

## **ANEXO 2**

# **Estimación del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa Como Energético Renovable en México**

**Omar R. Masera  
Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM**

**Javier Aguillón  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

**Benjamín Gamino,  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

**Agosto 2005**

## Índice

	<b>Página</b>
1. Introducción	4
2. Plantaciones energéticas para producción de combustibles leñosos	6
2.1. Recurso disponible	6
2.1.1. Combustibles de madera directos	6
2.1.1.1. Madera de bosques naturales	6
2.1.1.2. Madera de plantaciones	7
2.1.2. Combustibles de madera indirectos	7
2.2. Tecnología de aprovechamiento de combustibles biomásicos	10
2.3. Prospectivas tecnológicas a 10 y 25 años	11
3. Plantaciones energéticas y uso de residuos para producción de combustibles líquidos (alcoholes y biodiesel)	14
3.1. Plantaciones de especies oleaginosas (girasol/soja) para obtención de biodiesel	14
3.1.1. Recurso disponible	14
3.1.2. Tecnología de biodiesel y costos	14
3.2. Etanol	18
3.2.1. Recurso Disponible	18
3.2.2. Tecnología de etanol y costos	18
3.3. Prospectiva tecnológica del biodiesel y etanol a 25 años	19
4. Producción de residuos agrícolas (bagazo de caña, maíz, cascarilla de arroz, cáscara de coco)	21
4.1. Recurso disponible	21
4.2. Tecnología para el aprovechamiento de residuos agrícolas y agroindustriales	23
Referencias	25
Anexo A: Tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa agrícola y agroindustrial	33
1. Calderas de combustión	33

2. Gasificadores	41
2.1. Grupo electrógeno de gas de madera (33 KW), Paraguay	54
2.2. Grupo electrógeno con gasificador en Sri Lanka (32 KW)	61
2.3. Grupo electrógeno con gas de madera en Paraguay	65
2.4. Vehículos con gas de madera (Suecia)	69
2.5. Gasificación de biomasa cañera en Cuba	81
2.6. Generación de energía con gasificación de biomasa en China	82
3. Hornos de pirolisis	87
3.1 Producción eficiente del hidrógeno a partir de la biomasa	90
Anexo B: Tecnologías para la producción de etanol y biodiesel	94
4. Plantas para la obtención de alcoholes	94
4.1. Estudio a partir de la caña, caso México	104
4.2. Planta de Salamanca, España	106
4.3. Planta de Momotombo, Nicaragua	108
5. Otras tecnologías (plantas para la obtención de biodiesel)	109
5.1. Plantas a base de aceite de girasol	114
5.2. Plantas a base de aceite de soja	115

## 1. Introducción

El trabajo que a continuación se presenta es un primer esfuerzo hacia la estimación de recurso y prospectiva tecnológica de la biomasa como energético renovable en México. Pretende dar un panorama general estimando la situación actual de plantaciones energéticas, de producción de alcoholes a partir de biomasa así como de producción de residuos agrícolas, tanto a escala mundial como en nuestro país.

El informe abarca estimaciones muy generales del recurso de biomasa, costos de producción, análisis tecnológico, costos de inversión y de producción de energía; y prospectiva tecnológica a 25 años en cada uno de los rubros mencionados anteriormente. Cabe resaltar que dichas estimaciones se realizaron con limitaciones en términos de acceso a información económica para la producción de energía térmica y eléctrica. También se enfrentó el reto de hacer estimaciones generales de los recursos agrícolas en México pues no existen estudios de disponibilidad de biomasa como energía en este rubro. Por estos motivos las cifras presentadas son preliminares y deben mejorarse a partir de estudios más profundos que proporcionen certitud metodológica a las estimaciones documentales presentadas en este informe.

La biomasa es una componente muy importante de la energía que actualmente se consume en el mundo, llegando a cerca del 11% del consumo total mundial (IEA, 1998). En muchos de los países en vías de desarrollo la biomasa es la más importante fuente de energía, llegando a cerca del 35 % del total (WEC, 1994). En total, se estima que 46 Exajoules (EJ) de la energía primaria global se derivan de la biomasa; con 85% por uso "tradicional" (leña, abono), y 15% en uso industrial, como combustibles, procesos Calor y Energía Combinados (CHP), y Electricidad.

Los siguientes datos muestran la importancia del uso de bioenergía en el mundo:

- 11 millones de hogares se iluminan con biogás
- 250 millones de estufas eficientes de leña
- 38,000 MWe de capacidad instalada para producción de electricidad
- 30 mil millones de litros/año de etanol
- 180 millones de personas viven en países con normas para mezclar etanol con gasolina

Los países desarrollados están incrementando el uso de la biomasa con el fin de reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub> y respetar así los convenios adquiridos en el marco del protocolo de Kyoto recién firmado. Se estima que la participación en cuanto a producción de energía por biomasa, vaya en aumento en los próximos años hasta conformar en el próximo siglo el 25% del total mundial.

En nuestro país la bioenergía representa el 8% del consumo final de energía. Es una fuente importante de energía renovable que puede generar múltiples beneficios en los Estados y Municipios de nuestro país. Las estimaciones hechas en este informe indican que se pueden tener potenciales aprovechables de 1,519-3,034 PJ/año en combustibles leñosos, 168 PJ/año para la obtención de etanol y biodiesel mediante desechos de azúcar/almidón y oleaginosas; y 886 PJ/año por los subproductos agrícolas y agroindustriales. Estas estimaciones que muestran el gran potencial biomásico de México y que abre un enorme campo de oportunidades tecnológicas, económicas y políticas para el mejor aprovechamiento de dichos recursos.

## 2. Plantaciones energéticas para producción de combustibles leñosos

### 2.1. Recurso disponible

Los combustibles leñosos tienen varias aplicaciones, pueden utilizarse directamente como combustibles sólidos –ya sea como leña, astillas o carbón vegetal- o gasificarse. Incluso existen procesos para convertirlos a combustibles líquidos como etanol. Las principales aplicaciones son la producción de energía térmica y la producción de electricidad.

En México el uso principal de los combustibles es como leña y carbón, principalmente para combustible doméstico en hogares rurales y para un número importante de pequeñas industrias (ladrilleras, mezcaleras, hornos de alfarería y muchas más).

La estimación del recurso disponible proviene de la metodología desarrollada por Ghilardi y Riegelhaupt (2005). En esta metodología, siguiendo la metodología de FAO (2001) se desagregan los recursos forestales en: a) combustibles de madera directos provenientes ya sea de bosques naturales o de plantaciones energéticas y b) combustibles de madera indirectos, provenientes de la industria de aserrío.

#### 2.1.1. Combustibles de madera directos

Incluyen a la biomasa leñosa (viva o muerta) directamente extraída de árboles y arbustos que crecen en bosques naturales, en plantaciones, y fuera de los bosques. Se excluyen las partes de los árboles que se destinan a usos no energéticos (madera para aserrar, para construcción, celulosa y papel, entre otros).

##### 2.1.1.1. Madera de bosques naturales

El cálculo del recurso disponible toma en cuenta las existencias de madera de los bosques de México –obtenidas Inventario Forestal Nacional 1994 (IFN 1994) y de Jiménez (1990) y Riegelhaupt (2005, *com. pers.*). Las existencias se afectan luego por un coeficiente de expansión de la biomasa, que representa la relación entre el volumen total de los árboles y el volumen maderable (“de fuste limpio”) reportado por el IFN 94 y el peso específico promedio de la madera de cada formación a fin de obtener las existencias totales, en toneladas de materia seca (tMS). Se obtiene posteriormente la productividad volumétrica ( $m^3/ha/año$ ) utilizando estimaciones directas o estimadores porcentuales basados en las existencias máximas ( $m^3/ha$ ) y el tiempo de desarrollo de la cobertura completa (años). Para transformar la productividad volumétrica ( $m^3/ha/año$ ) en productividad gravimétrica (tMS/ha/año), se le afectó por el peso específico medio (tMS/ $m^3$ ) del respectivo grupo de maderas en cada categoría.

Estas estimaciones se ajustan finalmente por un factor de accesibilidad de los bosques –que toma en cuenta la distancia a caminos, pendientes, restricciones legales como ser áreas naturales protegidas y otros criterios-.

De acuerdo con la Tabla 2-1, se registra para México un potencial técnico de **748-1,287 PJ/año**. Este potencial es conservador, pues las productividades promedio estimadas en el Inventario Nacional Forestal de 1994 son muy bajas. Debe destacarse también que la estimación supone el uso energético como **complemento** y no como uso exclusivo de los bosques naturales.

### **2.1.1.2. Madera de plantaciones**

La experiencia actual de México en plantaciones forestales es reducida comparada con otros países como Brasil o del Sudeste Asiático. En los últimos años sin embargo, ha aumentado mucho esta actividad, debido principalmente a los subsidios que otorga el gobierno vía el Programa PRODEPLAN y por el precio atractivo de las maderas preciosas. La Comisión Nacional Forestal estima el establecimiento de 875 mil ha de plantaciones con fines de producción de madera en rollo y papel en México para el 2025.

Es importante que las plantaciones no se establezcan en bosques naturales por este motivo para la estimación del recurso disponible se incluyeron solamente las **áreas de vocación forestal con vegetación secundaria**. Asimismo, se utilizó un método multi-criterio ligado a una plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se consideraron 5 criterios: 1) coberturas con vegetación secundaria, 2) pendientes menores a 15°, 3) superficie accesible físicamente alrededor de localidades y al costado de carreteras principales, 4) clasificación del suelo, y 5) precipitaciones totales anuales.

Se obtuvieron superficies con diferentes potenciales para el establecimiento de plantaciones forestales. Las variaciones en el potencial se ven reflejadas en las tasas de productividad esperada. De manera agregada, se estima que existe un total de 16.3 millones de ha con potencial para el establecimiento de plantaciones energéticas. El potencial energético alcanza entre **450 y 1,246 PJ** dividida en 42-71 PJ/año en plantaciones de alta productividad, 318-636 PJ/año en plantaciones de productividad media y 90-540 PJ/año en plantaciones de productividad baja.

### **2.1.2. Combustibles de madera indirectos**

Se consideraron dos categorías generales: a) sub-productos de la extracción forestal, que corresponden a los desechos maderables que se generan durante las prácticas de extracción de la madera comercial (en rollo) y b) sub-productos de la industria maderera, que corresponden a los desechos que se generan principalmente en los aserraderos. Las existencias de residuos combustibles de madera a partir de la extracción forestal se estimaron mediante el volumen de la producción forestal maderable, el cual se obtuvo del anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos publicado por INEGI en el año 2003. Este valor se afectó por un coeficiente de generación de residuo (madera total/madera comercial) y por el peso específico promedio de la madera comercial. Las existencias de residuos combustibles de madera como desecho de la industria maderera se estimaron mediante la proporción de la producción forestal maderable que se destina a la industria del aserrío (construcción, muebles, chapa y triplay, empaques, electricidad y telefonía, y ferrocarriles). El volumen total fue afectado por un coeficiente de generación de residuos y por el peso específico de la madera.

El volumen total aprovechable de residuos forestales se estima en **72 PJ/año**, de estos últimos 31 PJ/año corresponden a subproductos de la extracción forestal y 41 PJ/año de subproductos de la industria forestal (Tabla 2-3). Tomando en cuenta los combustibles directos e indirectos de la madera, podemos concluir que el potencial energético total de los combustibles leñosos es de **1,519 a 3,034 PJ/año**.

**Tabla 2-1: Combustibles de madera directos**

Formación	Superficie total	Superficie accesible (a)	Volumen en pie (b)	Factor de uso energético (c)	Productividad gravimétrica (d)	Incremento anual de madera para energía (e)	Equivalente en energía primaria (f)
	km <sup>2</sup>	Millones ha <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> r/ha	coeficiente	tMS/ha/año	Millones tMS/año	PJ/año
<b>TOTAL</b>	32.9	16.3 - 26.9				<b>49,9 - 85,8</b>	<b>997 -1,716</b>
BOSQUES	30.8	17.0 -25.5	64	0.55	0.96	15,7 - 26,0	314 – 519
SELVAS	55.4	11.5 -27.0	39	0.80	1.11	18,9 - 28,3	378 – 566
MATORRAL	2.2	0.9 – 1.5	15	0.95	0.84	9,7 - 22,8	193 - 455
VEGETACION HIDRÓFILA	32.9	16.3 - 26.9	100	0.9	6.00	5,6 - 8,8	112 - 176

Notas: (a) El rango de superficie accesible se obtuvo utilizando áreas buffer mínimas y máximas alrededor de las localidades y a cada lado de las carreteras principales. (b) el volumen en pie de bosques y selvas se obtuvieron del IFN 94, de vegetación hidrófila de Jiménez (1998) y de matorrales Riegelhaupt (2005, *com. pers.*). (c) Los coeficientes de uso energético se obtuvieron a partir del porcentaje de madera aprovechable para fines no combustibles (i.e. madera comercial en rollo). (d) Los valores de productividad volumétrica de bosques se obtuvieron del IFN 94. Para las selvas, matorrales y vegetación hidrófila se utilizaron estimadores porcentuales basados en las existencias máximas en metros cúbicos en por hectárea (m<sup>3</sup>/ha) y el tiempo de desarrollo de la cobertura completa (años). Los valores de productividad volumétrica se afectaron por el factor de uso energético y por el peso específico de la madera para obtener la productividad gravimétrica en toneladas de materia seca por hectárea por año (e) El incremento anual de madera para energía se obtiene como el producto de la superficie por la productividad por el factor de uso energético. (f) Se utilizó un contenido energético promedio de 20 Giga joules por tonelada.

**Tabla 2-2. Potencial técnico de plantaciones forestales según vocación forestal del suelo y precipitaciones totales anuales.**

Categoría según índice	Superficie potencial para plantaciones	Productividad gravimétrica promedio	Incremento anual para energía	Equivalente energía primaria
	Millones ha	tMS/ha/año	tMS/año	PJ/año
0.1-0.3	10.0	0.5 - 3.0	4.5 - 27	90 – 540
0.4-0.6	5.9	3.0 - 6.0	15.9 – 31.8	318 – 636
0.6-1	0.4	6.0 - 10.0	2.1 – 3.5	42 - 71
<b>TOTAL</b>	16.3		<b>30.8</b>	<b>450 – 1,246</b>

Notas: Factor de uso energético = 0.9, Contenido energético = 20 GJ/tMS. El índice refleja la aptitud de los terrenos para el establecimiento de las plantaciones y se ve reflejado en su productividad. El índice varía entre 0.1 (bajo) y 1 (alto) y se determinó mediante un método multicriterio ligado a un sistema de información geográfica. La superficie estimada para plantaciones se determina en millones de hectáreas. Para más detalles consultar Ghilardi y Riegelhaupt (2005).

**Tabla 2-3. Combustibles de madera indirectos**

Categorías	Año	Volumen de la producción forestal maderable o de la producción maderera aserrada (a)	Coefficiente de generación de residuos (b)	Existencias de residuos con potencial energético	Equivalente de energía primaria (c)
		m <sup>3</sup> r	coeficiente	tMS/año	PJ/año
<b>TOTAL</b>					<b>72</b>
Subproductos de la extracción forestal	2001	8124571	0.5	2031143	41
Subproductos de la industria maderera	2001/1998	6134051	0.5	1533513	31

Notas: (a) El volumen de la producción forestal maderable (sub-productos de la extracción forestal) se obtuvo del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA-SIAP 2003). El volumen de la producción maderera aserrada se obtuvo mediante la proporción del la producción forestal total que se destina a la industria del aserrío (construcción, muebles, chapa y triplay, empaques, electricidad y telefonía, y ferrocarriles). Esta Proporción se obtuvo del Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI 1998). La información se presenta en metros cúbicos en rollo (m<sup>3</sup>r). (b) Los coeficientes de generación de residuos corresponden: 1) la fracción de la extracción forestal que no tiene una utilidad comercial distinta del uso energético y 2) la fracción de la madera que se pierde como residuos de los aserraderos. (c) Se utilizó un contenido energético promedio de 20 Giga joules por tonelada.

## 2.2. Tecnología de aprovechamiento de combustibles biomásicos

Los procesos termoquímicos de conversión se basan en someter los combustibles biomásicos a la acción de altas temperaturas y pueden dividirse en tres amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo con exceso de aire (combustión), en presencia de cantidades limitadas de aire (gasificación) o en ausencia completa del mismo (pirólisis). Los materiales más idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido en humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, bagazo, residuos agrícolas y cáscaras en general.

Las tecnologías más comunes utilizadas en el aprovechamiento de combustibles biomásicos a mediana y gran escala son: las calderas acuotubulares, pirotubulares, quemadores de ciclón, calderas de lecho fluidizado burbujeante y circulante, los quemadores de astillas y pellets, los gasificadores en sus distintas modalidades y los hornos de pirólisis entre los que se encuentran el sistema Torrax y Landgar. Para el caso de pequeña escala se encuentra la tecnología de estufas de leña domésticas e industriales, así como los hornos de ladrillos cerámicos y alfareros. Cabe resaltar que la principal diferencia entre estas tecnologías se da principalmente por el costo del combustible, de la eficiencia y de la escala, es decir instalaciones más grandes tendrán las mejores ventajas comerciales. La descripción tecnológica de conversión a energía eléctrica y térmica así como las características de funcionamiento de las diversas tecnologías mencionadas y los casos de estudio analizados se presentan ampliamente en el Anexo "A" de este informe.

La Tabla 2-4 muestra el costo de la leña y aserrín estimado de la operación forestal de un aserradero en México. Además se observan tres principales procesos de conversión termoquímica de la biomasa forestal y agrícola - combustión, gasificación y pirólisis-, para cada proceso se especifican la tecnología disponible así como el rango de capacidades, los costos de inversión y unitarios promedios, la situación actual en el país así como el costo del producto obtenido.

La tecnología de calderas y quemadores de astillas y pellets se pueden encontrar en la literatura en capacidades de 0.5-25 MW<sub>e</sub> o de 450-750 kW<sub>t</sub>, con inversiones de 1.3-27.5 millones de dólares americanos (MUS) o costos producto eléctrico promedio de 41.8 US/MW<sub>e</sub>h para la escala de 0.5-5 MW<sub>e</sub> y costos de producto térmico de 4.9 US/MW<sub>t</sub>h para la escala de 750 kW<sub>t</sub> con eficiencias globales que varían del 30-60%, las eficiencias más altas se encuentran en sistemas de cogeneración.

La tecnología de aprovechamiento de combustibles leños a pequeña escala, estufas eficientes de leña y hornos cerámicos han sido estudiados en el Estado de Michoacán por el Centro de Ecosistemas de la UNAM y el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada GIRA y el CIECO de la UNAM. Los costos van de 35 a 70 dólares por estufa eficiente y de 1,000 a 2,500

dólares para hornos de tiro invertido para alfarería. Para las estufas el tiempo de recuperación de la inversión alcanza menos de un año y el costo de vida anualizado es de aproximadamente 140 dólares.

La tecnología de gasificación de biomasa se encuentra en algunos casos en etapa de desarrollo, a pequeña escala podemos encontrar gasificadores atmosféricos desde 32 kW<sub>e</sub> hasta 1.4 MW<sub>e</sub> que están acoplados principalmente a motores de combustión interna cuya principal desventaja es la limpieza en el gas de síntesis, además se requiere hacer esfuerzos para aumentar su eficiencia global que en promedio es del orden de 25%; países como China, India, Indonesia han tenido éxito en la gasificación a pequeña escala utilizando cáscaras de arroz.

Por otra parte, la mediana y gran escala de 2 – 44 MW<sub>e</sub>, cubren otro tipo de propósitos, se encuentran sistemas acoplados con ciclos combinados y en muchas ocasiones se utiliza la biomasa mezclada con carbón, además se puede obtener diversos tipos de productos como vapor, hidrógeno, combustibles líquidos, entre los más importantes o acoplarse a otros procesos industriales como la fabricación de metales o aluminio o la industria química.

La gasificación con biomasa en el mundo tiene eficiencias globales del 25-45% y con capacidades térmicas del orden de 4 - 420 MW<sub>t</sub>, el costo de inversión que se encuentra en la literatura es de 1,100 a 2,000 USD/kW<sub>e</sub>, con subsidios gubernamentales en algunos casos.

La pirólisis es un proceso de oxidación parcial y controlada (quemado casi en ausencia de aire), a temperatura elevada (~550°C), que permite obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquido (efluente piroleñoso) y gaseosos (gas pobre), esta tecnología está aun en etapa de investigación y desarrollo.

### **2.3. Prospectivas tecnológicas a 10 y 25 años**

Es bien sabido que la evolución de la tecnología depende de factores económicos, políticos y sociales que muchas veces no pueden predecirse, en este apartado se expondrán argumentos que fueron adquiridos con base en la experiencia y que representan una estimación de lo que posiblemente ocurrirá con las diferentes tecnologías en 25 años.

Las tecnologías que utilizan el proceso de conversión de combustión se mantendrán vigentes en al menos los próximo 10 años, algunos desarrollos tecnológicos (refractarios, nuevos materiales de intercambio de calor que soporten altas temperaturas y corrosión, equipos auxiliares con mayores rendimientos, filtros cerámicos, etc.) aumentaran la eficiencia global de las calderas y quemadores de pilas por lo que los costos de generación de energía eléctrica y térmica disminuirán. La utilización de la biomasa con carbón aumentará sobre todo en aquellos países que cuentan con grandes reservas de carbón. Las calderas aumentaran sus presiones y temperaturas de trabajo

con el fin de hacer más eficientes los procesos por lo que el funcionamiento de este tipo de equipos en 25 años será una realidad.

La tecnología de gasificación tiene un porvenir prometedor tanto en la utilización de biomasa, de desechos agrícolas y agroindustriales, desechos Municipales y con carbón, en 10 años, nuevas centrales de generación serán construidas a gran escala (600 MW<sub>e</sub>) y serán comercialmente rentables. La generación de otros productos diferentes a los eléctricos y térmicos será una realidad, es decir se podrán producir combustibles líquidos tales como etanol y biodiesel, así como productos con gran valor económico entre los que se encuentran el amoníaco y el hidrógeno. El desarrollo de membranas especiales para separar oxígeno del aire, así como el desarrollo de nuevos diseños de turbinas de gas reducirá el actual costo de generación eléctrica en los gasificadores y aumentará hasta en 60% la eficiencia global de las instalaciones. En el aspecto ambiental, la gasificación ha probado ser una tecnología limpia y con el secuestro de CO<sub>2</sub>, los gobiernos de países desarrollados darán mayor apoyo a esta tecnología que tiende a ser sustentable.

Actualmente, hay varias investigaciones que tienden a unir la tecnología de gasificación con las celdas de combustibles que trabajan con hidrógeno, desarrollos que pretenden la generación de energía eléctrica sin ningún componente mecánico, lo que traería un aumento importante en la eficiencia global de los sistemas (hasta 70%) y por consiguiente habrá una reducción de los costos de generación. Sin embargo, el desarrollo comercial de este acoplamiento no estará maduro antes de 10 años. Otro nicho de oportunidad se encuentra en la utilización de los gasificadores para la producción de hidrógeno a partir de la biomasa, elemento con gran valor comercial por los grandes desarrollos tecnológicos que actualmente se desarrollan en el mundo (automóviles y autobuses con celdas de combustible, refrigeradores domésticos, pequeños generadores eléctricos, entre otros). Se estima que en 10 años la producción de hidrógeno por medio de la biomasa será una tecnología probada que tendrá gran desarrollo y crecimiento en 25 años.

En pequeña escala, la tecnología de gasificación está teniendo un gran impulso en varios países, la idea de utilizar desechos agrícolas y municipales biomásicos para generar energía eléctrica a pequeña escala (0.1-1 MW<sub>e</sub>) es actualmente una realidad. Se estima que en 10 años se impulse el desarrollo de gasificadores de pequeña escala sobre todo en países en vías de desarrollo, se mejore la tecnología de motores de combustión interna con el fin de aumentar la eficiencia global (hasta 40%), además se espera que los gasificadores a pequeña escala se puedan adaptar a bombas, molinos, tractores, pequeños barcos, entre otros. En 25 años se estima que el gasificador a pequeña escala será una pieza importante en el suministro de energía, eléctrica, térmica y motriz. Habrá también aplicaciones a nivel doméstico, donde se espera una penetración muy importante de estufas eficientes de leña (3<sup>a</sup> generación).

El proceso de conversión de la biomasa por medio de los Hornos de Pirólisis están actualmente en la etapa de investigación, se estima que en 5 años esos desarrollos estarán maduros y la producción combustibles sólidos, líquidos y

gaseosos por medio de esta tecnología serán rentables. En un escenario de 25 años, se estima que este tipo de Hornos serán altamente comerciables para la producción de hidrógeno.

**Tabla 2-4: Costos de la biomasa, inversión de las instalaciones, energía útil y situación actual de la tecnología**

Plantaciones y cultivos energéticos										
Residuos lignosos: residuos forestales										
Proceso de conversión	Tipo de combustible	Combustibles (\$/ton) (a)	Tecnología	Escala	Costos de inversión (US\$) (b)	Costo unitario (US\$/MW) (c)	Productos obtenidos	Costo producto (US\$/MWh) (b)	Situación actual (b)	
Combustión	Residuos forestales:		Mediana escala:	<i>Eléctricas</i>					Hasta Febrero del 2005, no existen casos de plantas en México (1).	
	Leña	67.2	Calderas pirotubulares	0.5-5 MW	1,296,000 - 7,875,000	2,952,000 - 1,575,000	Energía eléctrica	41.8		
	Aserrín	33.0	Calderas acuaturbulares	5-12 MW	7,875,000 - 15,480,000	1,575,000 - 1,290,000	Energía eléctrica	ND		
			Calderas de lecho fluidizado	12-25 MW	15,480,000 - 27,750,000	1,290,000 - 1,110,000	Energía eléctrica	ND		
			Quemadores de pilas	≤ 25 MW	≤ 27,750,000		Energía eléctrica	ND		
			Quemadores de ciclón	<i>Térmicas</i>						Ya existen de manera comercial (2).
			Quemares de astillas	450 kW	875,194	1,944,875	Energía térmica	ND		
			Quemadores de pellets	600 kW	994,194	1,656,990	Energía térmica	ND		
				750 kW	1,123,490	1,497,986	Energía térmica	4.9		
				Pequeña escala:	<i>Térmicas</i>					
			Estufas domésticas	3-5 kW	30-70	NA	Energía térmica	NA	Existen experiencias en el país	
			Hornos de ladrillos cerámicos	5-15 kW	1,000-3,000	NA	Energía térmica	NA	Existen experiencias en el país	
Gasificación	Residuos forestales:		Gran y mediana escala:						No existen casos en el país, aunque si a escala mundial (3).	
	Leña	67.2	Gasificador de tiro invertido	1.4 MW	1,993,750	1,424,107	Energía eléctrica	39.0		
	Aserrín	33.0	Gasificador de tiro invertido	44 MW	52,800,000	1,200,000	Energía eléctrica	ND		
			Pequeña escala:						Aislado a escala mundial, existen aplicaciones exitosas en Suecia (4)	
			Gasificadores para camiones	0.04 MW	11,020	275,500	Combustible gas	ND		
		Gasificador de tiro invertido	0.032 MW	32,000.00	1,000,000	Energía eléctrica	171.0			
Pirólisis	Residuos forestales:		Hornos para pirólisis con:	164 MW	142,000,000	865,854	Combustible gas		No existen casos de aplicación en el país, a escala mundial aún se encuentran en desarrollo (5).	
	Leña	67.2	Sistema de Torrax o	(320,000 ton/año)				ND		
	Aserrín	33.0	Sistema de Landgar	77 MW	88,000,000	1,142,857	Combustible gas			
				(150,000 ton/año)					ND	
				46 MW	53,000,000	1,152,174	Combustible gas		ND	
				(90,000 ton/año)						
			Sistema hidrógeno	6.4 MW (2,790 m <sup>3</sup> /h)	3,950,000	617,188	Hidrógeno	108	En investigación y desarrollo (6).	

Notas: (a) El costo del recurso se encuentra expresado en pesos mexicanos (2003-2004) por cada tonelada. (b) El costo de inversión, el costo unitario, la situación actual de la tecnología y el costo del producto se obtuvieron de los casos de estudio mostrados en los anexos. (ND) No disponible. (NA) No aplica.

1. Costos de la tecnología para generación de electricidad 2001.

2. Fuente: Comercializadora Flexible, México, Diciembre del 2004.

3. Fuente: <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s06.htm>

4. Fuente: <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s04.htm>

5. Fuente: [http://www.fjarabo.quimica.ull.es/Biomasa/bio04/bio04\\_41.htm](http://www.fjarabo.quimica.ull.es/Biomasa/bio04/bio04_41.htm)

6. Fuente: Waichi Iwasaki. Consideraciones de la eficacia económica en la producción de hidrógeno a partir de la biomasa. NEDO. Japón. 22 de enero del 2003.

### **3. Plantaciones energéticas y uso de residuos para producción de combustibles líquidos (alcoholes y biodiesel)**

Los biocombustibles, han adquirido importancia significativa en Brasil, Europa, los Estados Unidos, y otros países pertenecientes a la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE). Existen dos aplicaciones principales: las dirigidas a la obtención de biodiesel y aquéllas orientadas a la producción de alcoholes, principalmente etanol y metanol.

#### **3.1. Plantaciones de especies oleaginosas (girasol/soja) para obtención de biodiesel**

##### **3.1.1. Recurso disponible**

El biodiesel puede elaborarse esterificando de 80 a 90% de aceite vegetal o grasa animal, con el 10 a 20% de metanol y de 0.35 a 1.5% de un agente catalizador a temperatura controlada. Las fuentes más importantes de biodiesel son la palma de aceite, la colza, la soja, el aceite de ricino, el maíz y el girasol. Otras fuentes de biodiesel son el aceite usado para cocinar y las grasas animales.

Se estimó el potencial de maíz y la caña de azúcar para la producción de etanol, y de soja y girasol para la producción de biodiesel. Se partió de la producción total de cada cultivo a partir del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA - SIAP 2003). Se afectó este valor por un coeficiente de generación de combustible (Kartha y Larson 1999; Riegelhaupt 2005, *com. pers.*).

El potencial estimado es muy preliminar pues la producción actual de plantas oleaginosas es baja en el país (Tabla 3-1).

##### **3.1.2. Tecnología de biodiesel y costos**

Las tecnologías empleadas para la producción de biodiesel, son las que emplean los aceites vegetales como el girasol y la soja principalmente; en el proceso de obtención las semillas son prensadas mecánicamente para extraer el aceite y puede emplearse solventes para aumentar el rendimiento. En el caso de la soja, el aceite es separado sólo por acción de solventes. Estos aceites permiten reemplazar al gas-oil en los motores de combustión interna, de ahí su importancia energética. También es posible producir combustible para motores diesel por trans-esterificación de los aceites vegetales formando lo que se ha llamado biodiesel, la descripción de este proceso se presenta ampliamente en el Anexo "B" de este informe.

La producción mundial de biodiesel se estima un millón de toneladas por año, siendo los principales productores Brasil, Estados Unidos y Europa, sin embargo China ya construyó la mayor planta de etanol y piensa construir otra en el mediano plazo.

Actualmente los biocombustibles tienden a usarse como mezclas, en Europa usan el B5 el cual contiene el 5% de biodiesel, porcentaje que deberá duplicarse para el 2010, en Francia, todos los combustibles diesel poseen un mínimo del 1% de biodiesel y en Alemania, el biodiesel se comercializa en más de 350 estaciones de servicio y su empleo es común en los cruceros turísticos que navegan en sus lagos. Los Estados Unidos tiene la mezcla B20 elaborada con 80% de diesel de petróleo y 20% que con aditivos puede usarse con temperaturas por debajo de -20 °C. Canadá esta desarrollando la tecnología para producir biodiesel a partir de los residuos de madera, y en Brasil se ha lanzado un nuevo programa de biodiesel a partir de soya, combustible que será exportado a la Unión Europea. Sin embargo, es necesario comentar que la mayor parte de los productores de biodiesel están subsidiados por los gobiernos, lo que hace que los precios aún no sean competitivos sin dicho subsidio. Se espera que en 5 años la tecnología de producción de biodiesel sea completamente competitiva.

El Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey junto con empresarios interesados en el tema, están desarrollando la primera planta experimental de Biodiesel en México, sin embargo fuera de este ejemplo no hay otra referencia en nuestro país.

En la tabla 3-2 se muestra el costo en México del aceite de soya y del aceite de girasol (materia prima para la obtención del biodiesel), se observan dos diferentes tipos de tecnología de conversión de la biomasa: procesos a base de aceite de soya cuyo costo de producto es de 0.57 US/l para una producción 182,500 ton/año y procesos a base de aceite de girasol con un costo promedio de 0.52 US/l para diferentes capacidades, además en cada proceso se especifican la magnitud de las inversiones requeridas según la escala de la planta así como la energía útil producida.

**Tabla 3-1: Potencial técnico de recursos para la obtención de biodiesel y alcoholes.**

Categorías	Tipo	Producto o desecho bruto con potencial energético	Producto elaborado con potencial energético	Año	Superficie cosechada (ha) (a)	Producción (ton) (a)	Rendimiento de producción del combustible litros de combustible/ha ó ton según corresponda (b)	Producción de combustible (l)	Equivalente en energía primaria PJ/año (c)
<b>TOTAL</b>								8,239,211,739	<b>196</b>
Azúcar/almidón	Maíz	Grano	Etanol	2000	---	17,191,073	325	5,587,098,725	131
	Caña de azúcar	Melaza		2000	---	31,592,202*	75	2,369,415,184	55
		Jugo							
Oleaginosas	<b>Sorgo</b>	Semillas	Aceite/ biodiesel	2000	<b>1,743,521</b>	<b>5,842,308</b>	n.d.	n.d.	n.d.
	Soja			2000	56,473	---	420	23,718,660	0.81
	Girasol			2002	1,199	---	890	1,067,110	0.04
	Aguacate	Fruto		2000	93,984	---	2,460	231,200,640	7.93
	Coco			2002	10,642	---	2,510	26,711,420	0.92

Notas: (a) Los valores de la superficie cosechada y producción por cultivo se obtuvieron del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA-SIAP 2003); del Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2003 (INEGI, 2003) y de estadísticas publicadas por SAGARPA en su página *web*: [http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar\\_comdeagr.html](http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comdeagr.html). (b) El coeficiente de producción de etanol a partir de maíz se obtuvo de una referencia en internet proporcionada por: The Land Institute: <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2000/12/15/3a3a508a9>. El coeficiente de producción de etanol a partir de caña de azúcar se obtuvo de Kartha y Larson (1999). El coeficiente de producción de biodiesel a partir de superficies cosechadas de soja, girasol, aguacate y coco se obtuvo de una referencia publicada en internet por la empresa productora de biodiesel Abatec S.A.: <http://www.biodiesel.8k.com>. (c) Se utilizó un contenido energético de 23.4 MJ/l para el etanol y 34.3 MJ/l para el biodiesel (The Land Institute: <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2000/12/15/3a3a508a9>; [www.eeca.govt.nz/content/ew\\_renewables/Reports/Biodiesel%20final%20report.doc](http://www.eeca.govt.nz/content/ew_renewables/Reports/Biodiesel%20final%20report.doc), respectivamente.)

\* Se sustrajo la proporción de bagazo (15%), considerado no apto para la producción de etanol.

**Tabla 3-2: Costos de la biomasa, inversión de las instalaciones, energía útil y situación actual de la tecnología**

Recursos para la obtención de biodiesel: aceite de soja y girasol									
Proceso de conversión	Tipo de combustible	Combustibles (\$/ton) (a)	Tecnología	Escala	Costos de inversión (US\$) (b)	Costo unitario (US\$/MW) (b)	Productos obtenidos	Costo producto (US\$/MWh) (b,c)	Situación actual (b)
Otros procesos	Aceite de soja	494	Plantas a base de aceite de soja	287,865 MW (182,500 ton/año)	6,000,000	21	Biodiesel	57.4 (US\$ 0.57/l B20)	En México ya existe la primera planta piloto (1).
	Aceite de girasol	525	Plantas a base de aceite de girasol				Biodiesel	52.3 (US\$ 0.52/l B20)	A escala mundial, ya existen plantas en operación (2).
			Semi-industrial	5,200 MW (3,300 ton/año)	290,000	56			
			Industrial-bajo costo	34,700 MW (22,000 ton/año)	1,450,000	42			
Industrial	34,700 MW 22,000 ton/año	5,510,000	159						

Notas: (a) El costo del recurso se encuentra expresado en pesos mexicanos (2003-2004) por cada tonelada. (b) El costo de inversión, el costo unitario, la situación actual de la tecnología (2000) y el costo del producto se obtuvieron de los casos de estudio mostrados en los anexos. (c) El costo del producto expresado en dólares por litro, corresponde a una mezcla B20 elaborada con 80% de diesel de petróleo y 20% de biodiesel.

1. La planta piloto fue desarrollada por el personal del Departamento de Física del Centro de Estudios de Energía del Instituto de Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), en colaboración con la empresa Grupo Energéticos.

2. Fuente: [http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos\\_biodiesel.php](http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos_biodiesel.php)

## 3.2. Etanol

### 3.2.1. Recurso disponible

El etanol es un alcohol que se obtiene a partir de la fermentación de carbohidratos de biomasa tal como la caña de azúcar, maíz, arroz, residuos agrícolas, forestales y basura orgánica urbana; el etanol también se conoce como bioetanol. El programa más importante para la producción de etanol es el llamado Programa Pro-alcohol de Brasil, que actualmente produce anualmente 16 mil millones de litros, en donde se utiliza al etanol como aditivo de gasolinas. En el mundo se produce alrededor de 30 mil millones de litros de etanol al año, de los cuales el 45% se produce a partir de la caña de azúcar y un fuerte porcentaje se produce a base de maíz.

En Estados Unidos se producen 16.2 millones de litros de etanol por año, hay 84 plantas y se construyen 16 más con el fin de triplicar la producción en el 2012. En Europa, Asia y Sudamérica se busca incrementar la producción de etanol con fines de auto consumo y exportación, sin embargo, en el corto plazo, estas políticas de aumento de producción tendrán una repercusión importante en los precios internacionales del maíz y el azúcar.

La industria cañera mexicana produce 45 millones de litros de etanol al año, sin embargo la industria química de nuestro país consume alrededor de 164 millones de litros al año por lo que tenemos un déficit de 119 millones de litros (Arvizu et al. 2005).

Atendiendo estos escenarios, se estimó el potencial de maíz y la caña de azúcar para la producción de etanol. Se partió de la producción total de cada cultivo a partir del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA - SIAP 2003). Se afectó este valor por un coeficiente de generación de combustible (Kantha y Larson 1999; Riegelhaupt 2005, *com. pers.*). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3-4.

Las estimaciones del potencial energético parten de la producción actual de los diferentes cultivos, dado que no se tienen estudios que permitan establecer metas de producción de los diferentes cultivos con fines energéticos.

De utilizarse toda la producción de caña de azúcar y de maíz con fines energéticos se tendría un potencial total de **196 PJ/año**, equivalente a la producción de 8.3 billones de litros de etanol.

### 3.2.2. Tecnología de etanol y costos

La tecnología empleada para la obtención de etanol varía dependiendo del tipo de materia prima empleada (biomasa con alto contenido de azúcares, almidones o celulosa). Actualmente la tecnología comúnmente empleada en la obtención de etanol a partir de la biomasa es la que emplea biomasa rica en almidones (cereales), debido a sus mayores rendimientos, mismos que se presentan en la siguiente tabla.

<b>Materia prima</b>	<b>Litros/ton</b>	<b>Litros/ha. año</b>
Caña de azúcar	70	400 – 12,000
Maíz	360	250 – 2,000
Yuca (raíz)	180	500 – 4,000
Papa	120	1,000 – 4,500
Madera	160	160 – 4,000

Tabla 3-3: Rendimientos esperados en la producción de etanol

En la tabla 3-5 se muestra el costo (en pesos mexicanos) de la caña de azúcar, del trigo y del maíz, se observa que la obtención de etanol se puede lograr mediante el empleo de tres diferentes tipos de recursos: recursos ricos en almidones el cual tiene costo de inversión de 162 millones de dólares para una planta que produce 200 millones de litros al año, cuando el etanol se obtiene de recursos ricos en azúcares se tiene un costo de inversión de un poco más de 102 millones de dólares para una planta que producirá 253.4 millones de l/año de etanol con melaza, teniendo un costo promedio de 9.73 US/MWh, sin embargo si el etanol se produce a partir del Bagazo de caña, el costo de inversión se eleva a más de 244 millones de dólares con un costo promedio de 12.73 US/MWh. Finalmente si el recurso es rico en celulosa, se espera que los costos de producción disminuyan y sean competitivos con las demás tecnologías en 5 años.

### **3.3 Prospectiva tecnológica del biodiesel y etanol a 25 años**

La aceptación del biodiesel y etanol en el mundo va en ascenso, la Unión Europea ha desarrollado infraestructura muy compleja para la fabricación, distribución y utilización del biodiesel y etanol. Además de haber fuertes presiones políticas para su desarrollo como combustible renovable alternativo. En Estados Unidos, Canadá y Brasil también acciones políticas y de modificación de leyes que indican que el biodiesel tendrá un uso intensivo en 10 años. Se piensa también que la firma del Protocolo de Kyoto acelerará la implantación de esta tecnología en países en vías de desarrollo por sus cualidades ambientales y gran poder calorífico (comparable con el Diesel Comercial). En el año 2003, México consumió alrededor de 600 mil barriles de gasolina por día, lo que representa, si se mezclan esta gasolina con 6% de etanol, una producción de 2 mil millones de litros al año. Esta cifra indica que México tiene un gran potencial de producción de etanol, sin embargo se considera que de la misma manera que en los países industrializados, se tendrá que otorgar un subsidio o un incentivo fiscal para su implantación en nuestro país, lo cual representará un incentivo de actualización tecnológica para los ingenios mexicanos, además de la creación de nuevos empleos.

En 25 años, se pronostica que el biodiesel y etanol a base de materia celulósica será competitivo con los actuales combustibles comerciales y si el precio del barril de petróleo sigue en ascenso se podrían acelerar los tiempos de implantación comercial de las tecnologías para la producción de biodiesel y etanol en el mundo.

**Tabla 3-4: Potencial técnico de recursos para la obtención de biodiesel y alcoholes.**

TIPOS (cuando corresponda)		Producto o desecho bruto con potencial energético	Producto o desecho elaborado con potencial energético	Unidades de producción convencionales	Toneladas en unidades de producción convencionales	Rendimiento l combustible /ton unidades de producción convencionales	Litros de combustible	Equivalente energía primaria PJ/año
Azúcar/almidón	Maíz	Grano	Etanol	Grano	17,191,073	75.0	1,289,330,475	57.2
	Caña de azúcar	Bagazo		Cañas frescas	37,167,297	75.0	2,787,547,275	65.2
		Hojas y puntas						
		Melaza						
		Jugo						
Oleaginosas	Sorgo	Semillas	Aceite/ biodiesel	Grano	5,842,308	144.5	844,213,503	45.9
	Soya				86,499	170.0	14,704,833	0.0
	Girasol				76,000	310.0	25,810,000	0.0
<b>Total</b>					<b>60,363,177</b>		<b>4,961,636,086</b>	<b>168.0</b>

**Tabla 3-5: Costos de la biomasa, inversión de las instalaciones, energía útil y fecha probable de comercialización**

Recursos para la producción de alcoholes (etanol)									
Proceso de conversión	Tipo de combustible	Combustibles (\$/ton) (a)	Tecnología	Escala	Costos de inversión (US\$) (b)	Costo unitario (US\$/MW) (b)	Productos obtenidos	Costo producto (US\$/MWh) (b)	Situación actual
Fermentación alcohólica	Recursos ricos en azúcares	300	Proceso a partir de melazas	212,101 MW (253.4 millones l/año)	102,468,237	483	Etanol	9.73	En México sólo existen estudios de simulación y experimentales (1).
		ND	Proceso a partir de bagazo de caña	212,101 MW (253.4 millones l/año)	244,734,000	1,153	Etanol	12.73	
	Recursos ricos en almidones	1,945	Proceso a partir de trigo	167,405 MW (200.0 millones l/año)	162,000,000	968	Etanol	ND	No existen en el país, aunque sí a escala mundial (2).
	Recursos ricos en celulosa	33.0-67.2	Proceso a partir de residuos de madera	ND	ND	ND	Etanol	ND	En investigación y desarrollo a escala mundial (3).

Notas: (a) El costo del recurso se encuentra expresado en pesos mexicanos (2003-2004) por cada tonelada. (b) El costo de inversión, el costo unitario, la situación actual de la tecnología y el costo del producto se obtuvieron de los casos de estudio mostrados en los anexos. (ND) No disponible.

1. Estudios realizados por el Centro de Investigación en Biotecnología-UAEM, el Instituto Mexicano del Petróleo, y el Instituto de Biotecnología-UNAM.

2. <http://www.aiqpa.com/documents/Congreso/07.Abengoa.pdf>, y <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea47s/ch22.htm>

3. [http://www.secyt.gov.ar/coopinter\\_archivos/empresas/10.ppt](http://www.secyt.gov.ar/coopinter_archivos/empresas/10.ppt)

#### 4. Producción de residuos agrícolas (bagazo de caña, maíz, cascarilla de arroz, cáscara de coco)

El aprovechamiento de residuos agrícolas ha adquirido cada vez mayor importancia debido al aumento en los precios de los combustibles fósiles. Existen dos aplicaciones principales: combustión o gasificación.

##### 4.1. Recurso disponible

Se han contabilizado la generación de residuos de maíz (hojas, mazorcas y tallo), residuos agrícolas cañeros residuos de soya y girasol, así como los residuos procedentes de las cáscaras de coco y del arroz.

La tabla 4-1 muestra las categorías consideradas en esta sección. Las existencias de sub-productos agrícolas y agro-industriales para uso energético se obtuvieron a partir de datos de producción nacional publicados en el Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA-SIAP 2003). Este valor se afectó por un coeficiente de generación de residuos (tMS de residuo / ton de producto en unidades convencionales de producción -Maíz: grano; Caña de azúcar: cañas frescas, entre otros-. Los coeficientes se obtuvieron de Biomass Power Division (1998) citados en Kartha y Larson (1999). Los coeficientes utilizados están desagregados por tipo de residuo: rastrojos, elotes, cáscaras, etc.

Tabla 4-1: Tipos de residuos agrícolas

Tipo	Producto o desecho bruto con potencial energético
Sub-productos agrícolas	
Caña de azúcar	Hojas y puntas
Arroz	Rastrojos
Cebada	
Fríjol	
Maíz	
Sorgo	
Trigo	
Sub-productos agroindustriales	
Caña de azúcar	Bagazo
Arroz	Cáscaras
Girasol	
Maíz	Elotes

En la tabla 4-2 se muestra el potencial estimado para esta categoría. En total se generan en el país 71 millones de toneladas de residuos agrícolas, que representan un potencial energético en energía primaria de **1,065 PJ/año**.

**Tabla 4-2: Potencial estimado para subproductos agrícolas y subproductos agroindustriales**

Categorías	Tipos (cuando corresponda)	Producto o desecho bruto con potencial energético	Año	Producción agrícola (millones ton)	Coefficiente de generación de residuo	Generación de residuos (ton)	Equivalente energía primaria (PJ/año)
Subproductos agrícolas	Caña de azúcar	Hojas y puntas	2003	48,1	0.15	7.2	108
	Arroz	Rastrojo	2000	0.3	1.50	0.4	6
	Cebada		2003	1.1	2.30	2.5	37
	Frijol		2000	1.4	1.50	2.1	32
	Maíz		2000	20.7	1.50	31.1	466
	Sorgo		2000	6.8	1.50	10.1	152
	Trigo		2000	2.7	1.50	4.1	61
Subproductos agroindustriales	Caña de azúcar	Bagazo	2003	48.1	0.15	7.2	108
	Arroz	Cáscaras	2000	0.3	0.25	$68 \times 10^{-3}$	1
	Girasol		2002	$155 \times 10^{-6}$	0.25	$39 \times 10^{-6}$	0.001
	Maíz	Elotes	2000	20.7	0.30	6.2	93
<b>Total</b>				<b>150.1</b>		<b>71.0</b>	<b>1,065</b>

Notas: (a) Los valores de la producción agrícola se obtuvieron del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA-SIAP 2003); del Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2003 (INEGI, 2003) y de estadísticas publicadas por SAGARPA en su página *web*: [http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar\\_comdeagr.html](http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comdeagr.html). (b) Los coeficientes de generación de residuos se obtuvieron de Biomass Power Division (1998) citados en Kartha y Larson (1999). La unidad de los coeficientes está dada en toneladas de materia seca (tMS) de residuo (rastros, elotes, cáscaras, o bagazo), por tonelada (ton) de producto en unidades de producción convencionales. Las unidades de producción convencionales son: 1) "grano" para arroz, cebada, frijol, maíz, sorgo, y trigo; 2) "flores y resto de la planta" para girasol, y 3) "cañas frescas limpias" (sin hojas y puntas) para la caña de azúcar. Notar que la producción agrícola en toneladas por año incluye a los sub-productos agroindustriales más no a los agrícolas. Los subproductos agrícolas se generan en el terreno de siembra y no se consideran parte de la producción. (c) Se utilizó un contenido energético promedio de 20 Giga joules por tonelada de materia seca.

#### **4.2. Tecnología para el aprovechamiento de residuos agrícolas y agroindustriales**

En la tabla 4-3 se observa que el aprovechamiento de los residuos agrícolas se efectúa mediante dos tipos de tecnologías –calderas o quemadores, o bien gasificadores-. Para cada sistema tecnológico se especifican la magnitud de las inversiones requeridas según la escala del equipo, la energía útil producida y su valor comercial, así como la situación actual de la tecnología.

**Tabla 4-3: Costos de la biomasa, inversión de las instalaciones, energía útil y fecha probable de comercialización en el aprovechamiento de los residuos agrícolas**

Residuos agrícolas									
Proceso de conversión	Tipo de combustible	Combustibles (\$/ton) (a)	Tecnología	Escala (b)	Costos de inversión (US\$) (b)	Costo unitario (US\$/MW)	Productos obtenidos	Costo producto (US\$/MWh) (b)	Situación actual (b)
Combustión	Residuos agrícolas:		Pequeña y mediana escala:	<i>Eléctricas</i>					Hasta Febrero del 2005, no existen
	Residuos de caña	ND	Calderas piro-tubulares	0.5-5 MW	1,296,000 - 7,875,000	2,952,000 - 1,575,000	Energía eléctrica	41.8	casos de plantas en México (1).
	Cáscara de coco	ND	Calderas acu-tubulares	5-12 MW	7,875,000 - 15,480,000	1,575,000 - 1,290,000	Energía eléctrica	ND	
	Residuos de maíz	ND	Calderas de lecho fluidizado	12-25 MW	15,480,000 - 27,750,000	1,290,000 - 1,110,000	Energía eléctrica	ND	
	Cáscara de arroz	ND	Quemadores de pilas	≤ 25 MW	≤ 27,750,000		Energía eléctrica	ND	
	Residuos de trigo	ND	Quemadores de ciclón	<i>Térmicas</i>					Ya existen de manera comercial (2).
				Quemares de astillas	450 kW	875,194	1,944,875	Energía térmica	ND
			Quemadores de pellets	600 kW	994,194	1,656,990	Energía térmica	ND	
				750 kW	1,123,490	1,497,986	Energía térmica	4.9	
Gasificación	Residuos agrícolas:		Grande, pequeña y mediana escala:						No existen en México aunque si a escala mundial.
	Cáscara de arroz	ND	Gasificador de lecho fluidizado	0.2 MW	66,000	330,000	Energía eléctrica	42.0	
	Cáscara de arroz	ND	Gasificadores de corriente descendente	1 MW	367,200	367,200	Energía eléctrica	32.4	
	Residuos de caña	ND	Gasificador de tiro invertido	44 MW	52,800,000	1,200,000	Energía eléctrica	ND	

Notas: (a) El costo del recurso se encuentra expresado en pesos mexicanos (2003-2004) por cada tonelada. (b) El costo de inversión, el costo unitario, la situación actual de la tecnología y el costo del producto se obtuvieron de los casos de estudio mostrados en los anexos. (ND) No disponible.

1. Costos de la tecnología para generación de electricidad 2001.

2. Fuente: Comercializadora Flexible, México, Diciembre del 2004.

## Referencias

### Revistas y artículos científicos

1. Baker AJ. Wood Fuel Properties and Fuel Products from Woods. Fuelwood, management and utilisation seminar. East Lansing, MI: Michigan State University; 1982. p. 9–11.
2. Bassi L. Coal gasification and combustion process proven and new technologies for a clean coal use in advanced power plant. *Flowers* 1997;429–36.
3. Bradbury, A.G, W y balkai, F. Shafizadeh: A kinetic model for the pyrolysis of cellulose, *J. Appl. Polym. Sci.* 23, -3271, 1979.
4. Bridgwater, A.V., Boocock, D.G.B. (Eds.), 1997. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Vols 1 and 2.* Blackie Academic and Professional, London.
5. Bridgwater, A.V., 1997. Biomass fast pyrolysis and applications in Europe. In: *Making a Business from Biomass in Energy, Environment, Chemicals, Fibers, and Materials.* Proc. Third Biomass Conf. of the Americas, Vols 1 and 2, In: Overend, R.P., Chornet, E. (Eds.), Elsevier Science, Oxford, New York, 1997, pp. 797-809.
6. Bushnell DJ, Haluzok C, Dadkhah-Nikoo A. Biomass fuel characterizati testing and evaluating the combustion characteristics of selected biomass fuels. Corvallis, OR: Bonneville Power Administration; 1989.
7. Cen KF, Ni MJ, Luo ZY, Yan JH, Chi Y, Fang MX, et al. Theory, design and operation on circulating fluidized bed boilers. Beijing: Chinese Electric Power Press; 1998 [in Chinese].
8. Chan WR, Kelbon M, Krieger BB. Modelling and experimental verification of physical and chemical process during pyrolysis of a large biomass particle. *Fuel* 1985;64:1505–15.
9. Conti L, Scano G, Boufala J. Bio-oils from arid land plants: flash pyrolysis of EUPHORBIA CHARACIAS bagasse. *Biomass and Energy* 1994;7(1–6):291–6.
10. Cuevas, A., Reinoso, C., Lamas, J., 1995. Advances and developments at the Union Fenosa Pyrolysis Plants. In: *Biomass for Energy, Environment, Agriculture, and Industry.* In: Cartier, Beenackers, A.A.C.M., Grassi, G. (Eds.), Pergamon/Elsevier, New York, pp. 1506-1512.
11. Czernik, S., 1997. Biomass pyrolysis activities in the USA in 1996. In: *PyNE, Pyrolysis Network for Europe, Issue 3, March*, pp. 8-9
12. C. Z. Wu, H. Huang, S. P. Zheng y X. L. Yin. Análisis económico de la gasificación de la biomasa y de la generación de energía en china. Instituto de la conversión de la energía, academia china de ciencias. China de Guangzhou. 22 de enero del 2002.

13. Demirbas A. Biomass resources for energy and chemical industry. *Energy Edu Sci Technol* 2000;5:21–45.
14. Demirbas A. Conversion of biomass using glycerin to liquid fuel for blending gasoline as alternative engine fuel. *Energy Convers Manage* 2000;41:1741–8.
15. Demirbas A. Conversion of biomass to a pyrolytic oil for blending gasoline as an alternative fuel in internal combustion engines. *Energy Sources* 2000;23:553–62.
16. Demirbas A. *Energy Educ Sci Technol* 2000;5:21.
17. Demirbas A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Convers Manage* 2000;41: 633–46.
18. Demirbas A. Recent advances in biomass conversion technologies. *Energy Edu Sci Technol* 2000;6:19–41.
19. Demirbas A. Yields of oil products from thermochemical biomass conversion processes. *Energy Convers Manage* 1998; 39:685–90.
20. Diebal, J: Word shap sumary procuding especialist work. Shop on fost Pyrolysis of biomass, copper Mountain, colorado, p.p 3-6.
21. Diebold, J.-P. and Bridgwater, A.V., 1997. Overview of fast pyrolysis of biomass for the production of liquid fuels. In: *Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Vols 1 and 2*. In: Bridgwater, A.V., Boocock, D.G.B. Blackie Academic and Professional, London, pp. 5-23.
22. Dietl R, Schmidt W. Technical large-scale test for biomass co-combustion in a lignite-fired power plant. *Biomass for Energy and Industry*. CARMEN, 1998. p. 253–58.
23. Drummond AF, Drummond IW. Pyrolysis of sugar cane bagasse in a wire-mesh reactor. *Industrial and Engineering Chemistry* 1996;35:1263–8.
24. Ebeling JM, Jenkins BM. Physical and chemical properties of biomass. *Trans ASAE* 1985;23:898–902.
25. EUREC Agency. 1996, *The future for renewable energy, prospects and directions*. London: James and James Science Publishers Ltd; 1996.
26. Fabrizio Scala, y Riccardo Chirone Sulla. *Combustión de los combustibles sólidos alternativos en un lecho fluidizado*. Napoli, Italia. 22 de enero de 2004.
27. Falcón, JL Brassond: *Emulgentes para emulsiones gasoil-agua*. Séptimo Forum de piezas de respuestos y tecnología de avanzada, Santiago de Cuba, 1992.
28. Garea, B. I: *Tecnología para la obtención de carbón a partir de materiales lignocelulosos en cama fluidizada*. Tesis de Doctorado de 1990.
29. Goldstein IS. *Organic chemical from biomass*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Inc; 1981. p. 64.
30. Gold BA, Tillman DA. Wood cofiring evaluation at TVA power plants. *Biomass Bioenergy* 1996;10:71–8.
31. Gómez, Tiburcio: *Producción discontinua de combustible y otros derivados a partir de fibras vegetales*. Trabajo de Diploma. Stgo. de Cuba, ISPJAM, 1986.

32. González Morán Leydis: Estudios bibliográficos de la pirólisis de materiales lignocelulosos y sus aplicaciones. Trabajo de Diploma, Stgo. de Cuba, ISPJAM, 1993.
33. Guide Biomasse-Energie. Ed. Academia, 1994. p. 134.
34. Hall DO, Rosillo-Calle F, de Groot P. Biomass energy lessons from case studies in developing countries. *Energy Policy* 1992;62–73.
35. Harding NS, Adams BR. Biomass as a reburning fuel: a specialized cofiring application. *Biomass Bioenergy* 2000;19: 429–45.
36. Hartiniati SA, Youvial M. Performance of a pilot scale fluidized bed gasifier fueled by rice husks, pyrolysis and gasification. *Proceedings of the International Conference in Luxembourg*, 23–25.; 1989. p. 257–63.
37. Hastaoglu MA, Hassam MS. Application of a general gas-solid reaction model to flash pyrolysis of wood in a circulating fluidized bed. *Fuel* 1995;74(5):697–703.
38. Haykırı-Acma H. Combustion characteristics of different biomass materials. *Energy Convers Manage* 2003;44: 155–62.
39. Hein KRG, Bemtgen JM. EU clean coal technology—combustion of coal and biomass. *Fuel Process Technol* 1998; 54:159–69.
40. Hughes EE, Tillman DA. Biomass cofiring: status and prospects 1996. *Fuel Process Technol* 1998;54:127–42.
41. Jaime Velásquez García, Manejo de residuos de maíz de temporal en la labranza de conservación en el estado de Michoacán, Centra Nacional de Investigación para Producción Sostenible (CENAPROS), Folleto técnico No. 7, Marzo 2003.
42. Jensen PA, Sander B, Dam-Johansen K. Pretreatment of straw for power production by pyrolysis and char wash. *Biomass Bioenergy* 2001;20:431–46.
43. Jorge Ugolini. Estudio técnico para determinar la factibilidad técnica y económica del biodiesel. Argentina. Abril 2000.
44. Katakı R, Konwer D. Fuel wood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. *Biomass Bioenergy* 2001;20:17–23.
45. Kaltschmitt, M., Bridgwater, A.V. (Eds.), 1997. In: *Proc. Int. Conf. Gasification and Pyrolysis of Biomass*, Stuttgart, 9-11 April 1997, Germany. CPL Press, Newbury, UK.
46. Klason. *Py Col 2: Argen. Chen*, Vol 22, 1295 (1909), Vol 23, 1253, (1910).
47. Kothari V, Antal MJJ. Numerical studies of the flash pyrolysis of cellulose. *Fuel* 1985;64:1487–93.
48. Kucukbayrak S. Influence of the mineral matter content on the combustion characteristics of Turkish lignites. *Thermochimica Acta* 1993;216:119–29.
49. Leech, J., 1997. Running a dual fuel engine on pyrolysis oil. In: *Proc. Int. Conf. Gasification and Pyrolysis of Biomass*, Stuttgart, 9-11 April 1997, Germany. Kaltschmitt, M., Bridgwater, A.V. (Eds.), CPL Press, Newbury, UK, pp. 495-497.
50. LePori WA. Fluidized bed combustion and gasification of biosolid. *Agric Energy* 1980;2:330–4

51. Luo ZY, Wang SR, Dong LJ, Fang MX, Hong J, Gu YL, et al. Research on flash pyrolysis of biomass for bio-oil in a fluidized bed reactor. Reno: Proceedings of the 16th International Conference on Fluidized Bed Combustion. 2001, p. 5.
52. Maschio G, Lucchesi A, Stoppato G. *Bioresource Technol* 1994;48:119.
53. Maschio G, Lucchisi, A. Koyfapanos, C: Pyrolysis, a promising route for biomass utilization, *Biore source Technogy* 42 (1992), 219 - 231.
54. Marks J. Wood powder: an upgraded wood fuel. *Forest Prod J* 1992;42:52–6.
55. Meier, D., Scholze, B., 1997. Fast pyrolysis liquid characteristics. In: Proc. Int. Conf. Gasification and Pyrolysis of Biomass, Stuttgart, 9-11 April 1997, Germany. Kaltschmitt, M., Bridgwater, A.V. (Eds.), CPL Press, Newbury, UK, pp. 431-441.
56. Meunier J. *Gasification et oxydation des combustibles*. Paris: Ed. Masson & Cie; 1958.
57. Meugen, T. y Col: Thermal analysis of lignocellulosic materials, I. macromolec. *Sci. rev. Macromol. Chem*, 1981.
58. Mory A, Tauschitz J. Thermal use of biomass in coal fired power plants in Austria. The EU-Demonstration project BioCoComb for biomass gasification and the biomass Co-combustion Grate project. *Power-gen* 1998, vol. 4. p.179–89.
59. Msc. Ana Cristina Fuentes Hernández. Estudio de los parámetros que influyen en el proceso de pirolisis de la cáscara de arroz para la obtención de carbón vegetal. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.
60. Muñoz, Antonia: Estudio Físico Químico y posibilidades industriales de las cenizas de cascarilla de arroz. Fac. de Ciencias, Universidad de Madrid, 1967.
61. Olivares Gómez, E. Brossard Pérez: Consideraciones sobre el análisis inmediato y granulométrico del bagazo y la paja de caña de azúcar.
62. Overend, R.P., Chornet, E. (Eds.), 1997. Making a Business from Biomass in Energy, Environment, Chemicals, Fibers, and Materials. Proc. Third Biomass Conf. of the Americas, Vols 1 and 2. Elsevier Science, Oxford, New York.
63. P. Cho, C.K. Law, *Combust. Flame* 66 (1986). 159.
64. Perry SW, Chilton CN. *Chemical engineers handbook*. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 1973.
65. Petroff: *Pyrolysi et gazification dos prodent cellulose ques et ligneux, vartrag des tanguna*, Paris, 1979.
66. Place, W.J., Oehr, K.H., 1997. The biomass refinery: Processes, products and application. In: Making a Business from Biomass in Energy, Environment, Chemicals, Fibers, and Materials. Proc. Third Biomass Conf. of the Americas, Vols 1 and 2. Overend, R.P., Chornet, E. (Eds.), Elsevier Science, Oxford, New York, pp. 1009-1013.

