	140,178
Total	1,237.82	2,624,180

- **Costos operativos**

Los costos para mantener en funcionamiento la central que incluyen la compra de combustible, los costos de generar, sueldos, equipo, material, así como los ingresos que se tienen de vender energía son de 6.5 millones de pesos por año, el costo del vapor según estimaciones es de \$43.7 MXN/ton y el costo de la energía eléctrica es de \$0.463 MXN/KWh a \$0.481/KWh. En la tabla 4.3 se muestra la posible cantidad de KW que podrían venderse tanto a CFE como a las industrias o a el municipio, según se de el caso, o según sea la comunidad en la que se establezca la centra, así como el tipo de biomasa que se vaya a utilizar, los datos de la tabla son aproximaciones.

Tabla 4.3 Estimación esperada de venta de energía eléctrica de la central

USO DE LAS ENERGIAS	UNIDAD	VENTAS DE EXCEDENTES A CFE E INDUSTRIAS	VENTA DE EXCEDENTES A CFE Y MUNICIPIOS
Energía eléctrica para autoabastecerse	KW	120	120
Venta de energía eléctrica a CFE	KW	1580	1580
Venta de energía eléctrica a industrias	KW	300	
Venta de energía eléctrica a municipios	KW		300

4.5.2 Análisis de la rentabilidad

Si se quiere tener una central termoeléctrica de forma particular, una vía para tener ingresos en caso que no se tenga el capital para establecerla es la solicitud de un préstamo.

Si se pide un préstamo se tienen cuatro escenarios probables: 2 tasas de interés (8% y 10%) con dos destinos de la energía eléctrica firme excedente (vender a industrias o municipios). En la tabla 4.4 se observa la rentabilidad con ambas posibilidades de venta, se puede observar que la recuperación de la inversión es de 4 años aproximadamente, lo cuál demuestra lo rentable del negocio.

Tabla 4.4 Rentabilidad de una central termoeléctrica

Parámetro	Unidad	Venta de excedentes a CFE e industrias		Venta de excedentes a CFE y municipio	
Tasa de interés	%	10.0	8.0	10.0	8.0
Periodo de recuperación	años	4.21	4.03	1.66	1.55
Valor presente neto	\$	62,215,329	76,534,733	157,951,304	199,320,749
Anualidad equivalente	\$/año	6,854,143	7,169,680	17,401,191	18,672,124
Tasa interna de retorno	%	23.8	24.8	37.1	37.7
Relación beneficio/ costo		1.98	2.24	3.95	4.33

4.6 Lista de gestiones para desarrollar un proyecto de energía de la biomasa

Para poder establecer una central termoeléctrica se deben realizar antes varias gestiones legales para ponerla en marcha. A continuación se enlistan las gestiones necesarias si la instalación es igual o mayor a 0.5 MW.

Gestiones para constituirse como sociedad

- 1.- Expedición del acta constitutiva (Notario)
- 2.- Solicitud de inscripción en el Registro Nacional de Inversiones Extranjeras (*SE*)
- 3.- Aviso del uso de los permisos para la constitución de sociedades (*SER*)
- 4.- Solicitud de inscripción al Registro Federal de Contribuyentes (*SAT*)
- 5.- Permiso para la constitución de sociedades (*SER*)
- 6.- Expedición de permisos de exportación (*SE*)

• *Gestiones para generar electricidad*

- 7.- Estudio de factibilidad de interconexión (*CFE*)
- 8.- Estudio de porteo (*CFE*)
- 9.- Solicitud de permiso de autoabastecimiento de energía eléctrica (*CRE*)
- 10.- Solicitud de permiso de cogeneración de energía eléctrica (*CRE*)
- 11.- Solicitud de permiso de producción independiente de energía eléctrica (*CRE*)
- 12.- Solicitud de permiso de pequeña producción de energía eléctrica (*CRE*)
- 13.- Solicitud de permiso de exportación de energía eléctrica (*CRE*)

• *Gestiones para obtener el servicio de respaldo*

- 14.- Contrato de interconexión (*CFE*)
- 15.- Convenio de compra-venta de excedentes de energía (*CFE*)
- 16.- Convenio de transmisión (*CFE*)
- 17.- Contrato de respaldo (*CFE*)

• *Gestiones ambientales y para aprovechamiento del recurso natural*

- 18.- Manifestación de Impacto Ambiental Particular (*SEMARNAT*)
- 19.- Manifestación de Impacto Ambiental Regional (*SEMARNAT*)
- 20.- Informe Preventivo (*SEMARNAT*)
- 21.- Autorización de cambio de uso de suelo en terrenos forestales (*SEMARNAT*)
- 22.- Informe de aprovechamiento de Vida Silvestre (*SEMARNAT*)

23.- Licencia ambiental única (*SEMARNAT*)

24.- Licencia de funcionamiento (*SEMARNAT*)

25.- Cedula de operación anual (*SEMARNAT*)

Gestiones para la instalación local

26.- Licencia de funcionamiento (LOCAL)

27.- Licencia de uso de Suelo (LOCAL)