67. P. Mathieu, R. Dubuisson /Energy Conversion and Management 43 (2002) 1291–1299.
68. P. M. Lv, Z. H. Xiong, J. Chang, C. Z. Wu, Y. Chen y J. X. Zhu. Estudio experimental de la gasificación de la biomasa en un lecho fluidizado empleando aire-vapor como agente gasificante. Instituto de conversión de energía de Guangzhou. China. 5 Marzo del 2004.
69. Prins, W., Wagenaar, V.M., 1997. Review of the rotating cone technology for flash pyrolysis of biomass. In: Proc. Int. Conf. Gasification and Pyrolysis of Biomass, Stuttgart, 9-11 April 1997, Germany. Kaltschmitt, M., Bridgwater, A.V. (Eds.), CPL Press, Newbury, UK, pp. 316-326.
70. P.S. Chen: Thermal deterioration of wood, I.S Goldstein ed wood Technology. Chemical aspects . p (57-81) Acs press. Washinton, 1917.
71. PyNE, Pyrolysis Network for Europe, 1996. Coordinator A.V. Bridgwater, Energy Research Group, Aston University, 9-11 April 1997, Germany. Kaltschmitt, M., Bridgwater, A.V., 1997. CPL Press, Newbury, UK, pp. 471-480.
72. Roy, C., Morin, D., Dubr, F., 1997a. The biomass Pyrocycling TM process. In: Proc. Int. Conf. Gasification and Pyrolysis of Biomass, Stuttgart, 9-11 April 1997, Germany. Kaltschmitt, M., Bridgwater. A.V. (Eds.), CPL Press, Newbury, UK, pp. 307-315.
73. Ragland KW, Aerts DJ, Baker AJ. Properties of wood for combustion analysis. Bioresource Technol 1991;37: 161–8.
74. Ravindranath NH, Hall DO. Biomass, energy, and environment a developing country perspective from India. Oxford, Oxford University Press; 1995.
75. Richard LB, Overend RP, Craig KR. Biomass-fired power generation. Biomass-fired power generation. Fuel Process Technol 1998;54:1–16.
76. Roy, C., 1997. Pyrovac Institute launches a new reactor enhancing heat transfer efficiency. In: PyNE Pyrolysis Network for Europe. Issue 3, March, p. 5.
77. Rómulo Benjamín Gamiño Calvillo. (Abril 2005). Estudio de la viabilidad de la cogeneración con biomasa en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro. Reporte de tesis, Sección de ingeniería energética, UNAM. México.
78. Saltes, E. I, Tielder: Pyrolysis organic from biomass (goldstun, ed), c.r. Preess, Bocaraton, Florida, p. 63, 1981.
79. Sami M, Annamalai K, Wooldridge M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. Progress Energy Combust Sci 2001;27:171–214.
80. Scott DS, Piskorz J. The continuous flash pyrolysis of biomass. The Canadian Journal of Chemical Engineering 1984;62:404–12.
81. Scott, D.S., Piskorz, J., 1982. The flash pyrolysis of aspen-poplar wood. Can. J. Chem. Eng. 60, 666-674. Van Swaaij, W.M.P., Prins, W., 1997. Twente University. PyNE Pyrolysis Network for Europe. Issue 3, March 1997, pp. 20-21.

82. Shafiza Deh, F: Pyrolysis and combustion of cellulosic materials, (Adv in carb chem, 23, 419, 1968).
83. Shafizadeh, F: Introduction Pyrolysis of biomass, J.Anall appll pyrol. 3, 283, 1982. 15. Roger M. Rowell: the chemestry of solid wood. Advances in chemistry series 207. p.p (57, 125),1984.
84. Shah N, Giraed, P: Carbonization of wood: Produc Analysis and Energy Assessment.
85. Singh BP, Panigrahi MR, Ray HS. Review of biomass as a source of energy for India. Energy Sources 2000;22:649–58.
86. Scott DS, Piskorz J. The flash pyrolysis of aspen-poplar wood. The Canadian Journal of Chemical Engineering 1982;60:666–74.
87. Stiles HN, Kandiyoti R. Secondary reactions of flash pyrolysis tars measured in a fluidized bed pyrolysis reactor with some novel design features. Fuel 1989;68:275–82.
88. Strehler, W Stutzle: Biomass Residues, Edited by D.O. Hall and R. P Overend, 1987.
89. Tillman DA. Wood as an energy resource. New York: Academic Press; 1978.
90. Tillman DA. Biomass Cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences. Biomass Bioenergy 2000; 19:365–84.
91. Van Den Aarsen FG, Beenackers AACM, Van Swaaij WPM. In: Overend RP, Milne TA, Mudge LK, editors. Wood pyrolysis and carbon dioxide char gasification kinetics in a fluidised bed. Fundamentals of thermochemical biomass conversion. Elsevier applied sciences publishers; 1985. Paper 36.
92. Waichi Iwasaki. Consideraciones de la eficacia económica en la producción de hidrógeno a partir de la biomasa. Nueva energía y organización industrial del desarrollo de la tecnología (NEDO). Japón. 22 de enero del 2003.
93. W.C. Pfefferle, L.D. Pfefferle, Prog. Energy Combust. Sci. 12 (1986).
94. Wehlte, S., Meier, D., Moltran, J., Faix, O., 1997. The impacts of wood preservatives on the flash pyrolysis of biomass. In: Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Vols 1 and 2. Bridgwater, A.V., Boocock, D.G.B. (Eds.), Blackie Academic and Professional, London, pp. 206-219.

#### **Sitios de internet genéricos**

95. <http://www.aiqpa.com>
96. <http://www.alimentosargentinos.gov.ar>
97. <http://www.ambientenews.com.ar>
98. <http://www.arroz.com>
99. <http://www.bajacalifornia.gob.mx>
100. <http://www.bioheat.info>
101. <http://www.cie.unam.mx>
102. <http://www.cosemex.com>
103. <http://www.coveca.gob.mx>
104. <http://www.economia.gob.mx>

105. <http://www.econosur.com>
106. <http://www.elsitioagricola.com>
107. <http://www.fao.org>
108. <http://www.inegi.gob.mx>
109. <http://www.infoaserca.gob.mx>
110. <http://www.infoenergia.com>
111. <http://www.ingenieroambiental.com>
112. <http://www.perafan.com>
113. <http://www.sagarpa.gob.mx>
114. <http://www.sciencedirect.com>
115. <http://www.secyt.gov.ar>
116. <http://www.sener.gob.mx>
117. <http://www.oas.org>
118. <http://www.viarural.com.ar>

### **Sitios de internet específicos**

119. <http://www.aacrea.org.ar/economia/articulos/pdf/08girasol.pdf>
120. <http://www.aiqpa.com/documents/Congreso/07.Abengoa.pdf>
121. [http://www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/olea/Aceite\\_Soja-r19/A\\_soja.htm](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/olea/Aceite_Soja-r19/A_soja.htm)
122. [http://www.alimentosargentinos.gov.ar/03/olea/a\\_soja/Soja\\_2001.pdf](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/03/olea/a_soja/Soja_2001.pdf)
123. <http://www.alu.ua.es/v/vap/biomasa.htm>
124. <http://www.ambientenews.com.ar/archivos/artic9.htm>
125. <http://www.arroz.com/printout341.html>
126. [http://www.asagir.org.ar/siembra\\_directa.asp](http://www.asagir.org.ar/siembra_directa.asp)
127. [http://www.bajacalifornia.gob.mx/ecologia/servicios/residuos\\_solidos/manual\\_tecnadmvo.pdf](http://www.bajacalifornia.gob.mx/ecologia/servicios/residuos_solidos/manual_tecnadmvo.pdf)
128. <http://www.bcr.com.ar/pagcentrales/publicaciones/images/pdf>
129. [http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos\\_biodiesel.php](http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos_biodiesel.php)
130. <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/biodiesel-paysandu.pdf>
131. <http://www.bun-ca.org/publicaciones/BIOMASA.pdf>
132. <http://www.cecua.es/res&rue/htm/dossier/5%20biomasa.htm>
133. <http://www.cie.unam.mx/~rbb/PRES-BIOMASA.ppt>
134. <http://www.cipres.cec.uchile.cl/~fedonoso/adicional.htm>
135. <http://www.consagro.com/articulo2.htm>
136. <http://www.cosemex.com/Trigo.htm>
137. [http://www.coveca.gob.mx/documentos/canha\\_azucar.pdf](http://www.coveca.gob.mx/documentos/canha_azucar.pdf)
138. <http://www.coveca.gob.mx/documentos/maiz.pdf>
139. <http://www.cps.unizar.es/~isf/html/bigen01.html>
140. <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>
141. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo03.htm>
142. <http://www.cubasolar.org/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar05/HTML/articulo02.htm>
143. <http://www.economia.gob.mx/pics/p/p1763/SORGO290204.pdf>
144. <http://www.econosur.com/notas/biodiesel2.htm>

145. <http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp>
146. [http://www.educa.rcanaria.es/blas\\_cabrera/TER/BIOMA/BIOMA14.htm](http://www.educa.rcanaria.es/blas_cabrera/TER/BIOMA/BIOMA14.htm)
147. <http://www.elsitioagricola.com/articulos>
148. <http://www.etoon.net/es/doc>
149. <http://www.eyt.cubasolar.cu/energia/Energia21/HTML/articulo04.htm>
150. <http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s0g.htm>
151. <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s00.htm>
152. <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s04.htm>
153. <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s05.htm>
154. <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s06.htm>
155. <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s07.htm>
156. [http://www.fao.org/documents/show\\_cdr.asp](http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp)
157. [http://www.fjarabo.quimica.ull.es/Biomasa/bio04/bio04\\_41.htm](http://www.fjarabo.quimica.ull.es/Biomasa/bio04/bio04_41.htm)
158. <http://www.harina.org/trigo.htm>
159. <http://www.html.rincondelvago.com/bialcohol.html>
160. <http://www.indonatural.com/cocopeat.html>
161. <http://www.inegi.gob.mx/est/default.asp?c=2534>
162. <http://www.ingenieroambiental.com/biodiesel/biodiesel.htm>
163. <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/120/ca120.pdf>
164. [http://www.infoenergia.com/cgi\\_bin/energia.cgi](http://www.infoenergia.com/cgi_bin/energia.cgi)
165. <http://www.inta.gov.ar/iir/info/BIOGAS2000.xls>
166. <http://www.intranet.inifap.gob.mx/infoteca/inifap/Agricola/Folleto1193.pdf>
167. <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea47s/ch22.htm>
168. <http://www.perafan.com/ea02cana.html>
169. <http://www.pvmirror.com/nature/168-thecoconutpalm-esp.html>
170. [http://www.redescolar.ilce.edu.mx:2000/redescolar/publicaciones/publi\\_biosfera/flora/cocotero/infococo.htm](http://www.redescolar.ilce.edu.mx:2000/redescolar/publicaciones/publi_biosfera/flora/cocotero/infococo.htm)
171. [http://www.secyt.gov.ar/coopinter\\_archivos/empresas/10.ppt](http://www.secyt.gov.ar/coopinter_archivos/empresas/10.ppt)
172. [http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase8.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase8.pdf)
173. <http://www.uanl.mx/publicaciones/ciencia-uanl/vol5/2/pdfs/obtenciondefases.pdf>
174. [http://www.unam.mx/pue/IV\\_CONGRESO\\_PONENCIAS\\_AMEE/Miercoles\\_13/TEMA%202/SESION%20TECNICA/SANDRA%20ALFONSO%20ALFREDO.pdf](http://www.unam.mx/pue/IV_CONGRESO_PONENCIAS_AMEE/Miercoles_13/TEMA%202/SESION%20TECNICA/SANDRA%20ALFONSO%20ALFREDO.pdf)
175. <http://www.viarural.com.ar/viarural.com.ar/insumosagropecuarios/agricolas/semillashibridas/cargill/manualsorgo/manualsorgocargill16.htm>
176. [http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/fmp/BALANCE\\_E\\_2000.pdf](http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/fmp/BALANCE_E_2000.pdf)

## **Anexo A**

### **TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA AGRÍCOLA Y AGROINDUSTRIAL**

Los dos grandes grupos de conversión de la biomasa en energía son los "procesos termoquímicos" y los "procesos bioquímicos".

Los **procesos termoquímicos** de conversión de la biomasa en energía son aquéllos en que se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación. Los métodos disponibles en la actualidad no generan un producto único, sino que dan mezclas de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, que también poseen un elevado valor energético. Se pueden clasificar en combustión directa, gasificación y pirólisis.

En este aspecto, si el calentamiento de la biomasa se lleva a cabo con un exceso de aire, se obtiene una **combustión**, donde el producto final es el calor, pudiéndose utilizar éste, bien para la producción de vapor que mueva una turbina (generación de electricidad) o bien directamente en otros procesos.

Si la combustión de la biomasa no es completa, el proceso se denomina **gasificación**. Este proceso se puede llevar a cabo con oxígeno, lo que permite obtener gas de síntesis, combustible de gran interés actual, por la posibilidad de su transformación en metanol, o bien con aire, produciendo el denominado gas pobre, que puede aprovecharse para producir vapor o electricidad.

El tercer gran grupo de procesos termoquímicos se puede englobar dentro de la denominación de **pirólisis**, o calentamiento de la biomasa en ausencia total de aire. Por esta vía se obtienen combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, en función de la composición de la biomasa y de las condiciones de operación. Los procesos de pirólisis actualmente más apreciados, porque permiten la producción de combustibles líquidos, son variantes del proceso general que operan con la adición de otros reactivos químicos

#### **1. CALDERAS DE COMBUSTIÓN**

Este tipo de tecnologías se emplean en el proceso de transformación denominado combustión directa. La combustión directa se define como la reacción química entre un combustible y el comburente (aire) con la finalidad de producir energía calorífica. Los elementos básicos de un equipo de combustión son el horno y el quemador; la combinación de ambos proporcionan los cuatro elementos básicos de la combustión directa: mezcla íntima de combustible y comburente, admisión de cantidades suficientes de comburente para quemar por completo el combustible, temperatura suficiente para encender la mezcla de combustible y aire, y tiempo de residencia necesario para que la combustión sea completa.

## DESCRIPCIÓN GENERAL

Los métodos tradicionales de combustión de biomasa (**generalmente residuos de madera y bagazo de caña**) para producir vapor han consistido en la utilización de calderas pirotubulares o acuotubulares, que emplean el método de quema de pilas de residuos sobre una parrilla.

La diferencia entre las calderas normales de aceite o gas y las que queman biomasa, estriba en que las características de una combustión lenta de la biomasa, junto con su elevado contenido de humedad, requieren una mayor capacidad en la cámara de combustión con un horno alto para así crear velocidades ascendentes lentas y responder al tiempo más largo de paso o estancia que se necesita para quemar el combustible a base de biomasa.

La necesidad de una caldera de mayor tamaño, junto con la exigencia de una instalación de manipulación de los residuos, supone de 1.5 a 4 veces el costo de inversión de las calderas prefabricadas que funcionan con petróleo. Además de esto cabe prever unas eficiencias de combustión del 65 al 75 por ciento cuando se queman residuos de biomasa, frente al 80 por ciento que se consigue en unidades que funcionan con gas o petróleo. La dificultad del encendido automático, la lenta respuesta a una demanda de punta y el tener que sacar las cenizas y tirarlas son otros inconvenientes que hay que sopesar cuando se emplea la biomasa como combustible.

En la siguiente figura se puede observar cómo trabaja el sistema de combustión de biomasa automática.

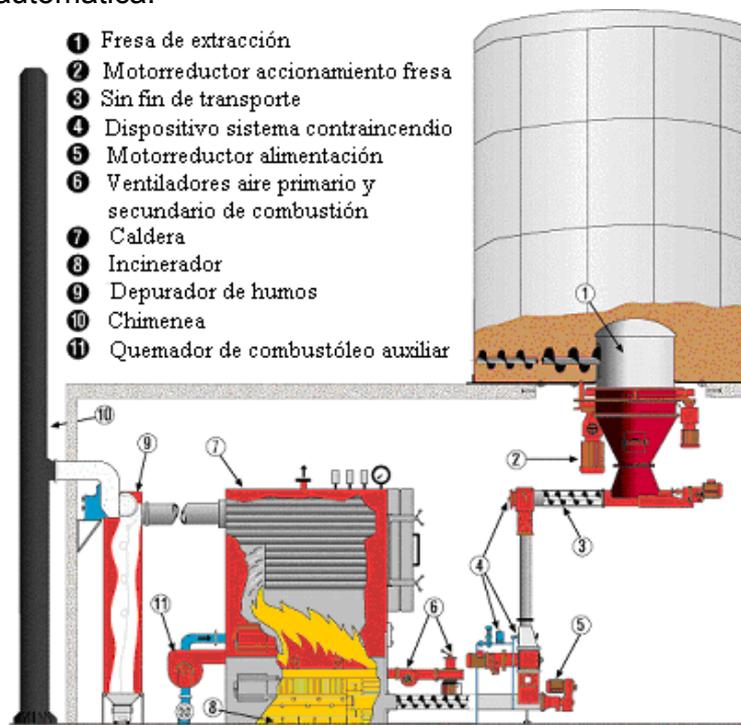


Figura 1-1: Esquema de una planta para la combustión de residuos de madera (Calderas L. Solé, 2004)

## TIPOS DE TECNOLOGÍA

Se pueden distinguir varios tipos de calderas para la combustión de biomasa. Generalmente el tipo de caldera empleada son las tradicionales con parrilla fija o móvil (temperaturas menores de 1000 °C); a continuación se describen las más comunes:

### ▪ **Calderas pirotubulares**

Se emplean principalmente cuando se necesitan presiones de vapor de no más de 20 kg/cm<sup>2</sup> en operaciones pequeñas o medianas. Son relativamente baratas y funcionan aprovechando el principio de los gases calientes de la combustión que pasan por tubos de acero colocados en camisas exteriores de agua.

### ▪ **Calderas acuotubulares**

Las calderas acuotubulares constan de tubos soldados de tal suerte que constituyen paredes completas que encierran la cámara de combustión, a través de la cual fluye el agua que se va a calentar. Por su propia construcción, la caldera acuotubular se usa casi exclusivamente cuando se emplean presiones de vapor superiores a los 10 kg/cm<sup>2</sup>, especialmente para proporcionar energía motriz a los generadores de turbinas.

Ambos tipos de calderas pueden subdividirse ulteriormente en calderas que llegan ya embaladas o como unidades para ser montadas sobre el terreno. Las calderas ya preparadas suelen ser unidades que se montan en el establecimiento, con lo que pueden ser fácilmente expedidas, instaladas y puestas en funcionamiento, suelen tener una capacidad de vapor inferior a 22.5 ton/hr.

### ▪ **Quemadores de pilas y quemadores de suspensión**

Los quemadores de pilas, como su propio nombre indica, queman el combustible en pilas sobre un pavimento o parrilla refractarios. Estos hornos pueden utilizarse para quemar combustibles de hasta un 65 por ciento de contenido de humedad, independientemente del tamaño o forma, aunque requieren mucha atención y largo tiempo para formar y quemar la pila y tienen unos rendimientos bajos del orden del 50 al 60 por ciento. En algunos hornos, puede agregarse combustible de gran contenido de humedad a la base de la pila mediante pistones hidráulicos, con lo que el residuo quema más lenta y exhaustivamente.

Los quemadores en suspensión como su nombre indica, queman las partículas finas en suspensión, ya sea en unas cámaras especiales de combustión o en unos hogares de caldera, dentro de un ambiente muy turbulento provocado por el aire forzado de la combustión. Para que funcione eficazmente, las partículas de madera tienen que tener no más de 6 mm de tamaño y un contenido máximo de humedad del 15 por ciento. Son unidades que se prestan muy bien para su empleo con hornos de madera, secadoras y calderas de material para chapas y tableros de partículas.

- **Quemadores de ciclón**

Estos quemadores funcionan igualmente que los quemadores en suspensión, la diferencia entre ambos radica en que emplean un tamaño máximo de partículas en el orden de 3.5 mm y con un 12 por ciento de contenido de humedad, y se somete a combustión en un quemador externo de ciclón.

- **Calderas de astillas**

Las calderas de astillas se utilizan exclusivamente para la madera virgen cortada en pequeños trozos de unos centímetros de tamaño, cargados automáticamente a través de dispositivos mecánicos especiales. El combustible procede de materiales diferentes, como podas desmenuzadas, deshechos de aserrería o biomasa procedentes de las actividades forestales (corte de monte bajo, aclareos y cortes de conversión).

Los sistemas de astillas son totalmente automatizados y no tienen límite de tamaño, pudiendo alcanzar potencias de incluso varios MW térmicos. Este tipo de equipos se componen propiamente del cuerpo de la caldera, contenedor o local especial (silo) para almacenar las astillas, sistema de movimiento del combustible, centralita de regulación, y de un acumulador inercial. Tiene la desventaja de no poder emplear diversidad en la biomasa combustible.

- **Calderas de pellets**

El pellet es un combustible de madera virgen seca y prensada en pequeños cilindros, sin aditivos. El peso específico del pellet a granel es de aproximadamente 600-700 kg/m<sup>3</sup>, mucho más alto que el de otros combustibles no prensados de madera (astillas). El poder calorífico alcanza las 17,584 kJ/kg, con una densidad energética de 10.8– 12.2 GJ/m<sup>3</sup>.

A causa de la forma cilíndrica y lisa y del tamaño pequeño, el pellet tiende a portarse como un fluido, lo que facilita el movimiento del combustible y la carga automática de las calderas. La alta densidad energética y la facilidad de movimiento hacen del pellet el combustible vegetal más indicado para sistemas de calefacción automáticos de todos los tamaños.

Un sistema de combustión de pellets consta de los siguientes componentes: cuerpo de la caldera, depósito del pellet, sistema de alimentación del pellet y de una central de regulación.

- **Calderas de lecho fluidizado**

Estas son capaces de quemar combustible desmenuzado sin tratar, con niveles de humedad de hasta un 55-60 por ciento, en una zona mezcladora turbulenta encima de un lecho fluidizado de arena de sílice inerte. El combustible se mantiene en suspensión durante la combustión por la alta velocidad del aire expulsado a través del lecho de arena, lo que determina que la arena adopte propiedades fluidizadas y de libre flujo. Alcanzan temperaturas no mayores a los 800 °C.

## **PRODUCTOS OBTENIDOS**

Los productos que se obtienen con la combustión directa de la biomasa son la energía térmica (agua caliente, aire caliente, gases calientes o vapor de agua), y energía eléctrica; según se muestra a continuación:

### ▪ **Generación de energía térmica**

El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento, está basado en la combustión de biomasa sólida para producir ya sea un flujo de gases calientes, aire caliente, agua caliente o vapor de agua.

Generalmente las aplicaciones mas comunes son la producción de vapor de agua para diversas aplicaciones, ya sean en la industria forestal, del papel, sementera, química u otras. En la obtención del vapor de agua, se aprovecha el calor contenido en los gases de combustión resultantes del proceso de oxidación de la biomasa, mediante un sistema de transferencia de calor efectuado dentro del cuerpo de la caldera. El vapor se puede obtener a diferentes condiciones de presión y temperatura dependiendo de los usos que se le vayan a dar.

La energía térmica es utilizada fundamentalmente en procesos de calefacción (usos domésticos y agropecuarios, granjas e invernaderos) y usos industriales.

### ▪ **Generación de energía eléctrica**

La generación eléctrica permite el aprovechamiento de elevadas cantidades de biomasa, ya que con su combustión se obtiene vapor a alta presión que se expande en una turbina y acciona un alternador. Las turbinas de vapor pueden ser a contrapresión, de extracción condensación, y de condensación.

### ▪ **Cogeneración**

La cogeneración es la producción de energía eléctrica conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambas.

A diferencia de un sistema convencional que produce electricidad o energía térmica, la cogeneración consiste en la producción simultánea o secuencial de energía mecánica y térmica a partir de una misma fuente de energía.

Aunque cada caso debe ser estudiado en detalle, en general la cogeneración con biomasa es adecuada para empresas con consumos de energía eléctrica importantes, con un factor de utilización elevado (más de 5000 h/año) y donde sea posible aprovechar energía térmica a temperatura media (alrededor de 400-500 °C). Un sistema de cogeneración basado en la utilización de biomasa permite disminuir el coste de la factura, tanto la eléctrica (existiendo la posibilidad añadida de venta del excedente de electricidad) como la de combustibles fósiles.

## COSTOS DE LA TECNOLOGÍA

### ▪ Tecnologías de combustión

La tecnología más comúnmente empleada en los procesos de combustión directa son las calderas acuotubulares de parrilla móvil. Para determinar el costo de este tipo de tecnología se cuenta con diversas cotizaciones de calderas para combustión de biomasa con quemadores mixtos de biomasa y combustóleo. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tipo	Capacidad térmica (KW <sub>t</sub> )	Capacidad de vapor (kg/h)	Costo (US\$)
Acuotubular	450	9,390	875,194
Acuotubular	600	12,520	994,194
Acuotubular	750	15,650	1,123,490

Tabla 1-1: Cotización caldera

(Fuente: Comercializadora Flexible, México, Diciembre 2004)

### ▪ Tecnologías de cogeneración

Los costos de otras capacidades y tipos de tecnologías empleadas en los procesos de cogeneración que emplean sistemas de combustión directa se muestran en la siguiente tabla. Se estima que del costo global presentado, el 43% corresponde únicamente al sistema de combustión (caldera).

Número de planta		1	2
<b>Generales</b>	Nombre	Cecsa y Biomap	Constitución
	País	<b>España</b>	<b>Chile</b>
	Potencia instalada	<b>12 MW<sub>e</sub></b>	<b>9.2 MW<sub>e</sub></b>
	Generación media anual	96,000 MW <sub>e</sub> h/año	73,600 MW <sub>e</sub> h/año
	Año operación	Marzo-2001	Abril-1995
	Disponibilidad	8,000 h/ año	8,000 h/ año
	Costo planta	<b>\$20,740,000 dls</b>	<b>\$10,000,000 dls</b>
<b>Caldera</b>	Tecnología	Acuotubular con parilla móvil	Acuotubular con parilla fija
	Combustible	Paja de cardo	Desechos madera
	Consumo combustible	12.5 ton/h	18 ton/h
	Flujo vapor total	44.7 ton/h	45 ton/h
	Condición del vapor	<b>64 kg/cm<sup>2</sup> y 488 °C</b>	<b>45 kg/cm<sup>2</sup> y 450 °C</b>
<b>Turbina</b>	Tecnología	No especificado	De condensación a 3,600 rpm
	Flujo extracción a proceso	No especificado	15 ton/h
	Condición extracción	No especificado	7 kg/cm <sup>2</sup>

Número de planta		3	4
<b>Generales</b>	Nombre	Azucarera el viejo	Sanguesa
	País	<b>Costa Rica</b>	<b>España</b>
	Potencia instalada	<b>7.3 MW<sub>e</sub></b>	<b>25 MW<sub>e</sub></b>
	Generación media anual	No especificado	No especificado
	Año operación	1990	2001
	Disponibilidad	7,000 h/ año	8,000 h/año
	Costo planta	<b>\$7,747,584 dls</b>	<b>\$8,133,000 Ptas.</b>
<b>Caldera</b>	Tecnología	Acuotubular con parilla móvil	Acuotubular con parilla móvil
	Combustible	Bagazo de caña	Paja
	Consumo combustible	No especificado	20 ton/h
	Flujo vapor total	62.5 ton/h	No especificado
	Condición del vapor	<b>28.5 kg/cm<sup>2</sup> y 176 °C</b>	<b>93.7 kg/cm<sup>2</sup> y 520-540°C</b>
<b>Turbina</b>	Tecnología	De condensación	De condensación
	Flujo extracción a proceso	29.5 ton/h	No especificado
	Condición extracción	1.4 kg/cm <sup>2</sup>	No especificado

Número de planta		5	6
<b>Generales</b>	Nombre	Allarluz	Fyma
	País	<b>España</b>	<b>Uruguay</b>
	Potencia instalada	<b>10 MW<sub>e</sub></b>	<b>2 MW<sub>e</sub></b>
	Generación media anual	80,000 MW <sub>e</sub> h/año	12,000 MW <sub>e</sub> h/año
	Año operación	Febrero 2001	2000
	Disponibilidad	8,000 h/ año	6,000 h/ año
	Costo planta	<b>\$2,586,000 Ptas.</b>	<b>\$2,500,000 dls</b>
<b>Caldera</b>	Tecnología	No especificado	Acuotubular con parilla móvil
	Combustible	Desechos madera	Desechos madera
	Consumo combustible	12.5 ton/h 100,000 ton/año	5 ton/h 30,000 ton/año
	Flujo vapor total	No especificado	15 ton/h
	Condición del vapor	No especificado	No especificado
<b>Turbina</b>	Tecnología	No especificado	De condensación c/extracción
	Flujo extracción a proceso	No especificado	No especificado
	Condición extracción	No especificado	No especificado

Tabla 1-2: Experiencias en el ámbito mundial sobre cogeneración con biomasa

Fuentes:

FYMSA: Producción de energía eléctrica en un aserradero, por Gustavo Balerio.

CONSTITUCIÓN: Cogeneración usando desechos de madera como combustible principal, por Alejandro Rojas Belmar.

AZUCARERA EL VIEJO, por Ana Lorena León.

CESCA Y BIOMAP: Las primeras plantas de biomasa a partir de cultivos energéticos en España, Info-energía.

SANGUESA: Planta de biomasa de Sangüesa de combustión de paja con una potencia total neta de 25 MW<sub>e</sub>, por Carlos Itoiz Beunza.

ALLARLUZ: La primera central de biomasa en Galicia, Info-energía.

#### ▪ Tecnologías de autogeneración eléctrica

Los siguientes tres casos corresponden a plantas que únicamente generan electricidad a partir de la biomasa en España. Se muestra la capacidad instalada, el costo y los requerimientos de combustible.

Potencia (MW <sub>e</sub> )	Biomasa (ton/MW <sub>e</sub> )	Inversión (US\$/kW <sub>e</sub> )
5	8,000	1,575
12	6,500	1,290
25	5,400	1,110

Tabla 1-3: Costos de la tecnología de autogeneración, 2001

Se puede observar, que a mayor potencia instalada, la necesidad de combustible es menor; así también, a mayor potencia la inversión por kW<sub>e</sub> instalado disminuye.

## DESARROLLO TECNOLÓGICO

En México el aprovechamiento de la biomasa mediante procesos de combustión esta limitada al empleo del bagazo de caña y para producir vapor en la industria de aserrío. Existe una experiencia limitada en el uso de calderas para producción de electricidad mediante el uso de residuos forestales, principalmente en Durango y Chihuahua. Hasta febrero del 2005 la generación de energía eléctrica correspondiente a este tipo de tecnología fue de 313 GW<sub>e</sub>h/año, empleándose como combustible el bagazo de caña.

En general se puede afirmar que a excepción de las calderas de lecho fluidizado, la tecnología de combustión directa se encuentra en fase comercial de manera exitosa. A pesar de que actualmente ya existen calderas de lecho fluidizado en operación, el estado actual de este tipo de calderas aun se encuentra en fase de desarrollo, y toman cada vez más importancia debido a que pueden emplearse para un gran número de combustibles alternativos obteniéndose mayores eficiencias de combustión. Para simplificar estos casos, a continuación se presentan dos desarrollos experimentales que tienen que ver con el aprovechamiento de los recursos biomásicos en una calderas de lecho fluidizado.

## 2. GASIFICADORES

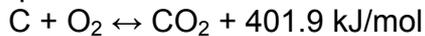
Bajo este nombre se engloban las tecnologías empleadas en los procesos de combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

### DESCRIPCIÓN GENERAL

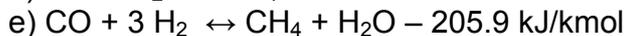
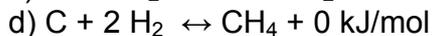
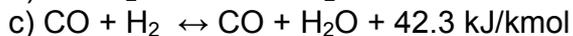
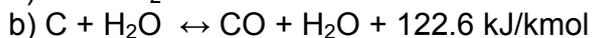
La gasificación es un proceso térmico que permite la conversión de un combustible sólido, tal como la biomasa en un combustible gaseoso, mediante un proceso de oxidación parcial. El gas resultante contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), alquitrán, agua y pequeñas cantidades de hidrocarburos tales como el etano. Este gas posee un bajo poder calorífico, del orden de 4 a 7 MJ/m<sup>3</sup>; en cambio, si se emplea como agente oxidante el O<sub>2</sub> se pueden alcanzar de 10 a 18 MJ/m<sup>3</sup>. La tecnología más empleada es, sin embargo, la que utiliza aire como agente oxidante, por razones económicas y tecnológicas. En los tipos de gasificadores aquí considerados el combustible sólido se calienta por combustión de una parte del combustible. Los gases de la combustión se reducen seguidamente pasándolos a través de un lecho de combustible a alta temperatura.

En la combustión completa se obtiene dióxido de carbono, a partir del carbono y agua, del hidrógeno. El oxígeno procedente del combustible se incorpora naturalmente a los productos de la combustión, reduciendo con ello la cantidad necesaria de aire para la combustión.

La oxidación, o combustión, se describe por las siguientes fórmulas de reacción química:



A continuación se dan las reacciones más importantes que tienen lugar en la zona de reducción de un gasificador (Fuente No. 151), entre los diferentes reactivos gaseosos y sólidos. El signo negativo indica que se genera calor en la reacción y el signo positivo que la reacción requiere calor.



Las ecuaciones (a) y (b) que son las reacciones principales de reducción, demuestran que la reducción requiere calor. Por ello, la temperatura del gas disminuirá durante la reducción. La reacción (c) describe el denominado equilibrio agua-gas.

▪ **Composición típica del gas**

La introducción del concepto de equilibrio agua-gas, permite calcular teóricamente la composición del gas procedente de un gasificador que ha alcanzado el equilibrio a una temperatura dada, tal como demuestran Tobler y Schlaepfer.

El sistema consiste en deducir del balance de volúmenes de los cuatro principales elementos de entrada (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno), un balance energético para todo el sistema y la relación dada por el equilibrio agua-gas. Suponiendo también que las cantidades de metano del gas pobre, por kg de combustible seco, son constantes (como sucede, más o menos, en el caso de los gasificadores en condiciones normales de funcionamiento). Se dispone de una serie de relaciones que permiten el cálculo de las composiciones del gas para una amplia variedad de parámetros de entrada (contenido de humedad del combustible) y características del sistema (pérdidas de calor por convección, radiación y calor sensible del gas).

En la tabla 2-1 se dan las composiciones normales de gas que se obtienen de gasificadores comerciales de tiro invertido, de madera y carbón vegetal, que operan con combustibles de contenido de humedad bajo a medio (madera 20%, carbón vegetal 7%) y que emplean como agente gasificante el aire.

<b>Componente</b>	<b>Gas de Madera (% volumen)</b>	<b>Gas de Carbón vegetal (% volumen)</b>
Nitrógeno	50 - 54	55 - 65
Monóxido de carbono	17 - 22	28 - 32
Dióxido de carbono	9 - 15	1 - 3
Hidrógeno	12 - 20	4 - 10
Metano	2 - 3	0 - 2
Valor calorífico del gas kJ/m <sup>3</sup>	5 000 - 5 900	4 500 - 5 600

Tabla 2-1: Composición del gas procedente de gasificadores comerciales de madera y carbón vegetal, Fuente No. 151

En la tabla 2-2 se muestra un comparativo de la composición media del gas obtenida cuando se emplean los diversos tipos de gasificantes:

<b>Agente gasificante</b>	<b>Poder Calorífico Superior (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Composición del gas (%)</b>						<b>Uso</b>
		<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>C</b>	
Aire	menor de 6	16	20	12	2	50		Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3		Gas de síntesis
Vapor de agua	10-21	50	20	22	6		2	Gas de síntesis
Hidrógeno	mayor de 30							Sustituto de gas natural

Tabla 2-2: Composición media del gas para diversos agentes gasificantes, Fuente No. 140

- **Combustibles para gasificación**

Los combustibles de biomasa disponibles para gasificación incluyen el carbón vegetal, la madera y los residuos de madera (ramas, ramillas, raíces, corteza, recortes de madera y aserrín) y también múltiples residuos agrícolas (mazorcas de maíz, estopas de coco, pajas de cereales, cáscaras de arroz, entre otros) y turba.

Como estos combustibles difieren mucho en sus propiedades químicas, físicas y morfológicas, tienen diferentes exigencias en cuanto al método de gasificación y, en consecuencia, requieren diferentes diseños del reactor e incluso distintas tecnologías de gasificación. Se deduce, en consecuencia, que no existe un gasificador "universal" capaz de manejar la totalidad o la mayoría de los tipos de combustibles. La variedad de diseños incluye los de tiro directo, tiro invertido, tiro transversal y lecho fluidizado. Todos los sistemas presentan ventajas e inconvenientes respecto al tipo de combustible, aplicación y sencillez de funcionamiento y, por ello, cada uno tendrá sus propias ventajas técnicas o económicas en una serie determinada de circunstancias.

Cada tipo de gasificador funcionará satisfactoriamente respecto a estabilidad, calidad del gas, eficiencia y pérdidas de presión, sólo dentro de ciertos límites de las propiedades del combustible, de las cuales las más importantes son:

- Contenido energético: Cuando el gas se emplea para fines de combustión directa, unos valores caloríficos bajos pueden ser tolerables. En la tabla 2-3 se dan los promedios de los valores caloríficos inferiores, de la madera, el carbón vegetal y la turba.

Combustible	Contenido de humedad (%)	Valor calorífico inferior (kJ/kg)
Madera	20 - 25	13,000 – 15,000
Carbón vegetal	2 - 7	29,000 – 30,000
Turba	35 - 50	12,000 – 14,000

Tabla 2-3: Promedios de los valores caloríficos inferiores, Fuente No. 151

- Contenido de humedad: El uso de combustibles con contenidos de humedad (base seca) hasta de un 40 a un 50%, es viable, especialmente cuando se emplean gasificadores de tiro directo. En los gasificadores de tiro invertido, un alto contenido de humedad, da lugar no sólo a unos bajos valores caloríficos del gas, sino también a unas bajas temperaturas en la zona de oxidación, lo que puede ocasionar una capacidad insuficiente de transformación de los alquitranes, si el gas se emplea para motores.
- Materias volátiles: Si el combustible contiene más del 10% de materias volátiles, debe emplearse en gasógenos de tiro invertido. La cantidad de volátiles en el material de alimentación determina la necesidad de medidas especiales, como la extracción de los alquitranes del gas producido. En la práctica, el único combustible de biomasa que no necesita esta atención especial es el carbón vegetal de buena calidad.

- Tamaño de las partículas y distribución por tamaño: Los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido tienen limitaciones en cuanto al rango aceptable del tamaño del combustible contenido en el material de alimentación. Un material de alimentación de grano fino o blando, puede ocasionar problemas de circulación en la sección del depósito del gasificador y también por una caída inadmisibles de presión encima de la zona de reducción y por una alta proporción de polvo en el gas.

Un tamaño excesivo de las partículas, da lugar a una menor reactividad del combustible, lo que se traduce en problemas de arranque y mala calidad del gas. Los tamaños excesivamente grandes de las partículas pueden ocasionar problemas de canalización del gas, especialmente en los gasificadores de tiro directo.

En general, los gasificadores de madera funcionan con pedazos de madera y astillas cuya dimensión varía de 8 x 4 x 4 cm a 1 x 0.5 x 0.5 cm. Los gasificadores de carbón vegetal generalmente se abastecen con pedazos de carbón cuya dimensión varía entre 1 x 1 x 1 cm y 3 x 3 x 3 cm. Los gasificadores de lecho fluidizado normalmente pueden funcionar con combustibles cuyos diámetros de partículas varían entre 0.1 y 20 mm.

- Contenido de cenizas y composición química de éstas: El que se produzca o no la formación de escoria, depende del contenido de cenizas del combustible, de las características de fusión de las cenizas y de la distribución de la temperatura en el gasificador. Las cenizas pueden causar diversos problemas, sobre todo en los gasificadores de tiro directo o de tiro invertido. La formación de escoria en el reactor, ocasionada un aumento importante de la mano de obra necesaria para el funcionamiento del gasificador, así como la formación excesiva de alquitrán y el bloqueo total del reactor. En peor caso, existe la posibilidad de que se produzcan fugas de aire con el consiguiente riesgo de explosión, especialmente en los gasificadores de tiro directo.

En general, no se observa formación de escoria con combustibles que poseen un contenido de cenizas inferior al 5 ó 6%. Cabe esperar una importante formación de escoria en el caso de combustibles que posean un contenido de cenizas del 12 por ciento y más. Para combustibles con contenido de cenizas entre el 6 y el 12 por ciento, el resultado en cuanto a formación de escoria depende en gran medida de la temperatura de fusión de las cenizas. En lo que se refiere al contenido de cenizas, la madera en bruto y los carbones de madera rara vez presentan problemas, siendo su contenido de cenizas normalmente del 0.72 al 2.5 por ciento.

Los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido pueden funcionar con combustibles que producen escoria, si se modifican las parrillas estáticas a parrillas de movimiento continuo. Los gasificadores de tiro transversal que trabajan a temperaturas muy elevadas, de 1500 °C y más, necesitan precauciones especiales respecto al contenido de cenizas del combustible.

En la tabla 2-4 enumera una serie de residuos agrícolas que han sido ensayados, respecto a sus propiedades de formación de escoria, en un pequeño gasógeno de laboratorio de tiro invertido.

<b>Combustible</b>	<b>Contenido de cenizas (%)</b>	<b>Grado de formación de escoria</b>
<b>Combustibles que forman escoria</b>		
Mezcla de paja de cebada	10.3	Fuerte
Paja de frijoles	10.2	Fuerte
Tallos de maíz	6.4	Moderado
Restos de desmotado del algodón	17.6	Fuerte
Tallos de algodón prensados	17.2	Fuerte
Gránulos de combustible obtenido de desechos	10.4	Fuerte
Cáscaras de arroz en gránulos	14.9	Fuerte
Paja de cárcamo	6.0	Pequeño
Mezcla de cáscaras de nueces, en gránulos	5.8	Moderado
Paja de trigo y tallos de maíz	7.4	Fuerte
<b>Combustibles que no forman escoria</b>		
Paja de alfalfa prensada	6.0	
Cáscaras de almendra	4.8	
Mazorcas de maíz	1.5	
Huesos de aceituna	3.2	
Huesos de melocotón	0.9	
Huesos de ciruela	0.5	
Cáscaras de nuez (prensadas)	1.1	
Bloques de madera de abeto Douglas	0.2	
Podas municipales de árboles	3.0	
Residuos de fabricación de productos de madera	0.3	
Astillas de madera de trozas enteras	0.1	

Tabla 2-4: Formación de escoria de residuos agrícolas en un pequeño gasificador de laboratorio de tiro invertido, Fuente No. 151

- **Reactividad:** La reactividad es un factor importante que determina el coeficiente de reducción, en un gasificador, del dióxido de carbono en monóxido de carbono. La reactividad influye en el diseño del reactor porque impone la altura necesaria de la zona de reducción. La reactividad depende, en primer lugar, del tipo de combustible. Por ejemplo, se ha observado que combustibles como la madera, el carbón vegetal y la turba, son mucho más reactivos que el carbón mineral.

- Densidad aparente: Los combustibles de alta densidad aparente tienen ventajas porque representan un alto valor de energía por volumen. Consecuentemente, estos combustibles necesitan menos espacio de depósito para un tiempo dado de recarga. Los combustibles de baja densidad aparente dan lugar a veces a un caudal insuficiente de gas lo que se traduce en valores caloríficos del gas reducido, y finalmente en la combustión del carbón en la zona de reducción.

Las densidades medias aparentes de la madera, el carbón vegetal y la turba se dan en la tabla 2-5.

<b>Combustible</b>	<b>Densidades aparentes (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Madera	300 - 550
Carbón vegetal	200 - 300
Turba	300 - 400

Tabla 2-5: Densidades aparentes de tipo medio, Fuente No. 151

Antes de elegir un gasificador para cualquier combustible en particular es importante asegurarse de que el combustible cumple los requisitos del gasificador o que puede ser tratado para cumplirlos. Si el combustible no ha sido gasificado anteriormente con éxito, habrá que realizar ensayos prácticos.

### **Evaluación de diversos tipos de biomasa como combustible para gasificadores**

- Carbón vegetal

Como el carbón vegetal de buena calidad casi no contiene alquitranes, es un combustible conveniente para todo tipo de gasificadores. Un buen carbón vegetal para gasificadores contiene pocas materias minerales y no se desmenuza o desintegra fácilmente.

Las principales desventajas son el coste relativamente elevado del carbón vegetal, lo que reduce su competitividad en comparación con los combustibles líquidos, y las pérdidas energéticas que tienen lugar en la fabricación del carbón (puede perderse hasta el 70% de la energía presente originalmente en el carbón).

- Madera

La mayoría de las especies de madera tienen contenidos de ceniza inferiores al 2 por ciento, siendo, por lo tanto, combustibles apropiados para los gasificadores de lecho fijo. Debido al alto contenido de sustancias de la madera, los sistemas de tiro directo producen gas que contiene alquitrán, apropiado sobre todo para combustión directa. La depuración del gas para hacerlo apropiado para motores, es bastante difícil y requiere un esfuerzo importante de capital y mano de obra. Se pueden diseñar sistemas de tiro invertido para conseguir un gas prácticamente libre de alquitrán, dentro de ciertos límites de capacidad, cuando se alimentan con bloques de madera o astillas de madera, de bajo contenido de humedad. Después de pasar por un conjunto relativamente sencillo de depuración, el gas se puede utilizar para motores de combustión interna.

- Residuos agrícolas

Gran parte de lo publicado al respecto se refiere a la cáscara de coco, cáscara de arroz y a las mazorcas de maíz, siendo poco probable según parece que creen problemas serios en los gasificadores de lecho fijo. Los residuos de coco, de acuerdo con la información disponible, presentan problemas de formación de aglomerados en la zona del depósito pero el material se puede gasificar cuando se mezcla con cierta cantidad de madera.

La mayoría de los residuos de cereales, tienen contenidos de cenizas superiores al diez por ciento, presentando problemas de formación de escorias en los gasificadores de tiro invertido. La cáscara de arroz puede tener contenidos de cenizas del veinte por ciento y más, por lo que probablemente es el combustible existente de mayor dificultad.

Es posible gasificar la mayoría de los tipos de residuos agrícolas en los gasificadores de tiro directo, sin embargo, los costes de capital, mantenimiento y mano de obra y las consecuencias ambientales (eliminación de condensados de alquitrán) que representa la depuración del gas, impiden las aplicaciones para motores en la mayoría de las circunstancias. Los gasificadores de lecho fluidizado parecen ser una gran promesa para la gasificación de una serie de residuos agrícolas "difíciles". Actualmente sólo se dispone de instalaciones semi-comerciales, siendo muy limitada la experiencia sobre su funcionamiento.

- Aserrín

La mayoría de los gasificadores de tiro invertido actualmente disponibles no son apropiados para aserrín que no esté granulado. Los problemas que se presentan son: producción excesiva de alquitrán, caída inadmisibles de presión y falta de circulación en el depósito de combustible.

Los gasificadores de lecho fluidizado pueden aceptar pequeñas partículas de aserrín y producir un gas de buena calidad para hornos. Para su empleo en motores es necesario un sistema de depuración bastante complicado.

## TIPOS DE TECNOLOGÍA

- **Gasificador de corriente ascendente o tiro directo**

El tipo de gasificador más antiguo y sencillo es el de tiro directo o gasificador ascendente que se presenta esquemáticamente en la Figura 2-1.

La toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba. Cerca de la parrilla, en el fondo, tienen lugar las reacciones de combustión, que van seguidas de reacciones de reducción algo más arriba, en el gasificador. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirólisis de la carga, como resultado de la transferencia de calor, por convección forzada y radiación, de las zonas inferiores. Los alquitranes y productos volátiles producidos durante este proceso son transportados por la corriente de gas. Se remueven las cenizas del fondo del gasificador.

Las principales ventajas de este tipo de gasificador consisten en su simplicidad, alta proporción de carbón vegetal quemado e intercambio interno de calor que motiva unas bajas temperaturas de salida del gas y alta eficiencia del equipo, y también la posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga (aserrín, cáscaras de cereales, entre otros).

Los principales inconvenientes provienen de la posibilidad de que se produzcan "chimeneas" en el equipo, lo que puede motivar la salida de oxígeno y situaciones explosivas peligrosas y la necesidad de instalar parrillas de movimiento automático y también problemas relacionados con la eliminación de líquidos condensados que contienen alquitranes, resultantes de las operaciones de depuración del gas. Esto último tiene poca importancia si el gas se emplea para aplicaciones directas del calor, en cuyo caso los alquitranes simplemente se queman.

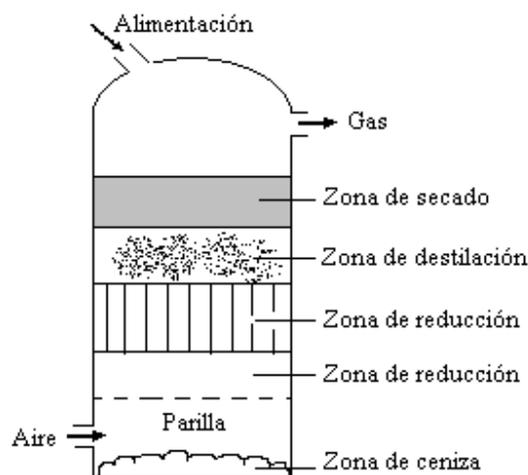


Figura 2-1: Gasificador de corriente ascendente o tiro directo

#### ▪ Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido

Se ha encontrado una solución al problema del arrastre de alquitrán con la corriente de gas, diseñando gasificadores de tiro invertido o corriente descendente, en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de ésta. El gas pobre sale por el fondo del aparato de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2-2.

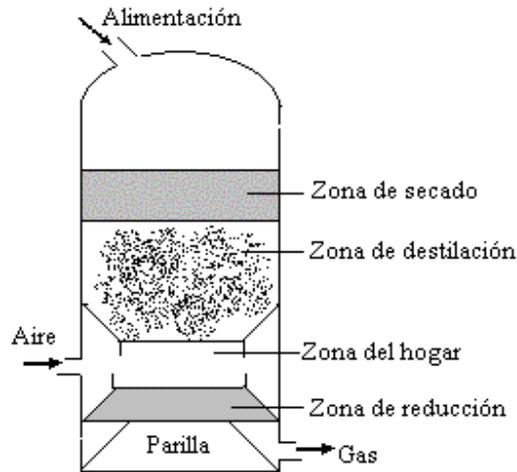


Figura 2-2: Gasificador de corriente descendente o de tiro invertido

En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman por ello en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano.

Dependiendo de la temperatura de la zona incandescente y del tiempo de paso de los vapores con alquitrán, se logra una descomposición más o menos completa de los alquitranes. La principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores.

Debido al menor contenido de componentes orgánicos en el líquido condensado, los gasificadores de tiro invertido sufren menos objeciones ambientales que los gasificadores de tiro directo.

Un inconveniente importante de los equipos de tiro invertido es la imposibilidad de funcionar con una serie de combustibles no elaborados. En particular, los materiales blandos y de baja densidad ocasionan problemas de circulación y una caída excesiva de presión y, el combustible sólido hay que convertirlo en gránulos o briquetas antes de utilizarlo. Los gasificadores de tiro invertido sufren también los problemas relacionados con los combustibles de alto contenido de cenizas (formación de escoria), en mayor proporción que los gasificadores de tiro directo.

Un pequeño inconveniente del sistema de tiro invertido en comparación con el de tiro directo es su menor eficiencia, debida a la falta de intercambio interno de calor y al menor valor calorífico del gas. Además de esto, la necesidad de mantener unas temperaturas altas uniformes en una sección transversal determinada, hace imposible el uso de los gasificadores de tiro invertido en una serie de potencias superior a los 350 kW<sub>e</sub>.

### ▪ Gasificador de lecho fluidizado

El funcionamiento de los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido se ve afectado por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible. Los problemas que se encuentran corrientemente son: la falta de tiro en el depósito, la formación de escoria y la excesiva caída de presión en el gasificador. Un sistema de diseño que pretende eliminar tales dificultades es el gasificador de lecho fluidizado, que se ilustra esquemáticamente en la Figura 2-3.

Se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Se comienza por calentar externamente el lecho y el material de alimentación se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho. Como resultado de este tratamiento, el combustible se piroliza muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes, con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos. En la fase de gas, se produce una nueva gasificación y reacciones de transformación de los alquitranes. La mayoría de los sistemas van equipados con un ciclón interno, a fin de reducir al mínimo el escape de alquitrán por soplado. Las partículas de ceniza se transportan también por la parte superior del reactor, debiendo extraerse de la corriente de gas si este se emplea en aplicaciones para motores.

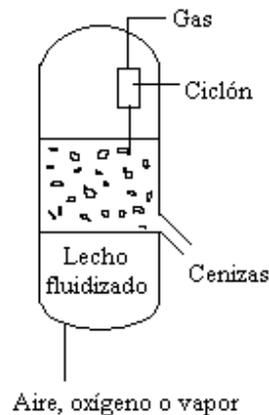


Figura 2-3: Gasificador de lecho fluidizado

Las principales ventajas de los gasificadores de lecho fluidizado, proceden de su flexibilidad en cuanto al material de alimentación debida al fácil control de la temperatura que puede mantenerse por debajo del punto de fusión de las cenizas (cáscaras de arroz) y a su capacidad de funcionar con materiales blandos y de grano fino (aserrín) sin necesidad de un proceso previo. Sin embargo, gasificador de lecho fluidizado presenta el inconveniente de que el contenido de alquitrán del gas producido (hasta 500 mg/m<sup>3</sup> de gas) es bastante alto, así como presentar una respuesta lenta a los cambios de carga.

Debido especialmente al equipo de control necesario para hacer frente a este último inconveniente, no se prevén gasificadores muy pequeños de lecho fluidizado, debiendo establecerse su campo de aplicación, en principio, por encima de los 500 kW<sub>e</sub>.

Los gasificadores de lecho fluidizado están actualmente disponibles, con carácter semi-comercial, en varios fabricantes de Europa y EE.UU.

#### ▪ Gasificados de tiro transversal

Los gasificadores de tiro transversal, que se ilustran esquemáticamente en la Figura 2-4 son una adaptación para el empleo de carbón vegetal. La gasificación del carbón vegetal produce temperaturas muy elevadas (1500°C y más) en la zona de oxidación que pueden producir problemas en los materiales. En los gasificadores de tiro transversal, el propio combustible (carbón vegetal) sirve de aislamiento contra estas altas temperaturas.

Las ventajas del sistema están en poder funcionar en muy pequeña escala, pudiendo resultar económicamente viables, en ciertas condiciones, instalaciones inferiores a 10 kW<sub>e</sub>. La razón está en la gran sencillez del conjunto de depuración del gas (sólo un quemador de ciclón y un filtro caliente) que se puede emplear cuando se utiliza este tipo de gasificador junto con motores pequeños.

Un inconveniente de los gasificadores de tiro transversal es su capacidad mínima de transformación del alquitrán y la necesidad consiguiente de emplear carbón vegetal de alta calidad (bajo contenido de productos volátiles).

Debido a la incertidumbre sobre la calidad del carbón, cierto número de gasificadores de carbón vegetal emplean el sistema de corriente descendente para mantener al menos una capacidad mínima de cracking del alquitrán.

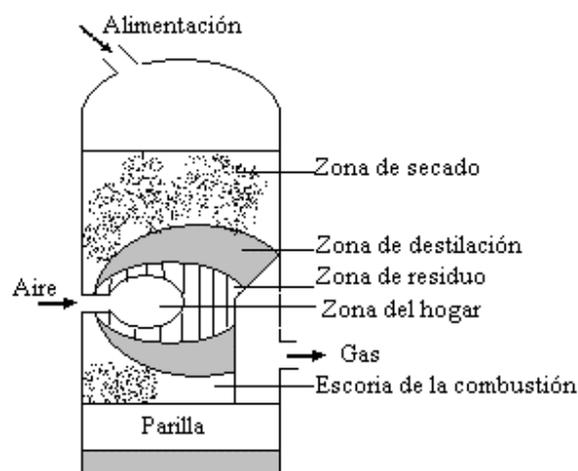


Figura 2-4: Gasificador de tiro transversal

## PRODUCTOS OBTENIDOS

Foley y Barnard han publicado un análisis de las aplicaciones de los gasificadores en el que se expone el uso de los gasificadores para la producción de gas combustible, para la generación de calor y el empleo de los gasificadores en combinación con los motores.

### ▪ **Producción de energía térmica**

La mayoría de los gasificadores que funcionan comercialmente, en la actualidad se utilizan para la producción de calor, más que para combustible de motores de combustión interna, debido a sus menores exigencias en cuanto al valor calorífico del gas y al contenido de alquitrán. La ventaja fundamental de un gasificador acoplado de forma compacta con un sistema de combustión, es su capacidad para producir mayores temperaturas que las que se pueden lograr con una combustión convencional en parrilla.

Todos los tipos de gasificadores pueden producir gas pobre para combustión, pero por razón de sencillez se prefieren los gasificadores de tiro directo en los pequeños sistemas (por debajo de una potencia térmica de 1 MW), mientras que los gasificadores de lecho fluidizado son apropiados para potencias superiores.

Los usuarios con mayor potencial de utilización futura del gas combustible de bajo poder calorífico, se encontrarán sin duda entre las siguientes industrias: metalurgia, cerámica, cemento, cal y pasta de celulosa.

### ▪ **Producción de energía mecánica o eléctrica en instalaciones fijas**

Los gasificadores conectados a motores fijos, ofrecen la posibilidad de utilizar la biomasa para producir energía mecánica o eléctrica, con un campo de aplicación desde unos pocos kW<sub>e</sub> hasta algunos MW<sub>e</sub>.

El gas pobre de calidad para motor necesita un valor calorífico suficientemente elevado (superior a 4,200 kJ/m<sup>3</sup>), debe estar libre prácticamente de alquitrán y de polvo, para reducir al mínimo el desgaste del motor, y debe estar lo más frío posible a fin de lograr el máximo de admisión de gas en el motor y la mayor potencia de salida.

#### **a) Aplicaciones de gran dimensión (500 kW<sub>e</sub> y superiores)**

Este es el dominio de las instalaciones especializadas de lecho fluidizado o de lecho fijo.

El equipo se hace de encargo y completamente automatizado. El diseño y la fabricación deben estar a cargo de empresas especializadas de mecánica y construcción.

Los costes de los equipos serán probablemente del orden de 1,000 US\$ por kW<sub>e</sub> instalado o superiores.

### **b) Aplicaciones de dimensión intermedia (30-500 kW<sub>e</sub>)**

El equipo de lecho fijo, alimentado por madera, carbón vegetal y algunos tipos de residuos agrícolas (mazorcas de maíz, cáscaras de coco), lo ofrecen una serie de fabricantes europeos y de los EE.UU.

Una demanda adecuada y continuada de este tipo de equipos, podría llevar a la normalización de componentes y diseños, reduciéndose de esta forma los costes de producción. Por el momento, los costes que se cotizan son del orden de los 300-800 US\$/kW<sub>e</sub> (sólo el gasificador) dependiendo del tipo y capacidad, del nivel de automatización y del equipo auxiliar.

Se prevén aplicaciones en industrias pequeñas a medianas de carácter forestal y agrícola y también en el suministro de energía a comunidades apartadas.

### **c) Aplicaciones de pequeña dimensión (7-30 kW<sub>e</sub>)**

Esta dimensión podría ser adecuada en multitud de aplicaciones para pequeños poblados de países en desarrollo.

El equipo debe ser barato (menos de 150 US\$/kW<sub>e</sub>), de gran confianza y no debe exigir habilidades especiales para su funcionamiento y mantenimiento.

Diseños adecuados para fabricación local se ensayan y producen en Las Filipinas, y Tanzania. Por el momento, son limitadas las pruebas documentales de su éxito.

Según parece, los gasificadores de carbón vegetal tienden a producir menos problemas operativos en este nivel energético que los gasificadores alimentados con madera o residuos agrícolas. A veces se piensa también que los sistemas a base de gasificadores de carbón vegetal pueden fabricarse más baratos que los de gasificadores de madera en el nivel energético de 7 a 30 kW de potencia.

### **d) Aplicaciones en micro escala (1-7 kW<sub>e</sub>)**

Esta es una dimensión utilizada por pequeños y medianos agricultores de los países en desarrollo para dotar de energía a los sistemas de riego.

El equipo debe ser transportable, barato, sencillo y ligero de peso. Es muy posible que sólo los gasificadores pequeños, de carbón vegetal y fabricados localmente, puedan cumplir los requisitos anteriores.

#### **▪ Aplicaciones móviles**

El uso de los gasificadores de tiro invertido, alimentados con madera o carbón vegetal para accionar automóviles, camiones, autobuses, trenes, y barcos, ha demostrado su valor, manteniendo al menos un país europeo (Suecia) sus planes de producción en gran escala en caso de emergencia. Se está estudiando actualmente esta técnica para impulsar tractores (Suiza, Francia, Finlandia, Países Bajos) y también para pequeños vagones y barcos (Filipinas) y camiones (Sri Lanka).

No obstante, las aplicaciones móviles presentan una serie de dificultades adicionales, en comparación con las instalaciones fijas.

En primer lugar la construcción tiene que ser lo más ligera posible a fin de no reducir excesivamente la capacidad de transporte del vehículo. En segundo lugar, las aplicaciones móviles tienden a funcionar con márgenes bastante amplios en cuanto a la carga del motor, esto puede originar la formación de alquitranes y la obturación de los refrigeradores, depuradores y motores. Las aplicaciones en trenes y lanchas sufren menos limitaciones en cuanto a peso y carga y, por ello, dan mejores resultados.

El que estos inconvenientes se vean compensados por una mejor economía de los vehículos de transporte alimentados con gasificador, dependerá enteramente de la situación del país, sobre todo del coste y disponibilidad de gasolina y gasoil.

## **COSTOS DE LA TECNOLOGÍA**

Para abordar este tema se presentan a continuación seis casos prácticos de gasificación con diversos tipos de biomasa.

### **2.1. GRUPO ELECTRÓGENO DE GAS DE MADERA (33 kW<sub>e</sub>), PARAGUAY**

La industria de aserrío tiene la suerte de disponer de la opción de reducir sus costes mediante una mayor dependencia de la energía basada en la madera. Los directivos del aserradero Sapire, situado en el sur de Paraguay, decidieron instalar un gasificador de desperdicios de madera para la producción de energía eléctrica. Las expectativas para la compra del equipo fueron las siguientes:

1. Un motor muy fuerte, de baja velocidad y de mecánica sencilla.
2. Un gasificador que pudiera emplear desperdicios del aserradero de tamaño y contenido de humedad variable pero al mismo tiempo, capaz de producir gas de buena calidad para el motor.
3. Equipo con exceso de capacidad que permitiera una flexibilidad de funcionamiento y la futura expansión de la capacidad de producción de energía.
4. Dotado de regulación del consumo de combustible.
5. Diseño del generador de gas de madera adecuado para su manejo con obreros locales y las reparaciones, en caso necesario, en talleres mecánicos rurales.
6. El equipo debe cumplir las normas de seguridad industrial y no ocasionar problemas de contaminación ambiental.
7. Facilidad de obtención de piezas de repuesto, preferentemente de suministradores locales.

En esta sección se resumen las experiencias de los cuatro primeros años de funcionamiento (hasta febrero de 1983) del grupo instalado en el aserradero de Sapire. La experiencia ha sido muy favorable. Después de cuatro años de funcionamiento, el propietario del aserradero de Sapire ha registrado un rendimiento financiero satisfactorio, ya que los ahorros en productos del petróleo le permitieron recuperar la inversión (equivalente a 16,900 US\$) en un año y medio. Según su información, otros aserraderos le han imitado. El manejo del equipo y su mantenimiento no han presentado problemas insuperables.

### Descripción del grupo electrógeno de gas de madera

La figura 2-5 presenta un diagrama esquemático de flujos para el proceso de generación de electricidad.