28.- Factibilidad del Servicio de Agua Potable, Alcantarillado Sanitario y tratamiento de Aguas residuales (LOCAL)

29.- Factibilidad del servicio de energía eléctrica (LOCAL)

30.- Visto bueno de la unidad de Protección Civil (LOCAL)

31.- Factibilidad de giro (LOCAL)

32.- Licencia de construcción (LOCAL)

33.- Registro Público de la propiedad y del comercio (LOCAL)

34.- Manifestación de terminación de obra (LOCAL)

35.- Autorización de ocupación (LOCAL)

36.- Autorización para ampliación o modificación de una edificación (LOCAL)

- ***Gestiones para el reporte de actividades***

37.- Informe estadístico de operación eléctrica (*CRE*)

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Las conclusiones del presente trabajo de tesis son:

- La biomasa es una energía renovable que se encuentra en todo el planeta, además de que aporta gran cantidad de energía que con la infraestructura adecuada se podría aprovechar demasiado.
- La biomasa es uno de los principales combustibles utilizados en México, cerca del 80% de la energía generada a partir de biomasa proviene de leña, la cual es el principal combustible doméstico en las áreas rurales y segundo después del gas en las áreas urbanas.
- La biomasa como fuente de energía pueden ser usadas para la producción de energía ya que cubre un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas.
- Entre las principales ventajas del uso de la biomasa se encuentran que: produce muy pocas emisiones de CO₂, se obtiene el combustible de desechos que nadie utilizaría, disminuye la dependencia de combustibles fósiles. También se tienen ventajas en una central al usar biomasa, como son: su uso es mas limpio ya que no deja residuos en los componentes del equipo de la central, el costo del combustible es muy barato y se genera empleo.
- Entre las desventajas que se tienen en el uso de la biomasa es que el rendimiento es menor, ya que el poder calorífico del combustible es menor que el de los fósiles, requiere mayor mantenimiento que otro tipo de centrales termoeléctricas, el costo de transporte es mayor si no se instala en lugares donde la biomasa este al alcance y el costo de operación es muy elevado.
- El inconveniente más importante de este tipo de proyecto es el de poder generar la cantidad deseada si se está consciente que el combustible de biomasa no es tan eficiente como el de combustibles fósiles, entonces una forma de solucionar este problema es utilizar ambos combustibles, en este caso utilizar la biomasa,

cualquiera que sea, como combustible principal y a la vez utilizar el carbón para recalentar agua y poder así tener un sistema eficiente, además que nos va a ahorrar dinero y va a aumentar la potencia del sistema.

- En comparación con otro tipo de centrales, ya sean solares o que utilicen carbón mineral, la eficiencia es competitiva, por lo que es una muy buena opción para generar energía eléctrica.
- Los costos son elevados para la instalación de una central de este tipo sin embargo, la rentabilidad es buena y la recuperación del capital invertido no pasa de 5 años, además que los tramites para poner a funcionar una central de forma particular son claros, aunque si muchos y en nuestro país los tramites suelen durar mucho tiempo para conseguir una licencia.
- En las propuestas hechas se observó que la eficiencia cumple con la mínima requerida y por lo tanto se puede decir que es competitiva.

5.2 Recomendaciones

- Si se va a utilizar la biomasa como fuente de energía se debe evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan.
- Para realizar una propuesta de una central termoeléctrica que usa cualquier tipo de biomasa se deben tomar ciertas consideraciones, como son: lugar donde se va a construir, tipo de combustible, elementos de la central (caldera, bombas, turbogenerador, etc.), potencia que se requiere, la eficiencia que se obtiene, etc.
- Otro inconveniente principal son los costos, costo de instalación, de mantenimiento, de operación, de equipo, todos estos suman una fuerte cantidad de capital, que se puede solucionar si se pide apoyo a una institución financiera y poder así reducir la elevada inversión. Si se pide un préstamo se puede estar pagando a la par que se tiene en funcionamiento ya sea vendiendo energía a CFE y las industrias o para autoabastecimiento y en un largo plazo saldar la deuda.

Referencias

Internet:

[FAO 1996]

FAO. Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa. 7 de abril del 2008. <http://www.fao.org/docrep/T2363S/t2363s0y.htm>

[Geocities 2000]

CONAE. Energías renovables. 26 de febrero del 2008.
www.conae.gob.mx/renovables/biomasa.htm

[Textos Científicos 2006]

Textos Científicos. Energías Alternativas. 26 de febrero del 2006.
<http://www.textoscientificos.com/energia/biomasa>

Bibliografía

[Carless 1995]

Jennifer Careless

Energía Removable: Guía de alternativas ecológicas

Edamex, 1995

[Ortega 2000]

Mario Ortega Rodríguez

Energías Renovables

Editorial Paraninfo, 2000

[Haywood 1986]

R. W. Haywood

Análisis Termodinámico de Plantas Eléctricas

LIMUSA, 1986

[Aguliar 1981]

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez

Criterios de Diseño de Plantas Termoeléctricas

LIMUSA, 1981.