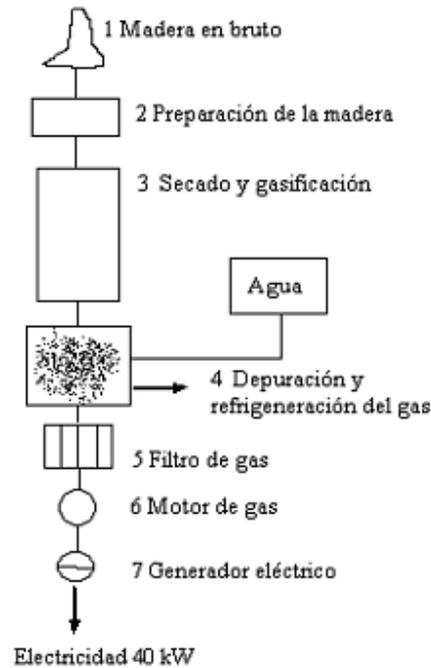


Figura 2-5: Diagrama de flujos del sistema de gasificador del gasógeno del aserradero de Sapire. Fuente No. 66.

La tabla 2-6 resume los datos técnicos de la planta:

Capacidad del generador eléctrico	40 kW <sub>e</sub>
Potencia del motor	90 HP
Horas de trabajo diario del generador eléctrico	14
Consumo diario de energía del aserradero	463 kW <sub>e</sub> h
Consumo de desperdicios de madera por kWh	4.1 kg
Contenido máximo de humedad de los desperdicios de madera	37% (seco)

Tabla 2-6: Datos técnicos del gasificador de madera de tiro invertido del aserradero de Sapire. Fuente No. 153.

### Suministro de combustible

El suministro de madera para el gasificador está totalmente cubierto porque procede de los desechos del aserradero. Como promedio, estos desechos representan el 35% del consumo de trozas, cantidad que sobrepasa las necesidades del gasificador de madera (alrededor de 570 t/año).

La tabla 2-7 muestra las especies de maderas empleadas como combustible del gasificador y las densidades aparentes de las correspondientes astillas de madera.

Nombre de la madera		Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Nombre común	Nombre botánico	
Palo rosa	Aspidosperma peroba	861
Peterebí	Cordia mellea	543
Lapacho	Tecoma ipe	993
Cedro	Cedrella fissilis	554
Guacá	Ocotea puberula	448
Guatambú	Aspidosperma Austr.	883

Tabla 2-7: Astillas de madera utilizadas para el gasógeno, Fuente No. 153

Las dimensiones máximas del combustible de madera son 40 x 40 x 5 cm es decir, lo máximo que puede introducirse en la entrada de carga del gasificador, y trozos menores, hasta el tamaño de una caja de cerillas, todos ellos son aceptables. En teoría, puede incluirse alrededor del 10% de las virutas y el aserrín pero, en la práctica, esto ha dado malos resultados porque el aserradero tiene suelo de tierra y se tiende a recoger el polvo con los desechos de madera. El máximo contenido de humedad que se registró fue del 37 por ciento, disminuyendo con el tamaño y con el tiempo de almacenamiento de las trozas antes de su transformación. Por ello, el contenido de humedad varía con las operaciones del aserradero y con las estaciones.

Las variaciones del contenido de humedad de la madera por debajo del máximo, no afectan a la calidad del gas combustible porque el material de alimentación se seca en la sección del depósito del gasificador, antes de llegar a la zona de pirólisis.

### Gasificador de madera

El generador de gas de madera consiste en un conjunto con paredes de chapa de hierro de 6 mm de espesor, revestidas por el interior con ladrillos que tienen el 50 por ciento de contenido de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Tiene una altura total de 3,600 mm y su diámetro exterior es de 1,400 mm. La entrada para la carga de combustible (madera) tiene un diámetro de 400 mm. El reactor tiene parrillas de hierro fundido, instaladas a 300 mm del fondo. Estas parrillas están colocadas a 20 mm de distancia y tienen un sistema de movimiento con palanca para extraer las cenizas. Bajo las parrillas, a 150 mm de la base, existe un sistema de refrigeración de agua con la triple función siguiente:

1. Aislar hidráulicamente la superficie donde caen las cenizas, para evitar que se salga el gas combustible.
2. Refrigerar la zona de las parrillas y palancas.
3. Dar salida a las cenizas con agua.

El gasificador tiene ocho orificios de entrada de aire de dos pulgadas de diámetro. Cuatro de ellos están separados a intervalos iguales de 1,800 mm desde el fondo. Los cuatro restantes están separados de la misma forma pero a 1,320 mm del fondo (véase la figura 2-6).

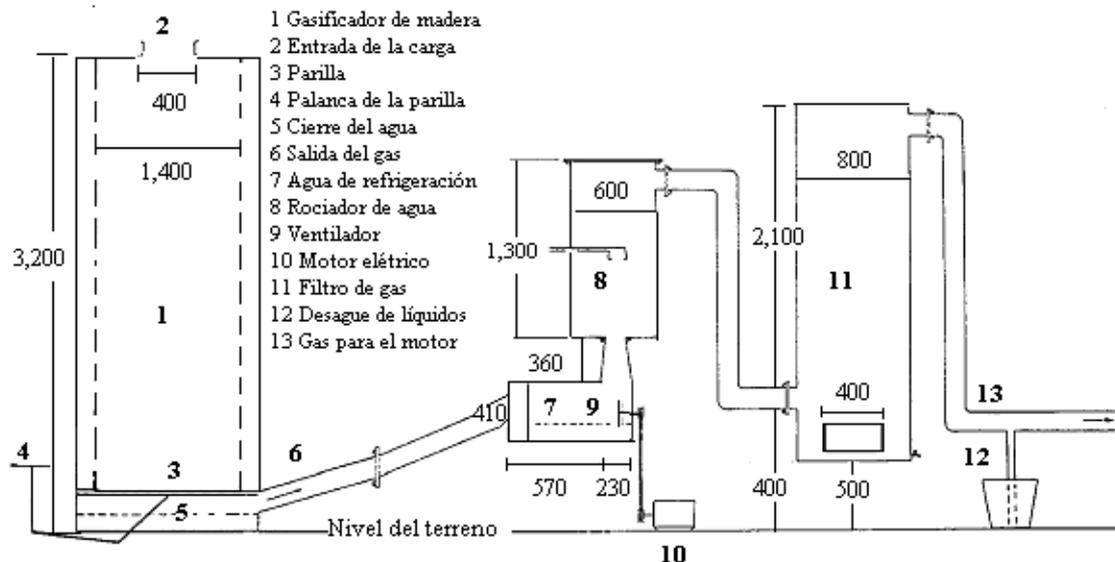


Figura 2-6: Diseño del gasificador de madera del aserradero de Sapire (Fuente No. 153)

El gasificador, puede recibir trozos de madera variables en tamaño y contenido de humedad. La carga de madera forma una columna, en cuya parte inferior tiene lugar la carbonización y el aire de convección seca las piezas de la parte superior. Una carga de combustible dura aproximadamente 14 horas, pudiendo reponerse durante la operación.

El contenido de humedad del combustible debe ser reducido preferiblemente a menos del 25 por ciento, para que pueda tener lugar una oxidación efectiva de los diversos productos de pirólisis en la zona de oxidación. El resultado es un gas combustible de buena calidad.

El gasificador tiene un filtro cilíndrico de 2,650 mm de altura por 800 mm de diámetro. El cilindro se llena con trozos de maderas resinosas de 35 x 8 x 7 cm de tamaño, llegando hasta la parte superior de la salida del gas hacia el motor (véase la figura 2-7).

El consumo medio de madera del grupo electrógeno es de 4.1 kg/kWh. Esta es una cifra relativamente elevada pero aceptable, y al mismo tiempo conveniente, debido a la necesidad de mantener el aserradero y sus alrededores, sin desperdicios de madera.

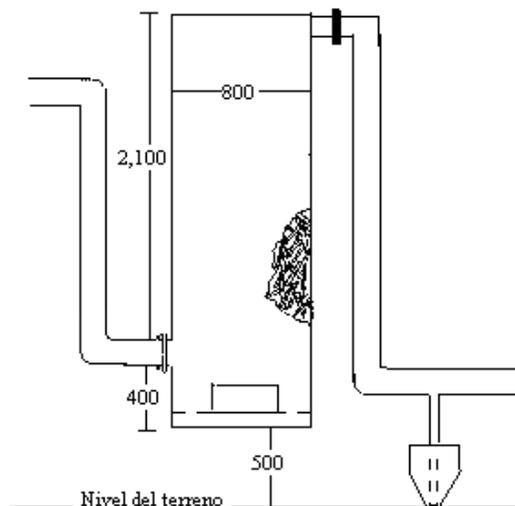


Figura 2-7: Filtro del gas (Material del filtro: trozos de madera resinosa),  
Fuente No. 153

### **Mano de obra empleada y sistema de funcionamiento**

El equipo es atendido por un operario a tiempo parcial, no necesitándose una atención permanente. Además, tres empleados preparan los trozos de madera y llenan el gasificador.

Las principales operaciones de un día normal son las siguientes:

1. Puesta en marcha de un ventilador impulsor para dar comienzo a la producción de gas.
2. Encendido del motor del gasógeno para suministrar energía al aserradero.
3. Arranque de la bomba de agua que suministra al aserradero agua de refrigeración para el gasificador/generador y las viviendas.
4. Mantenimiento general, incluyendo lubricación y carga del tanque de aire comprimido para que esté disponible para el próximo arranque del motor.
5. Limpieza del gasificador y preparación del combustible en tamaños apropiados para la entrada de carga. El relleno del gasificador se hace a mediodía, media hora antes de terminar el periodo de trabajo y de nuevo se hace por la tarde antes del final del turno.
6. Durante la tarde los operarios inspeccionan y atienden el equipo: lubricación, acumuladores, agua de refrigeración, descarga de ceniza, descarga del filtro, temperatura del gas.
7. La jornada de trabajo del aserradero termina a las 18 horas pero el motor y el generador continúan funcionando hasta las 22 horas en beneficio del pequeño poblado. Los preparativos para esto se habrán terminado durante el día y el operario hace una visita cada hora hasta que para la máquina a las 22 horas. El gasificador tiene reserva suficiente para el arranque inmediato a la mañana siguiente.

### Evaluación económica

#### ▪ Inversión de capital

La inversión inicial, que se muestra en la tabla 2-8 fue de 16,918 US\$ o 423 US\$/kW<sub>e</sub>. También se incluye una ampliación de la línea eléctrica, de 150 m, a las viviendas familiares.

	US\$	US\$/kW <sub>e</sub>
Terrenos (100 m <sup>2</sup> )	79.4	2
<b>Trabajos de ingeniería civil</b>		
Un techo de 50 m <sup>2</sup> con pilares de acero, tejado de chapa de Zinc y suelo de cemento de 15 cm de espesor, reforzado con redondos de acero de 4.2 mm a 31.74 US\$ el m <sup>2</sup>	1,587.3	40
42 m <sup>2</sup> de pared de ladrillo de 0.30 m de grueso, a 10.32 US\$/m <sup>2</sup> , 4 m <sup>3</sup> de hormigón armado para la instalación de la plataforma del motor	428.5	11
Generador eléctrico y gasificador a 158.73 US\$/m <sup>3</sup>	634.9	16
<b>Instalaciones eléctricas</b>		
Instalaciones eléctricas y tablero de mandos. Tomas de corriente y línea de 150 m de prolongación a las viviendas familiares	1,111.1	28
<b>Maquinaria y equipos</b>		
Motor Deutz de 90 HP y generador eléctrico A.E.G. de 40 kW <sub>e</sub>	4,444.4	111
Gasificador de madera con accesorios (refrigerador de gas, filtro, tuberías, entre otros)	6,286.5	157
<b>Costes de transporte y seguros</b>	357.1	9
<b>Costes de montaje y ensayos</b>	1,984.1	49
<b>Inversión total</b>	<b>16,918.3</b>	<b>423</b>

Tabla 2-8: Inversión de capital en el grupo electrógeno de Sapire, US\$1,982.

Fuente No. 153

#### ▪ Costos de funcionamiento y mantenimiento

La persona responsable del funcionamiento y mantenimiento del equipo del gasógeno recibe un salario mensual de 555.55 US\$. Tomando como base 25 días de trabajo al mes, el salario diario es de 22.22 US\$.

El tiempo neto de funcionamiento y mantenimiento del grupo del gasógeno y el motor electro-generador, corresponde a medio día de trabajo del operario, dedicándose la otra mitad a las tareas de mantenimiento de otras partes del aserradero. Por lo tanto, sólo se asigna el 50% del salario del mecánico, o sea 11.11 US\$ diario, al grupo del gasógeno y generador eléctrico.

El costo de los lubricantes es alrededor de 0.0067 US\$/kWh. Los repuestos para el sistema del motor y gasificador tienen un costo medio de 1,384.3 US\$ al año, o sea el 13% del costo básico de inversión de los equipos (10,731 US\$).

- Costos de combustible

La preparación y manipulación del combustible para el gasificador originan cierto costo. En el aserradero de Sapire el coste se compone de la forma siguiente:

Número de trabajadores	Nivel de salario de empleado por hora	Total horas de trabajo al día	Coste diario de mano de obra para suministrar combustible
3	1.98 US\$	3	5.95 US\$
Máquina de aserrar y electricidad			0.83 US\$
Costo total de preparación de combustible, manipulación de la madera y carga del gasógeno, por día.			6.77 US\$

Tabla 2-9: Costos del combustible, US\$, 1982. Fuente No. 153

- Costos totales de funcionamiento

El coste marginal de producción de electricidad es de 0.064 US\$/kW<sub>e</sub>h.

Partida del costo	Costos anuales (US\$)
<b>Mano de obra</b>	
1 operario de máquinas	3,333.33
Contribuciones y beneficios sociales	1,333.33
Total anual	4,666.66
<b>Combustibles</b>	
Madera combustible, kg	569,490.00
Costo anual de combustible	2,033.33
<b>Lubricantes</b>	
Coste anual de lubricantes	926.00
<b>Repuestos del motor, generador y gasificador de madera</b>	
Costo anual de repuestos	1,384.32
<b>Suma total</b>	<b>9,008.73</b>
Producción anual de electricidad kW <sub>e</sub> h	138,900.00
Costo marginal de producción, US\$/kW <sub>e</sub> h	0.06

Tabla 2-10: Resumen de costos de funcionamiento y mantenimiento del grupo gasificador y motor electro-generador. Fuente No. 153

- Costes de producción de electricidad

El consumo anual de electricidad en las cinco viviendas del personal del aserradero, con suministro gratuito de electricidad es de 4,500 kW<sub>e</sub>h. El coste anual de esta partida, calculada a partir del coste marginal de producción de electricidad dado anteriormente, es de 292 US\$.

### Comparación con otras alternativas de suministro de electricidad

En la tabla 2-11 se presenta una comparación entre los costos de combustible cuando se emplean residuos de madera, para la producción de electricidad, en el aserradero de Sapire. El ahorro anual de costos de combustible es de 15,164 US\$. Deduciendo los costes de mano de obra, lubricantes y repuestos, el ahorro total anual con el grupo electrógeno de gas de madera, es de 8,186 US\$, en comparación con el costo exclusivo del combustible gasoil.

Comparando esto con la inversión de capital, se demuestra que el tiempo de recuperación del capital es de menos de 2.5 años, con una tasa de interés del 10%. Después de más de cuatro años de funcionamiento, es evidente que la utilización de un grupo electrógeno con gas de madera es una solución muy rentable para el problema de suministro de energía a este aserradero tan aislado.

Consumo y costes de combustible:

Tiempo de trabajo del motor	Producción kW <sub>e</sub> h	Consumo de gasoil (litros)	Costo de gasoil (US\$)	Consumo de combustible madera (kg)	Costo de combustible madera(US\$)	Ahorros netos (US\$)
1 día (14 h)	461	120	57.32	1,900	6.77	50.55
1 mes (25 días)	11,575	3,009	1,512.46	47,460	169.44	1,263.65
1 año (12 meses)	139,900	36,114	17,197.14	569,500	2,033.33	15,163.81

Tabla 2-11: Comparación de los costes de combustible del grupo electrógeno con gas de madera y del grupo electrógeno con diesel. Fuente No. 153

### 2.2. GRUPO ELECTRÓGENO CON GASIFICADOR EN SRI LANKA (32 KW<sub>e</sub>)

El grupo electrógeno con gasificador que se describe en este capítulo fue fabricado por "Biomass Energy Consultants and Engineers" de los Países Bajos. Dentro del contexto de la "Conferencia Internacional sobre Gas Pobre", se instaló este grupo en la Universidad de Peradeniya, Sri Lanka, para emplearlo como unidad demostrativa durante el curso sobre la tecnología del gas pobre.

A finales de noviembre de 1981 fue trasladada a las Industrias Giriulla para la producción de electricidad basada en la cáscara de coco y para dotar de energía a parte de una industria de secado de coco.

Los datos de funcionamiento se limitan a un período en el que se ensayaron varios combustibles de biomasa, en la Universidad de Peradeniya, y a los primeros meses de funcionamiento en las Industrias de Giriulla.

Desde principios de enero de 1983, la instalación ha estado funcionando 20 horas diarias, 6 días a la semana, exceptuados los días de fiesta. El tiempo total de funcionamiento de la unidad (incluyendo períodos de ensayo en los Países Bajos y en la Universidad de Peradeniya, y el funcionamiento en las Industrias Giriulla) es aproximadamente de 1,200 horas.

### Descripción del grupo electrógeno

En la Figura 2-8 se presenta un diagrama esquemático de flujos del grupo electrógeno. La potencia disponible especificada es de 32 kW<sub>e</sub>.

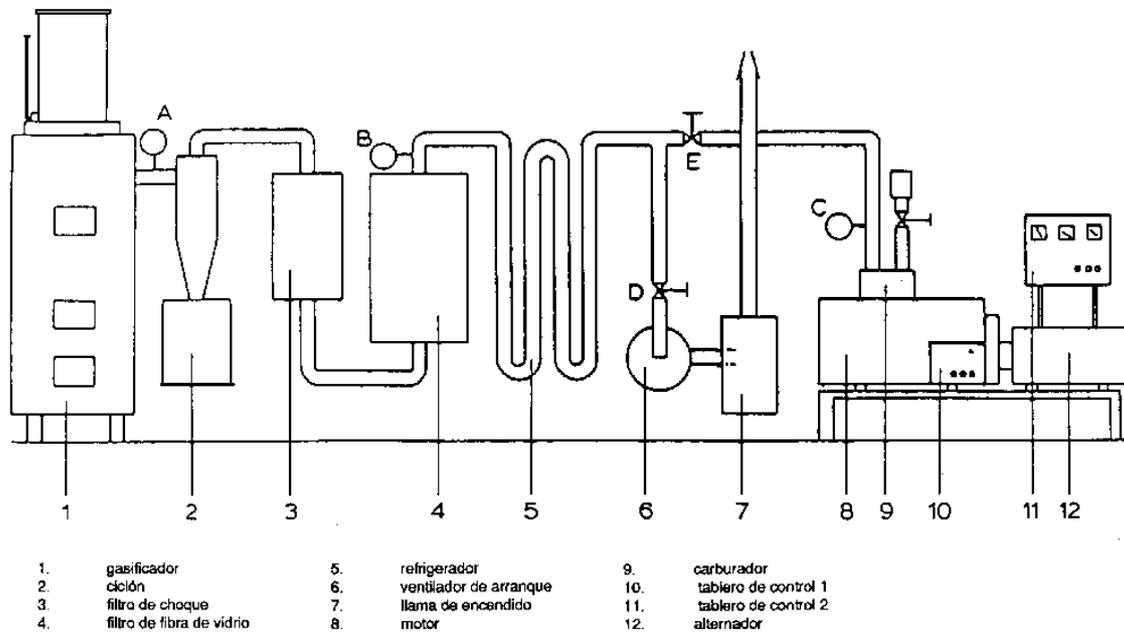


Figura 2-8: Diagrama de flujo del gasógeno de gas pobre de las Industrias de Giriulla. Fuente No. 154.

### Gasificador

El gasificador es del tipo de tiro invertido, con cinco orificios de entrada de aire. El diámetro de la garganta es aproximadamente de 15 cm, y las dimensiones generales de la unidad están de acuerdo con las normas de diseño suecas.

La garganta es de cemento refractario. La parrilla, accionada a mano, está situada aproximadamente 20 cm por debajo de la superficie de sección transversal mínima de la garganta.

Se pueden medir las temperaturas de salida del gasificador. Los valores medios obtenidos con los diferentes tipos de combustibles ensayados se presentan en la tabla 2-12.

Combustible		Gasificador	Motor alternador	Eficiencia global	Operación (h)
Tipo (+)	Consumo (kg/h)	Temperatura de salida (°C)	Potencia de salida (kVA)		
I	-	435	32	-	2
II	50	400	33	16	26
III	50	380	33	20	10
IV	45	370	32	17	5
IV	35	390	25	16	1000

Tabla 2-12: Datos de rendimiento del gasificador, Fuente No. 154

(+)

I: Cáscara de coco

II : Mezcla de carbón vegetal y de madera del árbol del caucho

III: Briquetas de aserrín de coco

IV : Desperdicios de coco

### **Ciclón**

Las partículas gruesas se separan de la corriente de gas en un separador de ciclón de gran eficacia. Las cenizas retenidas procedentes del gasificador, se recogen en un cenicero que puede abrirse por el fondo para su limpieza regular.

### **Separador de choque**

Las partículas de tamaño intermedio y la mayor parte de las finas se extraen del gasificador en un separador de choque de diseño especial. Este separador está aislado a fin de evitar la concentración de vapores y permitir el paso del gas caliente (por encima de 150°C) al filtro de tela de fibra de vidrio.

### **Filtro de tela de fibra de vidrio**

Para proteger el motor contra cualquier material sólido, el gas producido se pasa a través de un filtro de tela de fibra de vidrio que elimina cualquier elemento sólido que haya pasado por las secciones anteriores de filtrado.

A fin de mantener la temperatura por encima del punto de condensación del gas y para evitar la condensación (aproximadamente 80°C), este filtro está también aislado con lana mineral y un forro de aluminio.

Tanto el separador de choque como el filtro de tela de fibra de vidrio, están equipados con manómetros de agua para poder realizar una vigilancia permanente de la caída de presión ocasionada por el ensuciamiento de los dispositivos de filtrado.

### **Refrigerador**

La sección de refrigeración consiste en un intercambiador tubular. Los líquidos condensados se pueden extraer del refrigerador por medio de dos recipientes de desagüe equipados con tapas de seguridad, similares a la anteriormente descrita. Las temperaturas de salida del refrigerador varían entre 30° y 50°, dependiendo de las condiciones ambientales (temperatura, viento) y de la carga del motor.

### **Motor**

El gas se introduce en el motor después de haberlo mezclado con aire en un carburador de gas. La velocidad del motor se controla por medio de un regulador electrónico Barber-Colman, que controla simultáneamente una válvula de gas y otra de aire. La velocidad del motor se mantiene constante a 1,500 rpm. El sistema va equipado con un motor de gas International Harvester, el cual mantiene un índice de compresión 9.5:1, con un volumen de cilindros de 9.9 dm<sup>3</sup>.

### **Alternador**

El alternador es sincrónico protegido contra cortocircuitos, de polos interiores y autoexcitado, con las siguientes especificaciones:

Potencia de salida: 40 kVA

Factor de potencia: 0.8

Voltaje: 380/220 V

Frecuencia: 50 Hz

### **Ventilador de arranque y encendedor**

Está dotado de un ventilador de 24 V que se emplea durante el arranque de la instalación. Inicialmente el gas producido se quema. El quemador está dotado de un cierre hidráulico a fin de evitar el retorno de la llama. Durante el funcionamiento de la instalación las baterías del ventilador se recargan de forma continua.

### **Evaluación económica de los costos de producción eléctrica en la industria de Giriulla**

Los costos generales son:

Costo del sistema	32,000 US\$
Vida útil del sistema	6 años
Tasa de interés	10%
Costos de mantenimiento	10 por ciento anual de la inversión inicial
Costos adicionales de mano de obra	hombre-año
Costos de la cáscara de coco	6,00 US\$/t
Funcionamiento	4,000 h/año

Tabla 2-13: Datos financieros del proyecto, Fuente No. 154

Estos supuestos llevan a la siguiente descomposición de costos anuales:

Cargas anuales de capital	7,350 US\$
Mantenimiento	3,200
Mano de obra adicional	700
Lubricantes	1,600
Combustible (140 toneladas de cáscara de coco)	840
Costo anual	13,690 US\$
Energía producida (4000 h x 20 kW <sub>e</sub> )	80,000 kW <sub>e</sub> h
Costo unitario	0.171 US\$/kW <sub>e</sub> h

Tabla 2-14: Costos anuales del proyecto, Fuente No. 154

Estos costos se comparan favorablemente con un sistema de generación diesel cuyos costos, en circunstancias semejantes, serian alrededor de 0.26 US\$/kW<sub>e</sub>h.

### 2.3. GRUPO ELECTRÓGENO CON GAS DE MADERA EN PARAGUAY

En Loma Plata, en la región del Chaco de Paraguay, la Compañía Alemana Imbert instaló en 1983 un grupo electrógeno de 1.4 MW<sub>e</sub> de potencia, alimentado con gas de madera, la planta consistía en dos gasificadores de tiro invertido, con una capacidad teórica de producción de gas de 1,800 m<sup>3</sup>/h cada uno. En octubre de 1985 se equipó un tercer gasificador de diseño y fabricación local. Los gasificadores alimentan tres conjuntos de gas-motor-alternador, con una capacidad de producción de 420 kVA cada uno. El grupo electrógeno suministra electricidad a una cooperativa agrícola privada de industrias de pequeña dimensión, panaderías, lecherías, escuelas y unas 1,500 familias. En la siguiente figura se muestra un diseño esquemático del grupo electrógeno de Loma Plata.

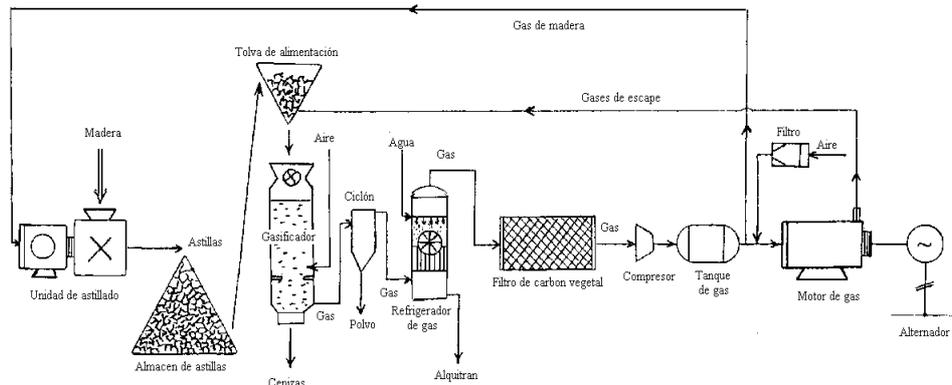


Figura 2-9: Grupo electrógeno de Loma Plata, Fuente No. 154

#### Suministro y preparación del combustible de madera

Con la puesta en marcha del tercer gasificador, la central eléctrica de Loma Plata está previsto que emplee aproximadamente 15,000 toneladas de leña al año. La leña que se entrega en Loma Plata presenta diámetros de los troncos desde 50 mm hasta 250 mm.

Se recomienda cortar primero los troncos de madera en longitudes de 1.5 a 2.5 metros, para facilitar la preparación y manipulación del sistema de troceado del combustible. Para acelerar el proceso de secado es conveniente partir los troncos al aire libre. Se emplea para ello un partidor hidráulico sencillo. Antes del astillado el contenido de humedad de la leña, es como promedio del 40 al 42%, secándose durante 60 días al aire libre, hasta llegar al 28% y cubierta bajo tejado se llega aproximadamente al 25%.

Tiempo de secado (días)	Humedad al aire libre (%)	Humedad bajo cubierta (%)
0	40.7	40.7
15	34.2	30.7
30	32.3	29.5
45	29.9	27.2
60	27.2	25.2

Tabla 2-15: Propiedades de secado de la leña, Fuente No. 154

El combustible del gasificador debe ser preferentemente menor de 70 a 90 milímetros de longitud y 300 cm<sup>3</sup> de volumen. Se emplea para este fin una astilladora de tambor, con una capacidad aproximada de 20 m<sup>3</sup>/h accionada por un motor de gas de madera (Mercedes-Benz, con potencia de 110 kW). La tabla 2-16 muestra la distribución normal por tamaños de las partículas de las astillas de madera producidas.

Tamaño de la criba (mm)	Retención (%)
150 x 150	4.8
100 x 100	56.0
50 x 50	29.2
25 x 25	9.9
pérdida de cribado	0.1

Tabla 2-16: Distribución por tamaño de las partículas del combustible, Fuente No.154

La densidad aparente de las astillas de madera es aproximadamente de 400 kg/m<sup>3</sup> con un contenido de humedad del 25%. Desde la astilladora, las astillas de madera se transportan a un almacén intermedio mediante una cinta transportadora. La capacidad de este almacén cubierto es aproximadamente de 300 m<sup>3</sup> y su superficie de 200 m<sup>2</sup>. Las astillas de madera se cargan desde el almacén intermedio a las tolvas de alimentación de los gasificadores con ayuda de cintas transportadoras. Las tolvas de alimentación están equipadas para emplear los gases de escape de los motores, para reducir aún más el contenido de humedad del combustible de madera. El contenido de humedad de las astillas disminuye de un 5 a un 10% después de su contacto con los gases de escape, a una temperatura aproximada de 150° C, durante 12 a 15 minutos. Un análisis de 15 muestras de astillas de madera dio un contenido medio de humedad del 19.2%. El tamaño de una tolva alimentadora es de 8 m<sup>3</sup>, lo que es suficiente para tres horas de funcionamiento con el gasificador a plena carga.

#### **Descripción de los gasificadores de tiro invertido**

La central eléctrica de Loma Plata está equipada con tres gasificadores de tiro invertido, dos de diseño Imbert y uno local, con una capacidad teórica de producción de gas de 1,800 m<sup>3</sup>/h, cada uno de ellos. Los gasificadores se alimentan por medio de cintas transportadoras que parten de tolvas instaladas en la parte delantera de los gasificadores en un foso subterráneo (véase la figura 2-10). El combustible de madera se carga automáticamente desde la tolva de alimentación al gasificador.

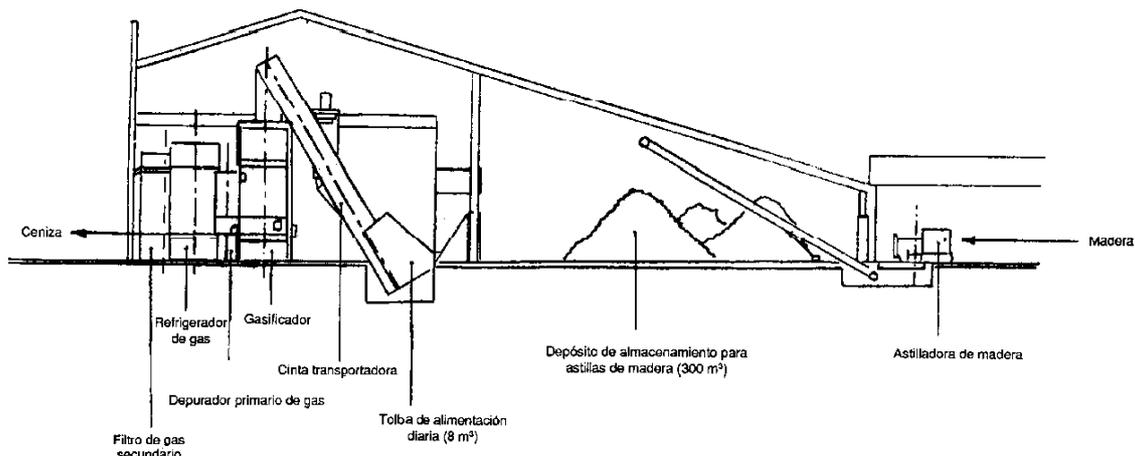


Figura 2-10: Diseño de las instalaciones de preparación del combustible y de los gasificadores. Fuente No. 154

Los gasificadores funcionan con presión negativa, que es el resultado de la succión, ya sea del motor de gas o de un ventilador de gas. La altura total del gasificador Imbert es de 7.5 metros y el diámetro exterior de 2.1 metros. El tercer gasificador, que es de diseño y fabricación local tiene una zona de reducción más alta lo que permite que el gasificador funcione con temperaturas más bajas, sin arrastre de alquitrán en el gas producido.

La madera desciende por el gasificador mediante gravedad. Al arrancar se carga carbón vegetal en la zona del hogar y por debajo de ella, y se coloca madera en la parte superior. El encendido se realiza con algo de paja o un trozo de papel. Después del arranque, sólo tarda unos cinco minutos el comienzo de la producción de gas, porque el carbón vegetal reacciona muy rápidamente con el aire en la zona del hogar. Se necesita un tiempo total de unos 40 minutos para conseguir la plena capacidad de producción de gas.

Los gasificadores están diseñados para funcionar hasta un 25% de su capacidad total de carga. Unas temperaturas suficientemente altas en la zona de oxidación, dan lugar a un gas prácticamente libre de alquitrán.

El contenido de cenizas de la madera es aproximadamente del uno por ciento en peso. Gran parte de las cenizas y también algunas partículas finas de carbón vegetal, caen a la cámara de recolección de las cenizas, a través de la parrilla inferior del gasificador. Normalmente, la parrilla se mueve de vez en cuando por medios mecánicos. La ceniza se extrae mediante una apertura de servicio hermética al gas, con un sistema automático de extracción de las cenizas. Esto se realiza con intervalos de dos a tres días.

Desde los gasificadores el gas se pasa en primer término a través de los multiciclones (uno por gasificador) que separan la mayor parte del polvo y las cenizas volantes arrastradas por el gas. La cantidad separada ha sido, como promedio, el 0.1% del combustible madera seco introducido en los gasificadores. Después de los ciclones, se pasa el gas a través de depuradores de agua,

refrigeradores y filtros, hasta un filtro secundario de carbón vegetal, donde se separan las últimas impurezas y el contenido de humedad del gas. Antes de introducir en los motores el gas de madera limpio y seco, se comprime ligeramente con ayuda de un compresor accionado eléctricamente y se almacena en un tanque intermedio.

La figura 2-11 muestra una instalación comercial típica gasificador-motor, tipo Imbert.

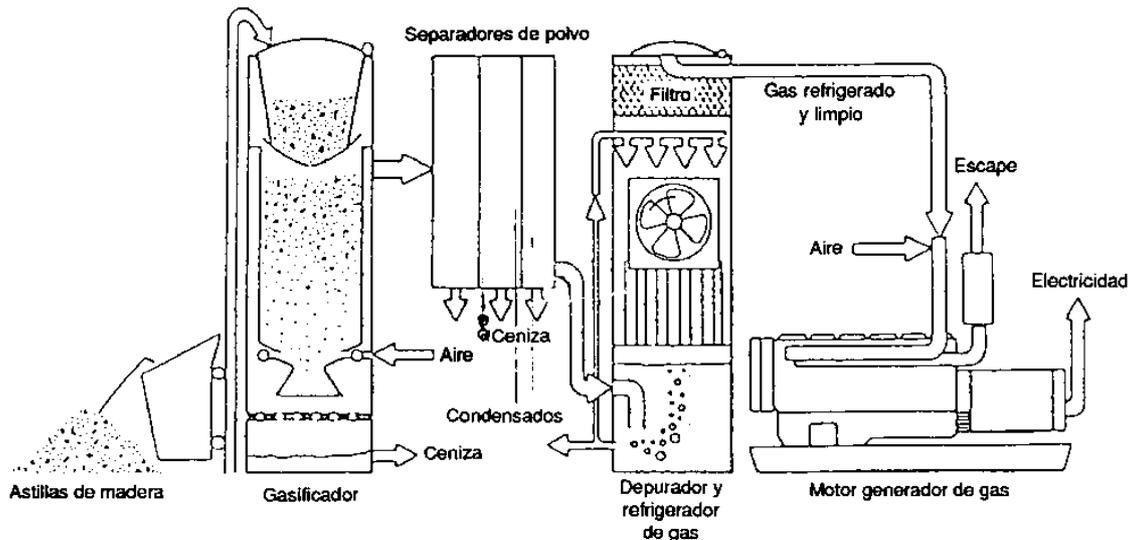


Figura 2-11: Instalación comercial típica gasificador-motor tipo Imbert.  
Fuente No. 154

### Producción de electricidad

Los gasificadores alimentan tres grupos de motor-alternador Waukesha L 7042 G, con los siguientes datos técnicos: motores con 12 cilindros en V, con un volumen de cilindros de 115.4 dm<sup>3</sup>, diámetro interior/pistón de 238/216 mm, e índice de compresión de 10:1. La potencia teórica disponible de los motores cuando funcionan con diesel es 859 kW<sub>e</sub> cada uno a 1,200 rpm.

Funcionando con gas de madera, la potencia teórica disponible es de 525 kW<sub>e</sub> a 1,000 rpm. Con un factor de potencia de 0.8 para el alternador 400/230 V, de 50 Hz, cada equipo puede generar 420 kVA de electricidad.

Durante el primer año y medio de funcionamiento, la central eléctrica produjo 4,703 MW<sub>e</sub>h de electricidad, con un consumo total de combustible de madera de 8,890 toneladas. Esto significa que el consumo medio de combustible por kW<sub>e</sub>h producido fue de 1.89 kg de astillas de madera, con un contenido de humedad del 20 al 25%. Durante el mismo período, los motores en funcionamiento consumieron 9,640 litros de aceite lubricante.

Calculando con un factor medio de carga del 68%, durante 24 horas al día y 300 días al año, cada unidad gasificador-motor genera aproximadamente 2,060 MW<sub>e</sub>h de electricidad al año.

### **Rentabilidad del empleo de gas de madera en loma plata**

La producción de electricidad con gas de madera en Loma Plata se ha convertido en una operación acertada y rentable, en comparación con la alternativa de emplear gasoil como combustible.

La producción de un 1 kW<sub>e</sub>h de electricidad consume 1.89 kg de combustible madera a un costo de 0.03425 US\$, mientras que la cifra correspondiente para el gasoil sería de 0.34 litros y 0.2125 US\$.

<b>Año</b>	<b>Combustible Madera (US\$)</b>	<b>Lubricantes (US\$)</b>	<b>Funcionamiento (US\$)</b>	<b>Mantenimiento (US\$)</b>	<b>Total (US\$)</b>
1983	26,327	5,606	9,883	5,730	47,859
1984	59,839	10,897	12,975	50,936	134,648
Total	86,166	16,503	22,858	56,666	182,506

Tabla 2-17: Costos de producción de electricidad en Loma Plata. Fuente No. 154

Durante este periodo la producción total de electricidad fue de 4,703,650 kW<sub>e</sub>h, lo que da un coste promedio por unidad de 0.039 US\$/kWh. Los costos totales de inversión de la central eléctrica (excluyendo el tercer gasificador) fue de 1,993,750 US\$.

### **2.4. VEHÍCULOS CON GAS DE MADERA (SUECIA)**

#### **Sistema de gasificación para vehículos**

El siguiente desarrollo que se presenta para un sistema con gasificador en vehículos de pasajeros fue realizado por el fabricante sueco de vehículos Volvo.

El desarrollo de sistemas con gasificador adaptados para tractores agrícolas, autobuses y camiones, fue realizado por el Instituto Nacional Sueco de Ensayos de Maquinaria Agrícola.

Este trabajo incluyó los elementos siguientes:

1. Desarrollo de un gasificador de tiro invertido adecuado para astillas de madera.
2. Desarrollo de un sistema de filtro de tela de fibra de vidrio, para el gas de madera.
3. Estudios sobre la adaptación de motores diesel de inyección directa, para funcionamiento con doble combustible y preparación de normas de adaptación.
4. Ensayos en el terreno de un número limitado de vehículos.

Los resultados de los trabajos realizados han sido publicados (en sueco) por Nordström.

### Gasificador de astillas de madera

Los mejores resultados se obtuvieron con un gasificador de tiro invertido tipo Imbert, modificado, con un hogar en V, y con parrilla móvil. Véase la figura 2-12. En la tabla 2-18 y en la figura 2-13 se presentan las principales dimensiones de los cuatro tamaños normales de gasificadotes.

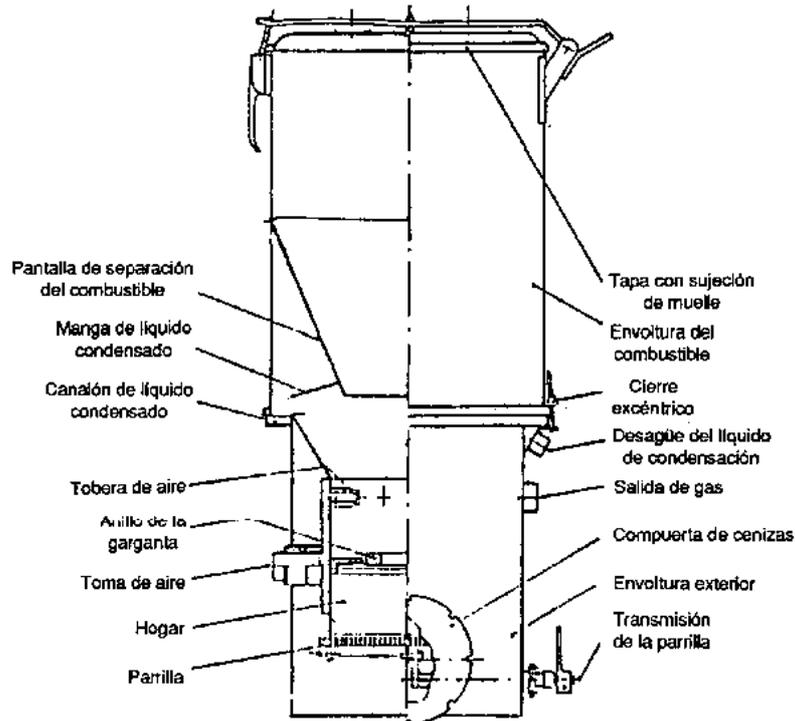


Figura 2-12: Esquemas de gasificadores de tipo normal para astillas de madera. Fuente No. 154.

Las principales dimensiones del depósito de combustible (mm) empleadas en los gasificadotes se muestran a continuación:

$d_B$	627	627	627	720
$h_B$	790	930	1 270	1 450
$h_1$	340	480	820	900
$h_2$	220	360	700	610
Volumen total $dm^3$	155	199	304	401
Tipo de gasificador	F3	F3 y F5	F5 y F7	F7

Tabla 2-18: Principales dimensiones de los gasificadores de tipo normal para astillas de madera. Fuente No. 154.

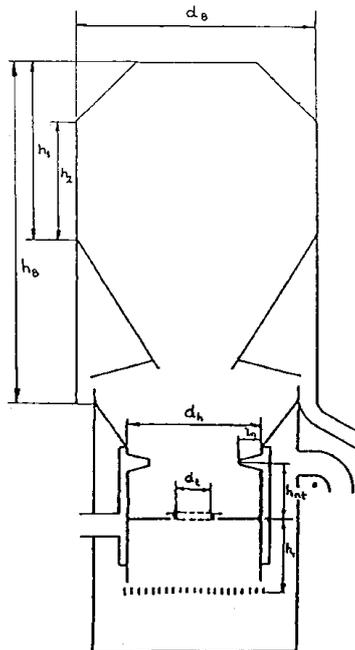


Figura 2-13: Principales dimensiones de los gasificadores de tipo normal para astillas. Fuente No. 154.

### **Adaptación de motores diesel para su funcionamiento con gas pobre**

#### **a) Transformación para encendido de chispa**

Las modificaciones incluyeron la sustitución de la tapa de los cilindros para poder acoplar las bujías, la sustitución de la bomba de inyección por un distribuidor, y el uso de pistones especiales para gas pobre que dan un índice menor de compresión. En uno de los motores se ensayaron distintas formas de la cámara de combustión. El costo de adaptación, sólo del motor, calculado para la cotización del dólar EE.UU. de 1984, resultó ser del orden de 40 a 50 \$/kW<sub>e</sub>.

#### **b) Utilización de doble combustible en motores diesel**

Los ensayos indican que estos motores no son adecuados para funcionar con doble combustible porque se produce un encendido demasiado avanzado de la mezcla de gas y aire, lo que origina el golpeteo diesel, a menos que la carga sea bastante reducida o que la mezcla de gas y aire esté limpia, lo que lleva a una sustitución moderada del gasoil.

#### **c) Utilización de doble combustible en motores de inyección directa**

En el Instituto Nacional Sueco de Ensayos de Maquinaria Agrícola se han realizado estudios sobre el rendimiento de motores diesel de inyección directa, funcionando con el sistema de doble combustible con una inyección mínima de gasoil.

Los motores de inyección directa funcionan normalmente bien con el sistema de doble combustible, con un índice de compresión de 1:16 a 1:16.5. En algunos casos puede producirse el golpeteo diesel. El índice de compresión debe reducirse en este caso.

En la tabla 2-19 muestra ejemplos de los datos de rendimiento obtenidos en ensayos de laboratorio:

Velocidad del motor rpm	Potencia de salida kW <sub>e</sub>	Consumo específico		Eficiencia %	Fracción de gasoil del combustible %
		Gas pobre m <sup>3</sup> /kW <sub>e</sub> h	Gasoil g/kW <sub>e</sub> h		
Camión, Scania Vabis L5150 (Volumen de los cilindros 6.2 dm <sup>3</sup> , índice de compresión 16:1)					
<b>Ensayo de potencia total</b>					
1,000	36.7	1.63	19.1	36.0	8.3
1,200	43.2	1.63	23.2	35.6	10.0
1,400	49.6	1.63	26.3	35.0	11.1
1,600	55.5	1.61	28.8	34.9	12.2
1,800	60.2	1.65	30.8	33.8	12.7
2,000	62.8	1.75	32.5	32.0	12.6
2,200	64.6	1.84	34.0	30.5	12.6
Tractor, Fordson Power Major (Volumen de los cilindros 3.6 dm <sup>3</sup> )					
<b>Ensayo con cargo parcial</b>					
1,600	29.6	1.64	48.0	32.5	19.0
1,800	25.1	1.67	57.3	30.8	21.6
1,840	22.2	1.80	64.0	28.3	22.1
1,890	14.8	2.40	84.0	21.2	21.8
1,920	7.4	4.00	183.0	12.0	26.8

Tabla 2-19: Resultados de los ensayos de rendimiento de motores de inyección directa funcionando con el sistema de doble combustible, Fuente No. 152.

### Ensayos con diferentes combustibles

Se realizaron ensayos prácticos con gasificadores para astillas de madera, desarrollados en el Instituto Nacional Sueco de Ensayos de Maquinaria Agrícola, con contenidos de humedad del combustible (base húmeda) de un 10 a un 20 por ciento. Los resultados se resumen en la tabla 2-20. El límite máximo de contenido de humedad, para una calidad aceptable de gas, se ha establecido en el 30 por ciento. Si excede del 40 por ciento el gas no es combustible. La distribución por tamaños de las astillas de madera puede variar, dependiendo de las características de la astilladora. Unas astillas largas pueden ocasionar problemas de flujo en el depósito de combustible. Se recomienda cribar las astillas para quitar los elementos finos (inferiores a 10 x 10 mm) y los trozos grandes (tamaño máximo, unos 60 mm).

Escalas de tamaño	Astillas	5-40 mm	10-40 mm	15-40 mm
Pérdida de cribado %	-	3.00	14.00	34.00
Caída de presión en la barra del gasificador	0.18	0.13	0.09	0.08
Potencia de salida a 1 800 rpm (kW <sub>e</sub> )	16.80	18.10	21.10	21.00
Aumento de potencia por cribado %	0	7.70	25.50	25.50

Tabla 2-20: Mejora de la potencia máxima de salida mediante cribado de las astillas de madera. Fuente No. 152.

c) Utilización de otros combustibles

En la tabla 2-21 resume los resultados de estos ensayos, algunos de los cuales han sido publicados en detalle por Höglund. De los combustibles ensayados, sólo la cáscara de coco mostró un rendimiento similar o superior al de las astillas de madera.

Combustible ensayado	Vehículo ensayado	Experiencias	Conclusiones
<b>Turba</b>			
Gránulos de turba húmeda carbonizada	Scania L80 Gasificador F500	Distancia recorrida 224 km. Fuerte caída de presión en el gasificador. Formación de escoria en las toberas de aire, obstrucciones de alquitrán del filtro de tela.	El problema del alquitrán se puede eliminar eligiendo otra solución en cuanto a las toberas y a la placa obturadora
<b>Residuos agrícolas</b>			
Gránulos de paja comprimidos	Scania L80 Gasificador F500	Distancia recorrida 445 km (8.5 h). Formación de una gran torta de escoria.	Si es aceptable una limpieza frecuente del gasificador, puede utilizarse el combustible.
Pacas de paja de trigo	Tractor: Bolinder-Munktell, BM650 Gasificador F300 (configuración original)	4.5 h de funcionamiento. Aglutinamiento y fuerte formación de escoria. Potencia de salida 66 a 82% de la correspondiente a astillas de madera.	Este combustible no es apropiado para el presente gasificador.
	Tractor: Bolinder-Munktell, BM650. Gasificador F300 (configuración para tacos de madera)	4 h de funcionamiento. Cierta aglutinación y fuerte formación de escoria. Potencia de salida 76 a 90% de la correspondiente a astillas de madera.	
Caña de azúcar prensada y cortada.	Tractor: Bolinder-Munktell BM650. Gasificador F300.	3 h de funcionamiento. La aglutinación ocasiona una producción irregular de gas. Algo de formación de escorias. Potencia de salida 97% de la correspondiente a astillas de madera.	El combustible no es apropiado, en esta torea, para el presente gasificador.
Cáscara de coco triturada	Tractor: Bolinder-Munktell, BM650 Gasificador F300.	7 h de funcionamiento. Excelente resultado. La potencia de salida es el 103% de la correspondiente a astillas de madera.	Buen combustible para el presente gasificador.
Desperdicios de coco, cortados	Tractor: Bolinder-Munktell, BM650. Gasificador F300 (configuración para tacos de madera)	2.5 h de funcionamiento. No hay aglutinación pero se observa cierta formación de escorias. Potencia de salida 102% de la correspondiente a astillas de madera.	Ensayos demasiado breves para obtener conclusiones. La ausencia de aglutinación es prometedora.

Tabla 2-21: Resultados de ensayos de distancia recorrida con diferentes combustibles de biomasa en el gasificador normal para astillas de madera, Fuente No. 152.

Tipo de vehículo (Tractores)	Datos del motor					Combustible para producir gas	Consumo combustible		Funcionamiento (h)
	Sistema de encendido	Volumen de cilindros (dm <sup>3</sup> )	Índice de compresión	Potencia de salida			Sólido kg/h	Líquido kg/h	
				Original	Transformado				
Bolinder Munktell BM35	CI	3.4		28	23	Trozos de madera	12-16	0.90-1.15	
Cavid Brown 310	CI	2.5		20	19	Trozos de madera	6-10	0.90-1.15	
Fordson Major	CI	3.6		29	27	Trozos de madera	12-15	0.90-1.10	
Fordson Power Major	CI	3.6		34	27	Trozos de madera	12-16	0.95-1.15	
Nuffield DM4	CI	3.4		29	24	Trozos de madera	13	0.87	
Bolinder Munktell BM350	CI								5613
Ford 5000	SI	3.8		42	23				1980
Massey Fergusson MF 1100	CI	5.8	16.1	64	51		27	2.2	2830
Bolinder Munktell BM650	CI	4.2	16.1	48	33	Trozos de madera			2600
Bolinder Munktell BMG650	CI	4.2	16.1	48	30	Astillas de madera	12-18	2.4	1580

CI Encendido por compresión

SI Encendido por chispa

Tabla 2-22: Tractores adaptados en Suecia para funcionar con gas pobre, Fuente No. 152

Tipo de vehículo (Camiones)	Datos del motor					Combustible para producir gas	Consumo combustible		Funcionamiento (h)
	Sistema de encendido	Volumen de cilindros (dm <sup>3</sup> )	Índice de compresión	Potencia de salida			Sólido kg/h	Líquido kg/h	
				Original	Transformado				
Scania Vabis L5150	CI	6.2		57	52	Trozos de madera	6.1-7.7	0.42-0.48	
Volvo L389	CI	6.7		62	51	Trozos de madera	4.9-8.9	0.44-0.63	117000
Scania Vabis L75	CI	10.3		90	72	Astillas de madera	6.9-19.0	0.71-1.34	272000
Scania L8050	CI	7.8	15.9:1	70	50	Astillas de madera	7.2-7.8	0.57-0.63	
Scania LBS 110	CI	11.0		116	68	Astillas de madera	9.5	0.73	163700
Volvo F88	SI	7.5				Astillas de madera			
Ford Do710	SI	7.5	10.1			Trozos de madera			
Volkswagen pickup VM 9238	SI	2.0	10.1	51	29	Carbón vegetal	1.5-2.0		2800
Mazda pickup	SI	2.0	10.1	58	30	Trozos de madera			1500

CI Encendido por compresión

SI Encendido por chispa

Tabla 2-23: Camiones adaptados en Suecia para funcionar con gas pobre, Fuente No. 152.

### Adaptación y funcionamiento de un tractor agrícola Massey Ferguson 1100

En la tabla 2-24 se presentan los principales datos para el tractor transformado. En la figura 2-15 se muestra el sistema de gasificador y en la figura 2-16 una fotografía del tractor transformado.

<b>Tractor</b>	
Modelo y número	Massey Ferguson 110 nr 915 12765
Peso total en la versión para gas pobre	5,090 kg.
<b>Motor</b>	
Tipo y número	Motor diesel Perkins, inyección directa
Volumen de los cilindros	5.8 dm <sup>3</sup>
Número de cilindros	6
Índice de compresión	16:1
Bomba de inyección	Tipo de distribuidor con un regulador centrífugo tipo CAV DPA 326 2948
Inyectores	Tipo CAV BDLL 150 S 6472
<b>Sistema del gasificador</b>	
Gasificador	Tipo E 5/80-150
Volumen del depósito de combustible	0.2 m <sup>3</sup>
Diámetro de la garganta	120 mm
Diámetro de las toberas	12 mm
Filtro de gas	Filtro industrial AB
Superficie de filtrado	4.9 m <sup>2</sup>
Refrigerador de gas	Tipo D
Superficie de refrigerador	5.8 m <sup>2</sup>
Peso total	450 kg

Tabla 2-24: Especificaciones del tractor Massey Ferguson para gas pobre, Fuente No. 152.

Se realizaron ensayos de laboratorio para establecer el rendimiento del sistema del gasificador y el motor transformado.

En la tabla 2-25 se da un resumen de los resultados de los ensayos. Se determinó que la potencia máxima en el sistema de doble combustible, es de 51 kW<sub>e</sub> a unas 2,170 rpm (punto de inyección 30° antes de TDC). Esto es el 79% de la potencia máxima para funcionamiento exclusivo con diesel, con el punto de inyección recomendado (22° antes de TDC) y el 76% de la potencia diesel con el mismo punto de inyección que con el sistema de doble combustible. Como puede verse, también se determinó que la sustitución de gasoil, es del 80 al 85% y la eficiencia del sistema del gasificador, alrededor del 70%. Se encontró que los residuos sólidos en el cenicero representan hasta el 3.5% del consumo de combustible. Esto representaría una pérdida de alrededor del 5%, a plena potencia.

El tractor se utilizó en funcionamiento práctico durante más de 2,500 horas, en un período de seis años en dos grandes fincas agrícolas del sur de Suecia. Los preparativos para el funcionamiento requieren de 30 a 45 minutos. Hay que cargar grandes cantidades de astillas de madera en el techo, para funcionar un turno completo de trabajo.

El gasificador y el filtro del gas van montados en ménsulas atornilladas al cuerpo principal, en el lado izquierdo del tractor. La altura libre del gasificador sobre el terreno es de 500 mm. El refrigerador del gas va montado sobre ménsulas en la parte delantera del refrigerador del motor.

<b>Combustible</b>	<b>Astillas de madera (Contenido de humedad 8%)</b>		
	Máx.	Parcial	En vacío
Potencia de régimen			
Velocidad del motor (rpm)	1 855	1 440	1 015
Potencia de salida	40	29	-
<b>Consumo de combustible</b>			
Astillas de madera (kg/h)	41	27	8,5
Gasoil (kg/h)	2,2	1,9	1,2
<b>Balance energético</b>			
Valor calorífico del gas (MJ/Nm <sup>3</sup> )	5,60	5,56	5,54
Fracción del gasoil de la energía del combustible (%)	18,9	15,0	26,2
Eficiencia total	18,0	5,3	0
Eficiencia del gas frío del gasificador (%)	71,1	66,5	73,1
Pérdidas totales de energía (kW <sub>e</sub> )	181,5	143,3	54,8
Pérdidas de energía del gasificador (kW <sub>e</sub> )	56,3	43,0	10,1
<b>Carga del hogar</b>			
B <sub>g</sub> (Nm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> , h)	0,79	0,49	0,17
<b>Contenido de alquitrán</b>			
g/Nm <sup>3</sup>	0,13	0,04	0,17

Tabla 2-25: Resultados de los ensayos de laboratorio con un sistema de gasificador F-5/80-150 montado sobre un tractor Massey-Ferguson 110.

Fuente No. 152.

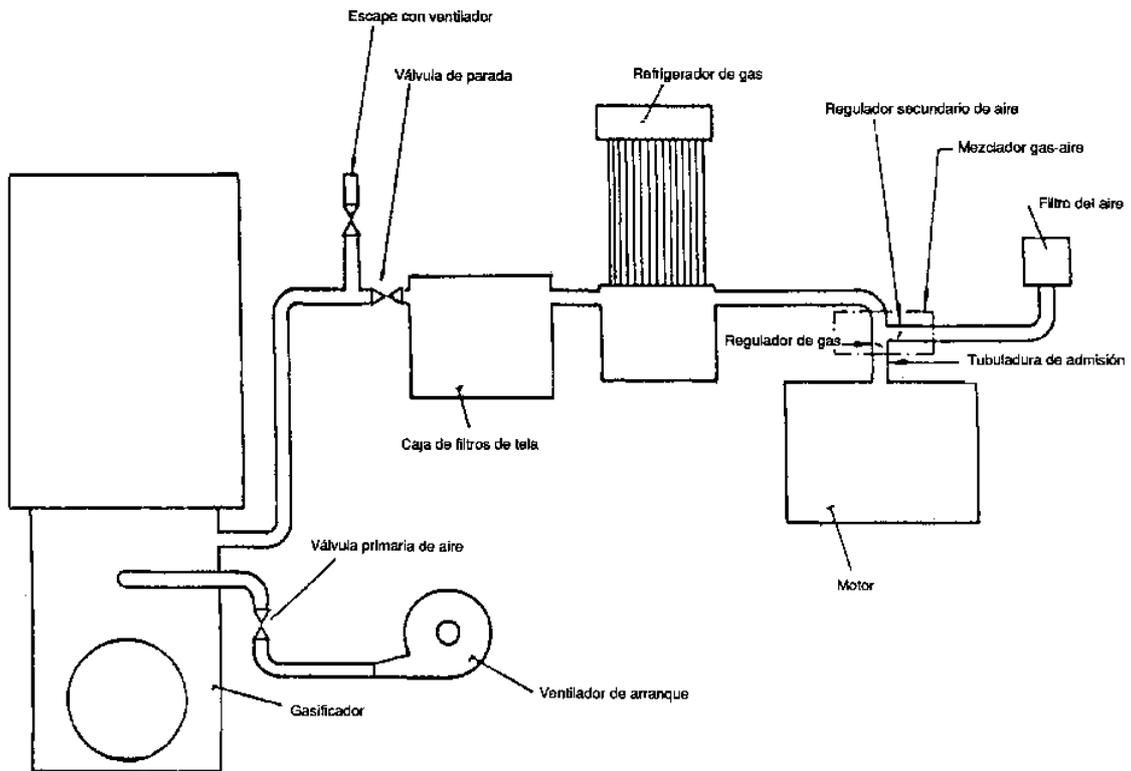


Figura 2-15: Diagrama del sistema de gasificador empleado para un tractor agrícola Massey. Fuente No. 152



Figura 2-16: Tractor agrícola Massey adaptado para funcionar con gas de madera. Fuente No. 152

### Adaptación y funcionamiento de un camión Scania

En la figura 2-17 se presenta una fotografía del camión transformado y en la figura 2-18 se muestra el sistema del gasificador. La tabla 2-26 muestra los datos principales del vehículo adaptado.



Figura 2-17: Fotografía de un camión Scania L8050 adaptado para funcionar con gas de madera. Fuente No. 152

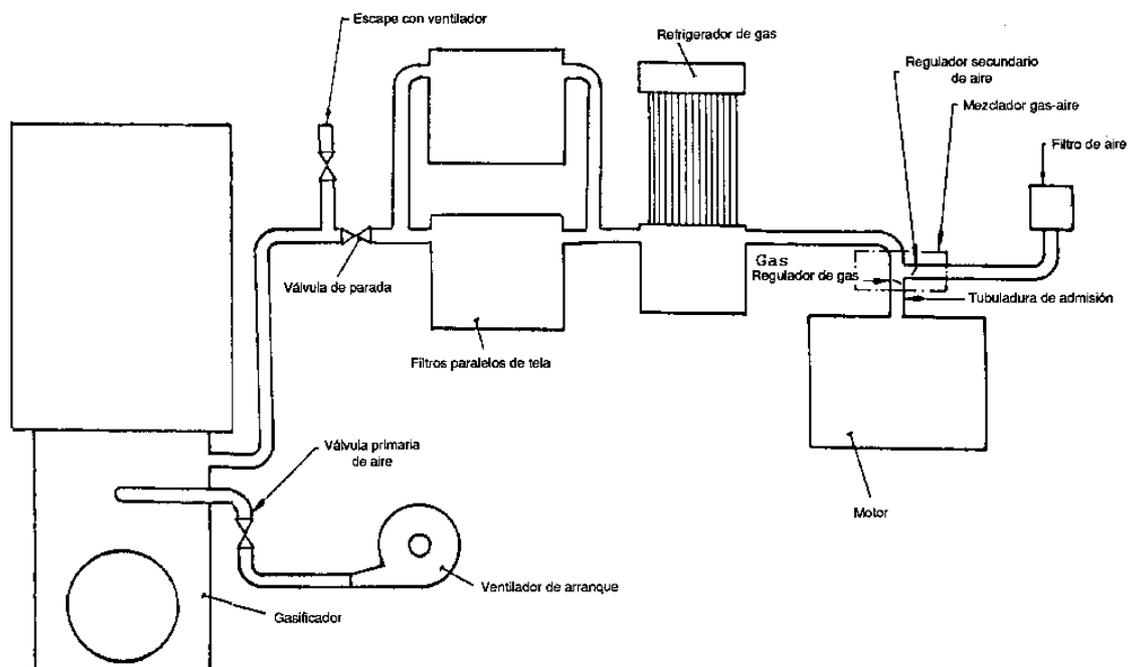


Figura 2-18: Diagrama del gasificador empleado para un camión Scania. Fuente No. 152

<b>Camión</b>	
Modelo y número	Scania L8050 n° 365 472
Peso total de la versión para gas pobre	8,350 kg
Capacidad de carga	7,600 kg
<b>Motor</b>	
Tipo y número	Diesel Scania motor no. 735 145
Volumen de cilindros	7.8 dm <sup>3</sup>
Número de cilindros	6
Índice de compresión	15.9 : 1
Bomba de inyección	Tipo: en línea, con regulador de vacío CAV NR6H80/338 GLPE 34
Inyectores	Tipo CAV BDLL 150S 6403
<b>Sistema de gasificador</b>	
Tipo de gasificados	F-5/80-150
Volumen del depósito de combustible	0,031 m <sup>3</sup>
Diámetro de la garganta	150 mm
Diámetro de toberas	12 mm
Filtro del gas	Filtro industrial AB Dos cajas normales en paralelo Superficie de filtro: 6 m <sup>2</sup>
Refrigerador de gas	Tipo D Superficie de refrigeración 5.8 m <sup>2</sup>
Peso total	456 kg

Tabla 2-26: Especificaciones de un camión Scania adaptado para gas pobre,  
Fuente No. 152

### **Evaluación económica del funcionamiento de vehículos con gas de madera**

La evaluación económica se hace suponiendo un tasa real de interés del ocho por ciento con salarios para la mano de obra del orden de 0.5 a 16 US\$/hora con un precio para el gasoil de 8 a 16 US\$/GJ y para el combustible de madera de 0.1 a 3.5 US\$/GJ.

#### **a) Costo de capital**

La inversión de capital se puede calcular partiendo de un camión Ford-D, recientemente adaptado para realizar ensayos en Sri Lanka, que ha sido equipado con un sistema de gasificador similar en tamaño al gasificador normal F-5/80-150. En la tabla 2-27 se muestra cómo las diferentes partidas de gastos, sumadas al coste total de adaptación, ascienden a 11,000 US\$.

Partida	Costo real de adaptación de un camión en Suecia (US\$)	Adaptación en países con costes reducidos de mano de obra	
		Costo estimado de transformación, salarios 2 US\$/h (US\$)	Costo estimado de transformación, salarios 0.5 US\$/h (US\$)
Motor	753	753	753
Gasificador y refrigerador de gas	652	391	313
Filtros de gas	1,600	960	769
Ventilador de arranque	244	268	268
Accesorios, válvulas, juntas, elementos auxiliares y controles	997	1,086	1,086
Montaje	6,782	1,809	452
Total	11,019	5,266 *	3,640 *

Tabla 2-27: Costo de adaptación de un vehículo para funcionamiento con gas de madera. Fuente No. 152

\*Estos cálculos parecen razonables, en comparación con los costes publicados para sistemas algo más sencillos, fabricados en Brasil (750-2,000 US\$) y Sri Lanka (1,000 US\$).

#### **b) Costos de servicio y mantenimiento**

El trabajo adicional para mantener en funcionamiento la instalación del gasificador puede calcularse en 0.3 h/hora de funcionamiento. El costo resultante dependerá indudablemente del nivel de la mano de obra. Se ha supuesto que el coste de mantenimiento es el cinco por ciento de la inversión de capital, para cada mil horas de funcionamiento. Esto lleva a un coste estimado de mantenimiento, en el caso de Suecia, de 0.55 US\$/hora de funcionamiento, y de 0.18 US\$/hora de funcionamiento en un país con un coste reducido de mano de obra.

Para la evaluación económica del camión con gas de madera, será necesario considerar la menor capacidad de carga y la mayor distancia recorrida, para una carga dada. Los costes de servicio y mantenimiento del camión y el motor se supone que dependen de la distancia anual recorrida, de acuerdo con las experiencias suecas. Para 60,000 km/año será de 0.66 US\$/km; para 30,000 km/año, 0.80 US\$/km y para 1,500 km/año, 1.40 US\$/km.

#### **c) Costos de combustible**

Los costos de combustible se calculan suponiendo que se funciona con doble combustible y un consumo de combustible para el tractor de acuerdo con la tabla 2-28.

Carga	Funcionamiento silo con diesel	Funcionamiento con doble combustible (Velocidad media unos 60 km/h)			
	Gasoil kg/10	Gasoil kg/10	Astillas de madera kg/10	Sustitución de gasoil %	Eficiencia del sistema de gasificador %
Vacío	2.44	0.50	7.2	80	69
5000 kg	2.61	0.50	7.6	81	71
8000 kg	2.87	0.55	7.8	81	76

Tabla 2-28: Consumo registrado de combustible en el funcionamiento real de un camión Scania L8050, con dable combustible o sólo con diesel. Fuente No. 152

Nota: Las astillas de madera son de 10 x 10 - 40 x 40 mm, contenido de humedad 8 - 10%.

## 2.5. GASIFICACIÓN DE BIOMASA CAÑERA EN CUBA

Basado en la disponibilidad de bagazo que presenta este central, fue calculado la nueva potencia para un ciclo combinado con gasificación de biomasa integrada, que es de 44 MW<sub>e</sub>. En la tabla 2-29 se muestra un resumen de los balances realizados, los cuales se acompañan con el balance de la situación actual a modo de comparación. En ella se puede observar la gran diferencia en la generación de energía eléctrica (102 GW<sub>e</sub>h/zafra) que puede alcanzarse al introducir una tecnología de ciclo combinado con gasificación de biomasa integrada en un central de media capacidad, como el Abel Santamaría. Es significativa la cantidad de energía que pudiera entregar a la red nacional, que asciende a los 98.4 GW<sub>e</sub>h/zafra, garantizando eliminar la actual dependencia de la red nacional. El índice de generación eléctrica experimenta un gran salto de 17.24 kW<sub>e</sub>h/t caña, a valores de 400 kW<sub>e</sub>h/t caña. Nótese que solo se ha considerado el bagazo como combustible y la zafra como período de operación (cien días); estos valores se incrementarían si se emplea la paja de caña y se opera en período inactivo.

CAI Abel Santamaría	Unidades	Situación actual	BIG/GT/CC
Molida potencial	t/día	2,611	2,611
Bagazo disponible potencial	t/día	813.95	814.00
Potencia eléctrica instalada	kW	1,500	44,000
% Reductora	%	6.94	0.35
Índice de generación eléctrica	kWh/tc	17.24	404.52
Índice de consumo eléctrico	kWh/tc	16.66	27.58
Vapor de escape/t caña	Kg vapor/ton caña	509.4	467.8
Vapor %'caña	%	50.94	46.78
Generación en zafra	MWh/a	3,600	105,600
Energía total vendida a la red	MWh/a	120	98,400
Demanda eléctrica del complejo	kW	1,450	3,000
Compra del SEN	kW	200	0

Tabla 2-29: Datos técnicos de la situación actual y de la planta de gasificación.

Fuente No. 141

Al aplicar el estudio al central Abel Santamaría se determinó el elevado incremento que presenta la generación de energía eléctrica con la introducción de un sistema BIG/GT/CC, de 3.6 GW<sub>e</sub>h/año a 105.6 GW<sub>e</sub>h/año, siendo también significativa la cantidad de energía que pudiera entregar a la red nacional, que asciende a 98.4 GW<sub>e</sub>h/zafra, lo cual garantizaría eliminar la actual dependencia de la red nacional. El índice de generación eléctrica experimenta un gran salto, de 17.24 kW<sub>e</sub>h/t caña a valores de 400 kW<sub>e</sub>h/t caña.

En la tabla 2-30 se exponen los valores del incremento de generación eléctrica que se logra con la introducción de la nueva tecnología, y por tanto la cantidad de petróleo evitado en la generación de la misma cantidad de energía eléctrica, así como la cantidad de CO<sub>2</sub> dejado de emitir a la atmósfera.

Generación	GW <sub>e</sub> h/a	102
Petróleo evitado	t petróleo evitado/a	32,640
CO <sub>2</sub> dejado de emitir a la atmósfera	t CO <sub>2</sub> /a	119,748

Tabla 2-30: Valores de petróleo evitado y CO<sub>2</sub> dejado de emitir. Fuente No. 141

Al introducir estas tecnologías se logra un impacto positivo sobre el medio ambiente, ya que se produce una cantidad de energía a partir de un combustible no contaminante y renovable que, expresado en cantidad de combustible fósil dejado de quemar, asciende a 32,640 t petróleo evitado/a. Esto implica una cantidad de 119,748 t CO<sub>2</sub>/a dejados de emitir a la atmósfera.

La introducción de este tipo de tecnología cuenta con valores de inversión de alrededor de 1,200 a 1,400 US\$/kW<sub>e</sub> instalado, y los periodos de recuperación son de alrededor de cuatro a seis años.

## DESARROLLO TECNOLÓGICO

La gasificación conjunta en sistemas de generación eléctrica aun se considera con amplias posibilidades de mejora y desarrollo. A continuación se muestran tres casos de estudio con objeto de mostrar el desarrollo tecnológico de esta tecnología.

### 2.6. GENERACIÓN DE ENERGÍA CON GASIFICACIÓN DE BIOMASA EN CHINA

La tecnología de la gasificación de la biomasa y de la generación de energía (BGPG) puede alcanzar eficacias razonables en cierta escala, y proporciona una fuente de alimentación de alta calidad a los usuarios, así que puede ser conveniente para las áreas rurales en países en vías de desarrollo (Wu y Wu; Oficina del estado Statistics, 1997; Novem, 1997; Dai, 1998).

En China, hay enormes extensiones de recursos de biomasa, principalmente de los sectores agrícolas y del bosque, y por otra parte existen, fuentes escasas de la electricidad en áreas rurales. En china existen buenas condiciones de mercado y de espacio para el desarrollo de esta tecnología BGPG, por lo que se podría incorporar a gran escala para este país.

### Estado de la gasificación de la biomasa y de la generación de energía eléctrica en china

El desarrollo de la tecnología de gasificación y generación de electricidad a partir de la biomasa comenzó desde los años 60, caracterizados por un sistema de gasificación y generación de energía de 60 kW<sub>e</sub> a partir de la cáscara de arroz. Ahora, los sistemas de 160 y 200 kW<sub>e</sub> se adoptan fácilmente, y hay docenas de estos sistemas de pequeños generadores que emplean la cáscara del arroz. En años recientes, se realizó un estudio de un sistema a escala de MW<sub>e</sub>, teniendo como objetivo el uso de la tecnología de la biomasa a mediano plazo. En 1998, se desarrollo un sistema de 1 MW<sub>e</sub> BPGG, empleando un generador de gas de lecho fluidificado. El desarrollo se llevo a través del instituto de la conversión de energía de Guangzhou (GIEC), y construido en un molino de arroz en la provincia de Fujian de China.

Los residuos de cáscara de arroz del molino se alimenta al generador de gas; el gas producido se limpia en los ciclones; después el gas limpio se almacena en un depósito y se utiliza para operar sistemas de generación de potencia con gas. De acuerdo con las experiencias de estas primeras plantas de gasificación a escalas de varios MW<sub>e</sub>, en el 2000 se instalo una nueva planta con una capacidad de 1.2 MW<sub>e</sub> en Sanya, provincia de Hainan de China. Los datos obtenidos de los sistemas de BPGG usados actualmente en China se presentan en la tabla 2-31.

Capacidad eléctrica (kW)	200	1000
Gasificador	Corriente descendente	Lecho fluidizado
Limpiador de gas	Scrubber de agua	Scrubber de agua
Aplicación	Generación de potencia	Generación de potencia
Consumo de agua (ton/h)	20	20
Eficiencia de conversión (%)	12.5	17
Costo de inversión (\$US/kW <sub>e</sub> )	330	367.2
Costo de la electricidad (\$US/kW <sub>e</sub> )	0.042	0.0324
Número de plantas en uso	30	2

Tabla 2-31. Resumen sobre los sistemas de gasificación y generación de energía en China. Fuente No. 12

#### ▪ Revisión de la tecnología

##### Gasificador

China ha estudiado todas las clases de gasificadores, y ha concluido el esfuerzo con el desarrollo de muchas clases de generadores de gas, incluyendo los de corriente ascendente, los de corriente descendente, los de corriente descendente estratificada y los generadores de gas de lecho fluidizado (Wu y Wu; Xu et al., 1994). Todas las clases de generadores de gas se pueden utilizar para la gasificación y la generación de energía, pero solamente tres clases se han estudiado bien y se han puesto en funcionamiento práctico; siendo estos los corriente descendente estratificada, los corriente descendente y los de lecho fluidizado, según lo enumerado en la tabla 2-32.

Tipo de gasificador	Corriente descendente estratificada	Corriente descendente	Lecho fluidizado
Tipo de combustible	Residuos de madera	Cáscara de arroz	Cáscara de arroz
Capacidad eléctrica (kW <sub>e</sub> )	2-3	60-200	1,000-1,200
Valor calorífico del gas (kJ/Nm <sup>3</sup> )	4,100-5,300	3,800-4,600	4,600-6,300
Temperatura (°C)	1,100	700-800	650-850
Eficiencia cold gas (%)	70	50	67-75

Tabla 2-32. Generadores de gas de la biomasa usados para BGGP en China  
Fuente No. 12

Los datos del funcionamiento del gasificador de lecho fluidizado se muestran en la tabla 2-33.

Parámetro	Unidad	Descripción		
Alimentación de la cáscara de arroz	kg/h	1,500.00	885.00	885.00
Alimentación de aire	Nm <sup>3</sup> /h	1,650.00	1,350.00	1,610.00
Temperatura del gasificador	°C	775.00	800.00	1,610.00
Composición del gas	% volumen			
H <sub>2</sub>		7.59	6.33	7.04
CO		24.83	18.66	18.29
CO <sub>2</sub>		13.00	11.57	13.76
CH <sub>4</sub>		5.91	5.58	3.63
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		0.30	0.11	0.60
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		0.27	0.27	0.55
N <sub>2</sub>		48.00	51.88	56.00
PCI	kJ/Nm <sup>3</sup>	6,360.00	5,300.00	5,010.00

Tabla 2-33. Datos del funcionamiento del gasificador de lecho fluidizado.  
Fuente No. 12

### **Motores de gas**

Dependiendo de la naturaleza del combustible, los motores de gas según pueden ser motores de gas natural, de metano y los motores para biogas de bajo poder calorífico. En China, poca atención se ha prestado a los motores de biogas. Se han realizado estudios para emplear el biogas en dispositivos mayores a los 500 kW<sub>e</sub>, pero no hay productos aprobados todavía.

Actualmente, hay solamente dos clases de motores de gas aprobados: los de 160 kW<sub>e</sub> y los de 200 kW<sub>e</sub>. Debido a esta baja capacidad de los motores de gas, en un sistema de gasificación y de generación de energía, se tienen que emplear varios motores de gas juntos (cada uno de 200 kW<sub>e</sub>), evitando de esta forma que la capacidad del sistema de la gasificación y de generación de energía no quede limitada a un cierto nivel.

### **Limpieza del gas**

Los gases obtenidos de los gasificadores de gas de la biomasa, contienen generalmente una cantidad considerable de ceniza y de alquitrán que se debe quitar para evitar problemas de funcionamiento en los motores de gas. El nivel actual de la tecnología es deficiente, ya que no solo logra una disminución en la eficiencia de los sistemas de gasificación, sino que además se presentan altas concentraciones de alquitrán en el agua residual del proceso. La depuración de gases es la parte más débil para los sistemas BGPG, por lo que debe convertirse en un asunto importante de más trabajo de investigación.

### **▪ Características económicas**

#### **Inversión**

La inversión de los sistemas BGPG incluye principalmente tres partidas: gasificador, sistema de depuración de gases, y dispositivo de la generación de energía y obra civil. Según muestra la siguiente tabla, la inversión de un sistema BGPG de 1 MW es cerca de \$USD 367.2/kW<sub>e</sub>, que es mucho más bajo que el de las centrales eléctricas con carbón de pequeña escala, cerca de \$USD 720/kW<sub>e</sub>.

<b>Partida</b>	<b>Descripción</b>	<b>Inversión (\$USD)</b>
Gasificador	Capacidad de 5MWt	60,000
Scrubber	Para 2,500 Nm <sup>3</sup> de gas	12,000
Ingeniería del gas	5 unidades, c/u de 200 kW <sub>e</sub>	180,000
Transmisión de potencia	Cables y panel de control	7,200
Tratamiento de agua		42,000
Equipos auxiliares	Bombas, motores, etc	18,000
Construcción	Instalación de todo el equipo	12,000
Obra civil	200 m <sup>2</sup>	24,000
Sistema de monitoreo	Instrumentos y equipo de control	12,000
<b>Total</b>		<b>367,200</b>

Tabla 2-34: Costo de capital para un sistema de gasificación y generación eléctrica de 1 MW<sub>e</sub> que emplea la cáscara de arroz en China. Fuente No. 12

#### **Costo de la electricidad**

El costo de la operación de un sistema BGPG incluye el costo de la biomasa, el costo del mantenimiento, el costo de depreciación y el costo de mano de obra. Para un sistema de gasificación y de generación eléctrica de 1 MW<sub>e</sub> a partir de la cáscara de arroz, es cerca de \$USD 0.0324/kW<sub>e</sub>h, que está casi como el costo de una central eléctrica con carbón, y mas bajo que el costo de una central de generación con diesel.

<b>Capacidad eléctrica</b>	<b>100 kW</b>
Tiempo de operación	6,500 h/año
Producción de electricidad	6,500,000 kW <sub>e</sub> h/año
Eficiencia	17%
Consumo de biomasa	1.55 kg/kW <sub>e</sub> h
Precio de la biomasa	\$USD 9.6/ton
Costo de la biomasa	\$USD 96,720/año
Costo de personal	\$USD 18,000/año
Costo de mantenimiento	\$USD 12,000/año
Tasa de depreciación	\$USD 84,000/año
Costo de la electricidad	\$USD 0.0324/kWh

Tabla 2-35: Costo de la electricidad para un sistema BGPG de 1 MW<sub>e</sub>.  
Fuente No. 12

En plantas de pequeña escala, los costos de mano de obra y mantenimiento aumentan considerablemente; por lo tanto, el costo de la electricidad aumenta con la disminución de la capacidad. Cuando la capacidad es menos de 100 kW<sub>e</sub>, los sistemas BGPG perderán ventajas competitivas, puesto que el costo de la electricidad está cerca al costo de las centrales de generación con diesel.

#### ▪ Conclusiones

Para desarrollar y fomentar la extensión la tecnología BGPG, tres aspectos del trabajo deben ser remarcados:

1. Investigar la tecnología de limpieza del alquitrán, y que evite la contaminación secundaria.
2. Modificar la tecnología de gasificación y de sistemas de generación eléctrica, para mejorar la eficiencia total, y reducir más los costos de generación de la electricidad.
3. Instalar las plantas de aprovechamiento de la biomasa en empresas que tienen grandes cantidades de residuos, evitando el problema de la recolección y del transporte.

### **3. HORNOS DE PIROLISIS**

Los hornos de pirolisis corresponden a la tecnología empleada en el proceso de conversión denominado pirolisis. Este es un proceso de oxidación parcial y controlada (quemado casi en ausencia de aire), a temperatura elevada, que permite obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquido (efluente pireleñoso) y gaseosos (gas pobre).

#### **DESCRIPCIÓN GENERAL**

El proceso de pirolisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor y en ausencia de oxígeno.

Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja, se pueden distinguir a lo largo del proceso varias etapas:

- Hasta los 120 °C se produce una pérdida de agua y de otros productos volátiles (deshidratación de la materia orgánica).
- A los 275 °C se efectúa la desoxigenación y desulfuración, por lo que se efectúa la disociación molecular de agua y dióxido de carbono, y comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno.
- Entre los 340 °C empieza la rotura de enlaces en compuestos alifático, por lo que se da la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
- Hasta los 380 °C comienza la etapa de carbonización (concentración de carbón en los residuos).
- A los 400 °C se efectúa la rotura de los enlaces C-N y C-O.
- Entre los 400 y 600 °C se lleva acabo la descomposición de los materiales bituminosos; generándose aceites y alquitranes como productos secundarios de la pirólisis.
- A los 600 °C se efectúa el craking del material bituminoso, generándose hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos.
- Por arriba de los 600 °C se generan los compuestos aromáticos volátiles.

La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y de la presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor. Las materias primas que se investigan actualmente para desarrollar esta técnica son los subproductos agrícolas y forestales y los residuos sólidos urbanos.

#### **Ventajas de la pirolisis**

- a) Es una tecnología que permite transformar a muchos procesos industriales lineales en cíclicos.
- b) Se maneja todo tipo de material orgánico con alto valor calórico.
- c) Los residuos se transforma en una fuente de energía que en una pequeña proporción mantiene el sistema y el resto se puede utilizar en otras tecnologías complementarias.
- d) Los residuos se pueden transformar, en algunos casos, en materia prima del proceso.
- e) Permite tratar los lodos de las plantas de tratamiento.

### **Desventajas de la pirolisis**

Este proceso aparentemente no presenta ninguna desventaja técnica ya que se trata de un sistema cerrado, que por lo tanto no genera emisiones a la atmósfera y en el que básicamente todos los subproductos obtenidos pueden ser reutilizados, ya sea como combustibles o materias primas para diferentes procesos industriales. Sin embargo la inversión requerida para la instalación de una planta pirolítica es alta, aunque este gasto puede recuperarse por la utilización de los subproductos, particularmente como combustibles en la generación de vapor y/o electricidad.

### **TIPOS DE TECNOLOGÍA**

Los sistemas pirolíticos que se han desarrollado se agrupan en dos categorías: los que utilizan una pirólisis convencional y los que desarrollan una pirólisis a altas temperaturas.

La pirolisis convencional puede efectuarse a baja temperatura, o a temperatura media. Los procesos a baja temperatura son hasta los 550 °C, y se emplean para la producción de aceites y alquitranes; en tanto que los procesos de temperatura media se llevan entre los 550 °C a 800 °C, con lo cual se obtiene la producción de metano e hidrocarburos superiores.

La pirolisis a alta temperatura se efectúa a temperaturas superiores a los 800 °C, con lo cual se logra la producción de gas con bajo poder calorífico.

A pesar que el desarrollo tecnológico en esta rama no es avanzado, actualmente los sistemas pirolíticos mayormente empleados en países desarrollados son:

- Pirolisis a altas temperaturas: Sistema de Torrax
- Pirolisis convencional: Sistema de Landgar o sistema Austín

El componente principal de los procesos mencionados con anterioridad es el reactor pirolítico, el cual consta de una retorta (cámara) calentada con gas, hermética y revestida con una chaqueta aislante. Esta retorta gira lentamente y tiene una pequeña inclinación en el sentido de alimentación hacia la descarga. Los residuos son alimentados a través de un sello que abre intermitentemente y son sometidos a la temperatura requerida en una atmósfera deficiente o libre de oxígeno. En México, aún no se ha aplicado esta tecnología.

### **PRODUCTOS OBTENIDOS**

Generalmente, los productos de reacción que se obtienen de la pirolisis se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Combustible gas: El gas está principalmente formado por monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) e hidrógeno (H), mezclados con gran cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); su poder calorífico es de 8-15 MJ/m<sup>3</sup> (el del gas natural es de 34.8 MJ/m<sup>3</sup>).

- **Combustible líquido:** Es el combustible o aceite que resulta de condensar los vapores de la pirólisis, contiene cantidades sustanciales de hidrocarburos aromáticos; su poder calorífico es del orden de 25 MJ/kg. Generalmente, la fracción líquida está constituida por metanol, fenol, acetona, acetaldehído, ácido fórmico metilfurfural, etanol, y aceites ligeros.
- **Residuos sólidos carbonosos:** Esta constituida por carbones y alquitranes, así como cenizas. El carbón vegetal resultante tiene un bajo contenido de azufre, lo que lo hace muy apreciado desde el punto de vista ambiental, con un poder calorífico de 25-30 MJ/kg. El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja, frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calorífico mayor. Sin embargo, la pirólisis significa una pérdida importante de la energía contenida en la biomasa utilizada como materia prima. Su uso se justifica cuando el proceso industrial en el cual se emplea lo requiere como condición imprescindible, como por ejemplo en la siderurgia, o cuando debe distribuirse o transportarse.

Las directrices de tratamiento más generalizadas respecto a la obtención de productos se orientan hacia la obtención de dos de los tres grupos posibles: normalmente, gases y sólidos o líquidos y sólidos, siendo frecuente que los gases obtenidos sean utilizados como combustible en otras partes del sistema de proceso.

En la Tabla 3-1 se reportan datos representativos del producto como función de la temperatura de operación.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desechos (kg)</b>	<b>Gases (kg)</b>	<b>Ácidos piroleñosos y breas (kg)</b>	<b>Materiales carbonizados (kg)</b>
482	45.35	5.6	27.7	11.2
649	45.35	8.5	8.5	26.8
815	45.35	10.7	27.1	7.8
927	45.35	11.0	26.6	8.0

Tabla 3-1: Rendimiento del producto pirolítico. Fuente No. 172

En la tabla 3-2 se dan las características típicas de la fracción gaseosa obtenida en la pirólisis.

<b>Gas</b>	<b>Por ciento en volumen</b>			
	<b>482 °C</b>	<b>649 °C</b>	<b>815 °C</b>	<b>927 °C</b>
H <sub>2</sub>	5.56	16.58	28.55	32.48
CH <sub>4</sub>	12.43	15.91	13.73	10.45
CO	33.50	30.49	34.12	35.25
CO <sub>2</sub>	44.77	31.78	20.59	18.31
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.45	2.18	2.24	2.43
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.03	3.06	0.77	1.07
Balance	99.74	100.0	100.00	99.99

Tabla 3-2: Gases emitidos por la pirólisis. Fuente No. 172

Finalmente, en la tabla 3.-3 se dan las características típicas de la fracción líquida obtenida en la pirólisis.

Características	Por ciento en volumen				
	482 °C	649 °C	815 °C	927 °C	Antracita
Material volátil	21.81	15.05	8.13	8.30	7.66
Carbón fijo	70.48	70.67	79.05	77.23	82.02
Ceniza	7.71	14.28	12.82	14.47	10.32
Poder calorífico (kJ/kg)	28.2	28.5	26.7	26.5	32.2

Tabla 3-3: Análisis aproximado del material carbonizado pirolítico. Fuente No.172

### **COSTOS DE LA TECNOLOGÍA**

De acuerdo a la información disponible (Fuente No. 157), el costo de inversión inicial de una planta de pirólisis es aproximadamente igual al de una planta de incineración y su funcionamiento resulta igualmente costoso; aunque a diferencia de las plantas de incineración, los costos son recuperables en las plantas de pirólisis ya que básicamente todos los subproductos son reutilizables y representan un ingreso potencial.

El costo de inversión de una planta grande de que procese 320,000 toneladas de residuos al año es de alrededor de 142 millones de dólares y el costo de tratamiento por tonelada de residuos es alrededor de 60 dólares/tonelada.

Para una instalación mediana que procese 150,000 toneladas/año el costo de inversión es de alrededor de 88 millones de dólares, con un costo de funcionamiento de 70 dólares por tonelada de residuos.

En una instalación pequeña de 90,000 toneladas/año de residuos, el costo de inversión aproximado será de 53 millones de dólares, con un costo de funcionamiento de 80 dólares por tonelada.

### **DESARROLLO TECNOLÓGICO**

El estado actual de la tecnología de las plantas para pirólisis aun se encuentra en desarrollo, sin embargo estudios recientes muestran el interés en emplear este tipo de tecnología para la obtención de hidrogeno combustible. En este aspecto, a continuación se muestra uno de los estudios mas recientes sobre el tema realizado en Japón.

#### **3.1. PRODUCCIÓN EFICIENTE DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA BIOMASA**

Un estudio de viabilidad de un sistema de producción de hidrógeno que usa la biomasa forestal mediante un proceso de pirólisis fue conducido como parte del proyecto de WE-NET de NEDO. Usando el proceso de la pirólisis, los combustibles sólidos y los materiales de desecho pueden ser gasificados, y el gas de síntesis resultante puede ser empleado para la producción de hidrógeno sin la necesidad de una fuente del oxígeno puro. Usando este sistema, se espera una producción de 7,400 millones de m<sup>3</sup>/año de hidrógeno para uso doméstico en Japón.

Actualmente la obtención de hidrógeno se logra mediante sistemas electrolíticos y la producción de hidrógeno empleada por medio de sistemas industriales, tales como: gas del horno de coque, electrolisis, e hidrógeno de la producción petroquímica. Para solucionar este problema tecnológico, WE-NET está investigando la viabilidad de la producción del hidrógeno a largo plazo a partir de la biomasa. Se espera que los sistemas de pirolisis que produzcan hidrógeno a partir de la biomasa desempeñen un papel significativo en la reducción de las emisiones del CO<sub>2</sub>.

▪ **Contenido del hidrógeno en varios tipos de material**

La cantidad de hidrógeno contenida en los materiales que se tratarán es una consideración importante. La composición de combustibles comunes se muestra en la tabla 3-4.

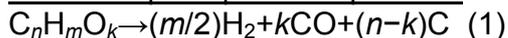
Combustible	Carbón	Aceite	Metano	Madera
PCI (GJ/ton)	28	42	55	20
C, %	85	85	75	49
H, %	6	15	25	6
O, %	9	0	0	45

Tabla 3-4: Composición de combustibles comunes. Fuente No. 92

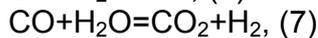
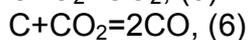
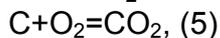
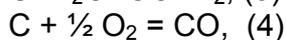
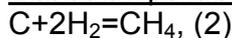
Según lo considerado en la tabla anterior, el combustible de madera, con un contenido en hidrógeno de cerca del 6%, es un buen candidato a una fuente de energía de hidrógeno. Por otra parte, un componente importante del combustible de madera es típicamente la celulosa (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), con una cantidad equivalente a la masa del hidrógeno presente.

La generación de energía a partir de la biomasa mediante una combustión directa, y el proceso de la pirolisis son diferentes. La reacción del proceso de la pirolisis es como sigue:

Reacción principal de la pirolisis:



Reacción parcial:



Una ventaja anticipada del proceso de la pirolisis de la biomasa es la reducción posible de emisiones de NO<sub>x</sub> y del sulfuro en las plantas con carbón. El combustible de madera contiene menos nitrógeno que el carbón, y la humedad en la madera sirve para refrescar el proceso de la combustión del carbón, reduciendo la formación de NO<sub>x</sub> térmicos.

Aunque el sistema de la pirolisis de la biomasa genera CO<sub>2</sub> según lo demostrado en la fórmula 5, 7 y 8; un esfuerzo previsto en la reforestación puede balancear este efecto.

▪ **El potencial de hidrógeno en Japón**

Se espera que el potencial total del suministro de hidrógeno a partir de la biomasa en Japón en el año 2010 sea de 7,410 millones de m<sup>3</sup>/año. Sin embargo, esto es un cálculo simple que emplea solamente la información respecto a las fuentes de biomasa consideradas en el estudio actual, y por lo que el potencial real puede diferir con este cálculo.

▪ **Estudio de la viabilidad de los sistemas de producción de hidrógeno**

Dos diversos sistemas de conversión energética de la biomasa son investigados en este estudio: el sistema de producción de hidrógeno, y un sistema de generación de potencia, como medida de comparación. Asumimos que 100 ton/día de biomasa de madera son la materia prima para la gasificación. La composición química de los flujos de material se muestra en la figura 3-1.

El valor calorífico del gas de síntesis es de 17.6 MJ/kg. Debido a que el contenido de humedad en la biomasa varía considerablemente según la fuente de la madera, asumimos que la madera será presecada a un nivel de humedad de 4.8% (base húmeda). Las condiciones de funcionamiento del horno de pirolisis fueron fijadas a la presión atmosférica, la temperatura del compartimiento de la gasificación fue fijada a 627 °C y la temperatura en el compartimiento de la combustión fue fijada en 827 °C.

La cantidad de gas de síntesis es cerca de 5,600 m<sup>3</sup>/h y sus componentes principales son H<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>. El cociente de H<sub>2</sub>/CO del gas de síntesis es cerca de 2.15, que es más alto que la relación obtenida de los sistemas de gasificación con una oxidación parcial, siendo este de 1.

▪ **Sistema generación de H<sub>2</sub>**

El organigrama del proceso del sistema H<sub>2</sub> se muestra en la figura 3-1.

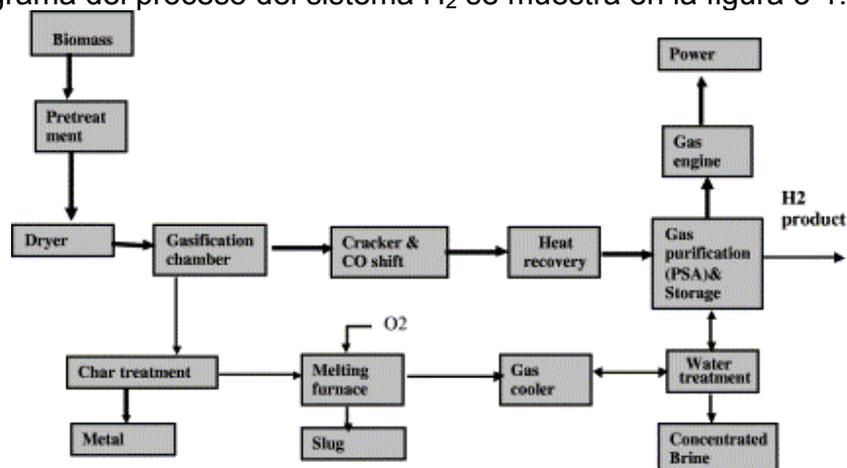


Figura 3-1: Organigrama de proceso del sistema H<sub>2</sub>.

- **Sistema generación de electricidad**

El organigrama del proceso de este sistema de generación de potencia (sistema de G/E) se muestra en la figura 3-2. El estudio de este sistema fue realizado para confirmar que en efecto la eficiencia del sistema es menor respecto al sistema de generación de H<sub>2</sub>.

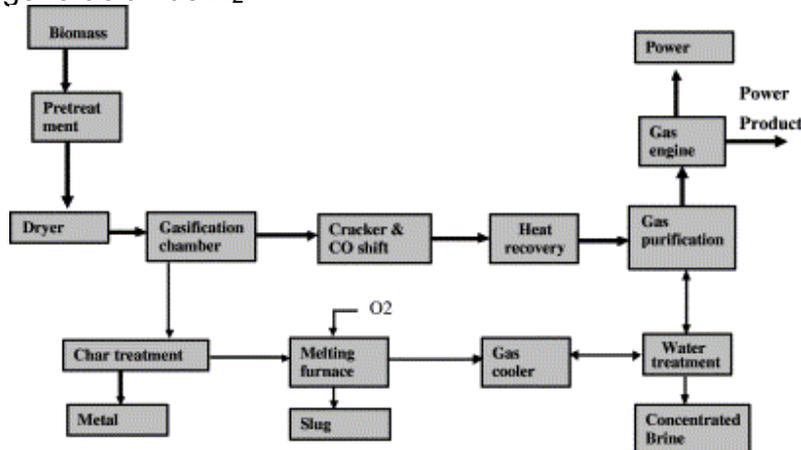


Figura 3-2: Organigrama de proceso del sistema de G/E.

- **Comparación de la eficacia y de los productos**

La cantidad de producto generada usando el sistema H<sub>2</sub> se estima en 2,740 m<sup>3</sup>/h a partir de 100 ton/día de biomasa forestal, en tanto que el sistema de generación de electricidad obtiene como producto 6,380 kW<sub>e</sub>. La eficacia de conversión para el sistema de generación de hidrógeno es de 47.9%, en tanto que para el sistema de generación de potencia es de 31.4%.

- **Análisis económico**

Los costos reportados corresponden a un sistema de pirolisis que emplea 100 ton/día de biomasa como materia prima, y que produce 2,740 m<sup>3</sup>/h de H<sub>2</sub>. En este caso, el costo de capital es \$USD 3,950/kW H<sub>2</sub> obtenido y el costo del producto es \$USD 0.108/kWh H<sub>2</sub> obtenido.

La figura 3-3 muestra la relación entre el costo de capital y la escala de la planta.

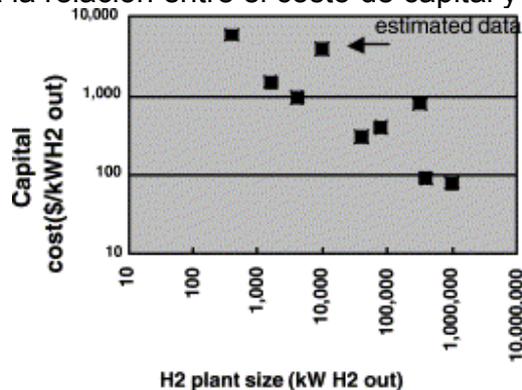


Figura 3-3: Relación entre el costo de capital (\$USD/kW H<sub>2</sub>) y la escala de la planta (kW H<sub>2</sub>). Fuente No. 92

En la figura 3-4 se muestra la relación entre el costo del producto y la escala de la planta.

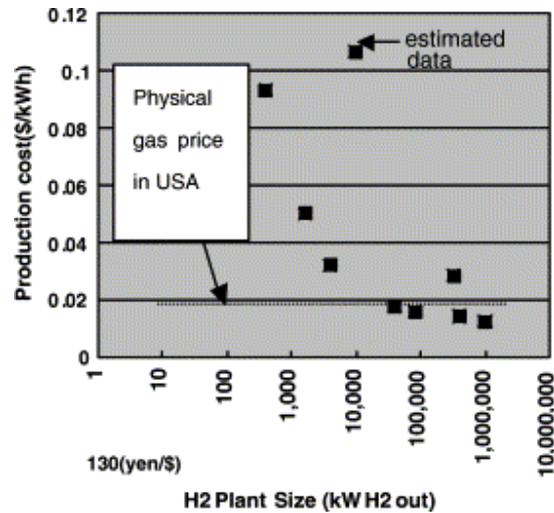


Figura 3-4: Relación entre el costo del producto (\$USD/kWh H<sub>2</sub>) y la escala de la planta (kW H<sub>2</sub>). Fuente No. 92

#### ▪ Conclusiones

- Un horno de pirolisis puede convertir la biomasa forestal en hidrógeno con una eficiencia de conversión alta, del orden del 47.9%.
- Una valoración del potencial doméstico de la fuente del hidrógeno usando recursos biomásicos en Japón demostró la existencia de un amplio potencial de aprovechamiento.
- Los costos de capital y los costos de producción del sistema H<sub>2</sub> al ser comparados con otros datos de referencia obtenidos de un sistema diferente, han demostrado una viabilidad económica para la realización de esta tecnología.

### Anexo B

## TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL Y BIODIESEL

### 4. PLANTAS PARA LA OBTENCIÓN DE ALCOHOLES

La tecnología empleada para la obtención de alcoholes corresponde a grandes plantas industriales conformadas por un gran número de equipos, entre los cuales cabe destacar los siguientes: molinos, equipos de conversión y sacarificación, fermentadores, equipos auxiliares, columnas de destilación, secadores y evaporados, así como torres de enfriamiento.

La hidrólisis y posterior fermentación de la biomasa con alto contenido de azúcares, almidones o celulosa, puede utilizarse para la producción de alcohol etílico (etanol). Los carbohidratos, compuestos naturales formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, son la materia prima del proceso; estos se clasifican en tres categorías generales, en orden de complejidad creciente: azúcares, almidones y celulosas. La materia prima empleada para la producción de alcohol es toda aquella que contenga algunas de esas tres categorías de carbohidratos.

## **DESCRIPCÓN GENERAL**

El etanol es un alcohol y su mayor parte se fabrica siguiendo un procedimiento similar al de la cerveza, en el que los almidones son convertidos en azúcares, los azúcares se convierten por fermentación en etanol, el que luego es destilado en su forma final. El etanol fabricado a partir de materiales con biomasa celulósica en lugar de los forrajes tradicionales (cultivos ricos en almidones) es llamado bioetanol.

Bioetanol o etanol, se produce por fermentación de productos azucarados (remolacha y la caña de azúcar). También puede obtenerse de los granos de cereales (trigo, la cebada y el maíz), previa hidrólisis o transformación en azúcares fermentables del almidón contenido en ellos.

El etanol se utiliza en vehículos como sustitutivo de la gasolina, bien como único combustible o en mezclas que, por razones de miscibilidad entre ambos productos, no deben sobrepasar el 5-10% en volumen de etanol en climas fríos y templados, pudiendo llegar a un 25% en zonas más cálidas. Sin embargo, el uso de mezclas no requiere cambios significativos en los vehículos, si bien, en estos casos el alcohol debe ser deshidratado a fin de eliminar los efectos indeseables sobre la mezcla producida por el agua.

El etanol se utiliza para aumentar el octanaje de la gasolina y mejorar la calidad de sus emisiones. En la actualidad, el etanol se mezcla con gasolina para formar una mezcla E10 (10% de etanol y 90% de gasolina) pero puede ser usado en concentraciones mayores tal como la mezcla E85 o en su forma pura. Las mezclas de etanol como carburante se utilizan con éxito en todos los tipos de vehículos y máquinas que requieren gasolina.

Dependiendo del tipo de biomasa de partida, es necesario analizar con detalle el rendimiento de este proceso de conversión de la biomasa en etanol combustible, para poder evaluar su viabilidad técnica y económica, ya que, cuando la materia prima es rica en almidón o celulosa, es necesario someterla previamente a ciertos procesos para transformarla en compuestos fermentables. Se distinguen tres grandes grupos de biomasa susceptible de ser fermentada a alcohol, que se muestran en la siguiente tabla:

Sentadas estas bases, se puede dividir el proceso global de obtención de etanol a partir de biomasa en las siguientes etapas:

- Pre-tratamiento de la materia prima
- Hidrólisis
- Fermentación alcohólica
- Separación y purificación del etanol

Obsérvese que este esquema es una generalización del proceso, ya que la etapa de hidrólisis es opcional, dependiendo de la biomasa que se vaya a procesar.

<b>Azucaradas</b>	
	Mostos y jugos de diversas frutas Remolacha y caña de azúcar Sorgo azucarado Algarroba Mandioca
<b>Almidones</b>	
Cereales:	Maíz Cebada Malta Trigo Avena Centeno Arroz
Tubérculos	Patata Raíz de girasol
<b>Celulósicas</b>	
	Madera Bagazo de caña Residuos de paja de trigo Despojos de maíz Líquidos residuales del papel

Tabla 4-1: Materia prima para la obtención de etanol. Fuente No.157

#### ▪ **Pretratamiento de la biomasa**

El pretratamiento tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando ésta no favorece a la fermentación. El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas, ya que su objetivo fundamental es reducir éstas a partículas pequeñas, de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores, es el mecánico, consistente en la trituración, molienda, y pulverización de la biomasa.

Cuando se trabaja con biomasa que contiene almidón, se suele someter ésta, además, a una cocción, con objeto de gelatinizarla, es decir, impregnarla bien de agua para obtener una masa homogénea. La celulosa generalmente se trata con diversos agentes químicos (ácidos, principalmente), que permiten solubilizarla y separarla de la lignina (sustancia no fermentable).

#### ▪ **Hidrólisis**

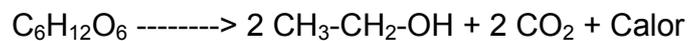
La hidrólisis, o ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa, bien mediante fermentos o enzimas (hidrólisis enzimática), o bien, mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).

La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidos de microorganismos, dependiendo las condiciones óptimas del proceso de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos del pretratamiento efectuado y del sustrato empleado.

La hidrólisis química de la celulosa se efectúa preferentemente con los ácidos clorhídrico y sulfúrico (hidrólisis ácida) o con una base fuerte (hidrólisis alcalina). Aunque en este caso la reacción es mucho más rápida que en la hidrólisis enzimática, las temperaturas de trabajo son muy superiores (mayor consumo de energía) y se producen problemas de corrosión.

#### ▪ **Fermentación alcohólica**

Una vez que la biomasa conteniendo hidratos de carbono se ha transformado en una solución azucarada se puede someter esta a un proceso de fermentación con objeto de convertir los azúcares en etanol. La fermentación alcohólica es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos. Esta transformación se produce a través de una compleja secuencia de reacciones que puede expresarse, desde el punto de vista tecnológico, por la siguiente ecuación:



Según esta reacción, de 100 kg de glucosa se obtienen 51.1 kg de etanol y 48.9 kg de dióxido de carbono. En la práctica, el rendimiento real en etanol es menor que el valor teórico, ya que aproximadamente un 5% de glucosa es utilizado por el microorganismo para producir nuevas células y otros productos de su metabolismo.

Los microorganismos generalmente empleados son las levaduras, hongos unicelulares ampliamente distribuidos en la naturaleza. Los más utilizados en la fermentación alcohólica son los de la familia *Saccharomyces* (*S. cerevisiae*). En la acción de las levaduras influye una gran cantidad de factores, entre los que destaca la temperatura, el pH y la concentración de azúcares.

Tradicionalmente, la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación.

#### ▪ **Separación y purificación del etanol**

En la masa de fermentación, el etanol sólo se encuentra en una concentración máxima del 8 al 12%. Esto obliga a una concentración de la disolución si se quiere obtener el etanol libre de agua. Industrialmente se emplea la rectificación (una forma de destilación) para separar el etanol de la masa fermentada. Esta operación se hace normalmente en dos etapas. En la primera destilación, la fracción de cabeza contiene etanol al 50 - 60% y otros productos, mientras que la cola está compuesta por una disolución de proteínas, azúcares y vitaminas, que puede utilizarse en la elaboración de alimento para animales.

El efluente intermedio contiene una disolución de etanol al 95%, pureza imposible de superar por destilación ya que se trata de una mezcla azeotrópica, es decir, de punto de ebullición constante. Este etanol es el que se encuentra comercializado en la actualidad.

## TIPOS DE TECNOLOGÍA

La tecnología empleada para la obtención del etanol varía dependiendo del tipo de materia prima empleada (biomasa con alto contenido de azúcares, almidones o celulosa). Actualmente la tecnología comúnmente empleada en la obtención de etanol a partir de la biomasa es la que emplea biomasa rica en almidones (cereales), debido a sus mayores rendimientos.

Materia prima	Litros/ton	Litros/ha. año
Caña de azúcar	70	400 – 12,000
Maíz	360	250 – 2,000
Yuca (raíz)	180	500 – 4,000
Papa	120	1,000 – 4,500
Madera	160	160 – 4,000

Tabla 4-2: Rendimientos esperados en la producción del etanol. Fuente No.133

A continuación se describe el tipo de tecnología requerida para el caso de emplear biomasa rica en almidón (trigo, maíz u otros cereales).

### **Proceso de fabricación**

El proceso de fabricación que a continuación se describe corresponde a una planta de producción de etanol con capacidad de 35,000,000 l/año. En esta planta, por cada 0.386 litros de etanol producido se consume en la ingeniería del proceso 1 kilogramo de trigo.

#### **A) Almacén de materias primas**

Cuando se emplea como materia prima el trigo, el procedimiento aplicable será el siguiente: Inicialmente el trigo será transportado hasta la planta por medio de camiones y de remolques agrícolas. Para el control de la mercancía que entra y sale de la planta se requiere de una báscula electrónica con capacidad para que puedan entrar en ella sin problemas camiones. Como máximo un ritmo de afluencia de camiones de 35 al día lo que supone unas 800 toneladas al día, este será el caudal para el que se dimensionarán los equipos de transporte de la materia prima. El trigo recibido será recogido en tolvas de recepción desde las que se llevará por medio de transportes de cadena a los silos de almacenamiento. La capacidad de almacenamiento de los silos será la que nos permita una capacidad de almacenamiento para 45 días de procesado. De los silos de almacenamiento la materia prima será llevada a la planta de molienda.

#### **B) Molienda**

La materia prima llega a la planta de molienda donde primero se le somete a un proceso de limpieza, después pasa a los molinos de martillos, donde se obtiene la harina que va a ser empleada en las siguientes etapas. El proceso de molienda es el de molienda seca; está caracterizada por la división brusca del cereal, seguida de un calentamiento y licuefacción en agua caliente. Esta es la solución más simple, la que menor costo de inversión, de mantenimiento y de operación necesaria, además hay un rendimiento un poco más alto en etanol que en la molienda húmeda. El grano será molido de manera que sólo un 10% de las partículas será mayor a 1 mm.

### **C) Conversión y sacarificación del almidón**

El flujo de harina proveniente de la zona de molienda se mezcla con el agua de proceso, vapor condensado en el proceso de evaporación, vinazas recirculadas de la columna de destilación y agua residual. De este modo se aprovechan al máximo las aguas y vinazas, se calienta a 75 °C, menor que la temperatura de gelatinización del conjunto, y se corrige el pH añadiendo a continuación enzimas hidrolizantes (amilasa); la función de estas enzimas hidrolizantes es romper los enlaces de almidón. Transcurridas dos horas se pasa a la fase de sacarificación disminuyendo la temperatura a 60 °C e incorporando una nueva enzima (amiloglucosidasa). Se corrige de nuevo el pH mediante la adición del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Transcurridas ocho horas el mosto así obtenido se enfría a 30-35 °C y se procede a su fermentación. El proceso se efectúa en tanques de acero inoxidable, con agitadores y calorifugados.

### **D) Fermentación**

El mosto enfriado proveniente de la sacarificación, se introduce en tanques para su fermentación mediante la adición de levaduras específicas. Primero se lleva el mosto a un prefermentador en el que permanecerá unos 17 minutos. Es necesario añadir al mosto inoculado elementos nutrientes (proteínas) para favorecer el crecimiento de las levaduras así como airearlos, y la temperatura debe ser mantenida por debajo de los 32 °C por lo que los tanques deberán ir provistos de equipos refrigerantes exteriores.

El proceso es realizado con flujo en cascada pasando primero por un prefermentador y después por cinco fermentadores conectados en serie. El proceso se efectúa de forma continuada durante treinta y ocho horas, hasta que las levaduras hayan transformado el azúcar disponible en alcohol. Así se obtiene una cerveza de contenido alcohólico aproximado del 10% la cual pasa a la fase de destilación y deshidratación.

*Saccharomyces cerevisiae* ha sido el microorganismo más ampliamente estudiado y es el que se usa, se va a usar una cepa tolerante al etanol. Esta cepa va a tener una alta tolerancia a la concentración de etanol. La levadura va a ser propagada sólo por el primer tanque, ya que al inicio del proceso irán pasando a los sucesivos tanques a medida que vaya discurriendo el flujo por los distintos fermentadores.

Una de las claves principales para el éxito del proceso va a ser mantener un nivel de células de *Saccharomyces* alto para tener una rápida fermentación.

Para mantener la concentración de *Saccharomyces*, debido a las características autocatalíticas del proceso, se va a realizar un reciclado de las vinazas después de su destilación lo que hará que se mantenga biocatalizador dentro del sistema reactor. Una nueva levadura es propagada y cambiada en el primer fermentador en aproximadamente un mes.

El riesgo de contaminación en el proceso existe ya que las bacterias acidolácticas están siempre en la naturaleza, debido a que el proceso industrial

de fermentación no es aséptico, por esta razón nos encontramos en los tanques de fermentación bacterias acidolácticas.

Para mantener un control sobre la población bacteriana se deberá tener el pH en un rango de 4 a 6, siempre con unos buenos niveles de oxígeno lo que asegurará un rápido crecimiento de la población de levaduras.

El CO<sub>2</sub> de la fermentación se recoge en una columna, se lava con ducha de agua y este agua se recicla a la licuefacción, y el CO<sub>2</sub> se pone a disposición de una empresa consumidora a pié de planta. El tiempo del ciclo de fermentación puede ser de 40 a 72 horas. Se la llama cerveza a los licores que están en los fermentadores al concluir el ciclo.

### **E) Destilación y deshidratación**

El mosto se destila en dos etapas. En ambas se utiliza además de vapor el calor residual de otras zonas. El número recomendado de platos para la separación agua etanol es de 60 platos separados distancias que van desde los 600 mm a los 500 mm.

La primera etapa es en una columna de destilación y una columna destrozadora que produce vapores de alcohol con un contenido del 45 % de alcohol y el bagazo más las vinazas que serán objeto de proceso de obtención del pienso.

La columna de destilación tiene 22 platos separados a una distancia de 600 mm. A esta columna es a la que entra el flujo de cerveza proveniente de la fermentación. Los flujos de salida que van a ser:

- Cerveza con un grado alcohólico entorno al 25 %, parte de este flujo se recirculará y se condensará para provocar una lluvia en la torre de destilación.
- Vinazas que irán al proceso de secado y evaporación.
- Parte del condensado que tenemos en la parte baja de la torre pasará a través de un hervidor que lo convertirá en gas por medio de un aporte de vapor de agua.

La columna destrozadora cuenta con 16 platos separados a 500 mm. A esta columna llega el flujo de cerveza proveniente de la columna de destilación. Los flujos de salida a tener van a ser:

- Cerveza con un grado alcohólico entorno al 45 %, parte de este flujo se recirculará y se condensará para provocar una lluvia en la columna destrozadora.
- Vinazas que irán al proceso de secado y evaporación.
- Parte del condensado que tenemos en la parte baja de la torre pasará a través de un hervidor que lo convertirá en gas por medio de un aporte de vapor de agua.
- Los vapores producidos van a pasar a través de una ducha de vahos con compacto, el condensado se va a recircular.

La segunda etapa eleva el grado de la solución alcohólica a 95 % mediante su paso por una columna rectificadora. El número de platos es de 22 y la separación entre ellos es de 500 mm. En la columna rectificadora vamos a tener también el rehervidor en la base de la columna y la recirculación de parte del alcohol húmedo que tenemos en la parte superior de la columna.

Estos vapores con contenido alcohólico de 95-96 % se recalientan de nuevo y se introducen en el tamiz molecular. Estas, tienen en su interior un lecho de zeolitas específicamente configurado muy absorbente capaz de absorber, a la temperatura y presión del proceso, el agua de los vapores alcohólicos elevando la concentración a más del 99.75 %.

Una columna trabaja en modo deshidratación mientras la otra regenera. La regeneración del lecho se efectúa por inmersión en alcohol deshidratado, obteniéndose una solución alcohólica de 60 °C de concentración que se envía a la columna rectificadora.

El alcohol así obtenido, se enfría y se manda a los tanques del almacén de alcohol para su expedición.

#### **F) Preparaciones auxiliares**

En esta etapa se preparan las sustancias necesarias para ajuste del pH, reacciones bioquímicas y limpieza de los equipos par su uso en conversión, sacarificación y fermentación.

Estas preparaciones auxiliares incluyen: el almacenamiento y dilución del ácido sulfúrico par la sacarificación y fermentación, almacenamiento y dilución de la sosa cáustica concentrada para conversión y limpieza, dosificación de enzimas, dilución del  $\text{CaCl}_2$  y dosificación para conversión, dilución de nutrientes y dosificación para fermentación, preparación de agua caliente de proceso o condensados para limpieza, preparación de la solución CIP para la limpieza, y dosificación de agente antiespumante.

#### **G) Almacén de etanol**

La producción diaria proveniente de la columna deshidratadora se recoge en una tanque de diario para su chequeo y control, caso de aceptación pasa al almacén general de alcohol. Los tanques estarán provistos de cabeza flotante interna para evitar la contaminación acuosa y dispondrán del sistema contra incendios.

#### **Programa productivo**

##### **A) Materia prima: (trigo)**

El trigo es utilizado en el proceso como materia prima. En el trigo no habrá diferencias por ningún tipo de ciclo aceptándose cualquier clase de ciclo que sea entregado por los agricultores. La composición tipo del trigo recogido será:

Materia orgánica: 973 g/kgMS

Materias nitrogenadas totales: 125 g/kgMS

Fibra bruta: 27 g/kgMS

Materia grasa: 20 g/kgMS

Cenizas: 27 g/kgMS

Hidratos de carbono: 641 g/kgMS

Humedad del trigo: 13 %

## **B) Productos**

Como producto principal del proceso obtenemos alcohol deshidratado del 99.75 % de pureza. En algún caso especial podríamos llegar a obtener alcoholes de otras características.

- Alcohol deshidratado

Con las siguientes características:

Pureza: 99.75 %

Contenido no alcohólico inferior a 90 mg/l.

Contenido en derivados bencénicos inferior a 60 ppm.

- Alcohol de reacción

- Pureza: 96.3 GL (15 °C)
- Acidez en gramos de acético por HI de alcohol 100%: menor a 1.8.
- Contenido en ésteres expresado en gramos de acetato de etilo por HI de alcohol 100 %: menor a 6.0.
- Contenido en aldehídos expresado en gramos de acetaldehído por HI. de alcohol 100 %: menor 1.
- Contenido en alcoholes superiores expresado en gramos de alcohol isobutílico por HI de alcohol 100 %: menor de 0,4.
- Contenido en amoníaco y bases nitrogenadas volátiles expresado en gramos de nitrógeno por HI de alcohol 100 %: menor de 0.2.
- Impurezas totales en gramos por HI de alcohol 100 %: menor de 9.0.

- Alcohol de segunda calidad

Este alcohol está constituido por una mezcla de los flujos procedentes de la cabeza de la columna de purificación (muy cargado con acetatos), el flujo procedente de la cabeza de la columna de rectificación (muy cargado con aldehídos) y el alcohol superior procedente de la columna de rectificación (muy cargado con isopropanol). Sus características son:

- Pureza real: mínimo 90.5 GL (15°C)
- Extracto seco: máximo 6 g/HI, alcohol 100%.
- Acidez en gramos de ácido acético por HI de alcohol 100%: menor de 10.
- Contenido en alcoholes superiores expresado en gramos de alcohol isobutílico por HI de alcohol 100%.
- Contenido en derivados sulfurosos: ninguno.

### **Control de la calidad del etanol**

Los parámetros a controlar van a ser:

- Densidad: Su valor normal es de 0.749 kg/l.
- Contenido en agua: El contenido en agua no debería nunca ser superior al 0.25 %, ya que el proceso de deshidratación eleva su pureza a más de 99.75 %.
- Temperatura de ebullición: La temperatura de ebullición característica del etanol son los 78 °C.
- Contenido en oxígeno: El contenido en oxígeno del etanol está en torno al 34.8 % en peso.
- Residuo seco: Ningún residuo seco apreciable.

## PRODUCTOS OBTENIDOS

El producto principal que se obtiene de la fermentación alcohólica es el etanol. Para analizar las propiedades del etanol como sustitutivo total o parcial de la gasolina en su uso como combustible es necesario, en primer lugar, conocer las propiedades de cada uno de estos productos y sus posibles interrelaciones en caso de mezcla. Las propiedades físico-químicas de interés para el estudio del comportamiento del etanol como combustible en motores de automóvil aparecen comparadas con las de la gasolina en la siguiente tabla:

Propiedad	Gasolina	Etanol
Fórmula	C <sub>5</sub> - C <sub>12</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O
Densidad (kg/l)	0.70 - 0.78	0.79
Solubilidad en agua a 20 °C (ppm)	240	infinita
Punto de ebullición (°C)	88	78.3
Relación estequiométrica aire/combustible	25 - 225	11
Índice de octano	95	106
Máxima compresión admisible	15:1	9:1
Poder calorífico (MJ/kg):		
Inferior	44.0	26.7
Superior	47.1	29.8
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	348.8	920.9

Tabla 4-3: Comparación de las propiedades del etanol y la gasolina

El etanol tiene numerosas aplicaciones industriales como disolvente y como combustible. Los diversos estudios realizados hasta el momento respecto al uso como combustible del etanol muestran, en primer lugar, que el etanol y la gasolina no son combustibles intercambiables para un mismo vehículo. Las modificaciones fundamentales que hay que hacer en un motor de gasolina que ha de trabajar con etanol se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aumento de la relación de compresión
- Recalibrado del carburador
- Calentamiento del aire que entra al carburador
- Modificación del sistema de encendido
- Uso de bujías especiales

Realizando estos cambios se ha logrado un incremento de la potencia del 15 %, una mayor eficacia térmica (30 %), menos emisiones de monóxido de carbono, pero a costa de un mayor consumo (alrededor de un 20 %).

Sin embargo la adición de etanol anhidro (alrededor de un 10 % en volumen) a la gasolina (mezcla conocida como *gasohol*), utilizando un motor convencional, aumenta su capacidad antidetonante, lo que permite reducir la adición de componentes de plomo a la gasolina, altamente contaminantes. Así mismo, este hecho podría ahorrar el petróleo correspondiente al volumen de gasolina sustituido, más el correspondiente al combustible empleado en las refinerías para obtener gasolinas de un índice de octano más elevado.

En la fabricación del etanol también se obtienen productos secundarios como: anhídrido carbónico, levadura para pan (*saccharomyces*), y vinaza.

## COSTOS DE LA TECNOLOGÍA

Para determinar el costo de la tecnología para la producción de etanol, a continuación se presentan varios casos, algunos son sólo estudios y otros son plantas reales, que involucran diferentes capacidades y tipos de tecnología.

### 4.1. ESTUDIO A PARTIR DE LA CAÑA, CASO MÉXICO

La base de cálculo de la simulación del proceso y de la evaluación económica se tomó para una planta con una capacidad de producción de 253,4 millones de litros de etanol anhidro (200,000 toneladas de etanol por año). Este volumen de etanol es el requerido para oxigenar al 2.7 % (v/v) la gasolina utilizada por cerca de 4 millones de automóviles (aproximadamente el parque automotriz de la zona metropolitana del Valle de México). Se seleccionaron dos procesos: uno a partir de melazas y otro a partir de bagazo de Caña. En ambos casos, el tiempo de vida del proyecto es de 15 años. El precio de compra de las melazas es de 40US\$/ton y el del bagazo de Caña de 10US\$/ton.

Parámetro	Valores
Calidad del Producto	Etanol anhidro
Capacidad de producción	253.4X10 <sup>6</sup> l/año
Tiempo de vida del proyecto	15 años
Tecnología	1) A partir de melazas 2) A partir de bagazo
Precio de compra de materia prima	1) 40 (US\$/ton) 2) 10 (US\$/ton)
Volumen de gasolina que podría ser oxigenada al 2.7 % (v/v)	9,385X10 <sup>6</sup> l/año
Vehículos que podrían utilizar la gasolina oxigenada al 2.7% (v/v)	4X10 <sup>6</sup>

Tabla 4-4: Datos principales del proceso de fabricación de etanol a partir del bagazo y la melaza de caña. Fuente No. 174

En el primer proceso, las melazas se diluyen y se les ajusta el pH, posteriormente pasan al fermentador, en donde los azúcares son transformados a etanol en condiciones anaerobias. Al finalizar esta etapa, el caldo de fermentación pasa a unas torres de destilación en donde se separa el etanol de la mayoría del agua, saliendo como una mezcla azeotrópica, que se evapora a temperatura y composición constantes, lo cual no permite la separación del etanol. Para retirar el agua restante, la mezcla se hace pasar por una columna de adsorción.

En este caso, los resultados de la simulación, muestran como los costos de producción están constituidos principalmente por el precio de compra de las melazas (~ 72%) y por el costo de generación del vapor (~ 26%). Esto indica que el proceso debe mejorarse concretamente en la etapa de separación y purificación y en la utilización de la materia prima. Esto último lleva a plantear otra alternativa para disminuir los costos de producción como lo es el uso del bagazo de caña, que es un recurso renovable, más económico y en el cual está basado el proceso de producción de etanol, con el cual se realizó la segunda evaluación económica.

El bagazo de caña está compuesto principalmente por polímeros de azúcares que mediante una reacción de hidrólisis liberan los monosacáridos que serán transformados a etanol en el fermentador a condiciones anaerobias. Después de la hidrólisis, los azúcares presentes son la arabinosa (~3.1%), la glucosa (~37.5%) y la xilosa (~23.2%). Normalmente las levaduras y las bacterias consumen fácilmente los dos primeros azúcares, y no la xilosa. Por lo tanto, esta alternativa requiere de etapas adicionales para la producción de etanol: una hidrólisis del bagazo, una hidrólisis de la celulosa, una etapa de fermentación para metabolizar la glucosa y la arabinosa y una etapa adicional para el consumo de la xilosa.

En este caso, se supone que se tendrán dos microorganismos: uno para la generación de celulasas y otro para la fermentación de los monosacáridos. Este último, tiene la característica de que puede degradar tanto pentosas como hexosas. Los resultados de la simulación indican que los principales costos de producción se deben a la materia prima (~30%) constituida principalmente por el bagazo y a los de servicios como el vapor y la energía eléctrica (~68%). Los requerimientos del vapor se dan también principalmente en las etapas de destilación, mientras que la energía eléctrica se consume principalmente en la etapa de producción de las celulasas. En esta etapa, las enzimas se obtienen al hacer crecer un hongo en condiciones aerobias. Esto hace que se tengan altos requerimientos de agitación, lo que a su vez se traduce en altos consumos de energía.

Es indudable que los esfuerzos de investigación y desarrollo se deben dirigir hacia un mejor y más fácil uso de la materia prima, o en la producción de celulasas por otros microorganismos que no requieran demasiada energía para la homogeneización y la buena transferencia de masa, pero con una muy buena productividad. Otra alternativa es la de obtener un microorganismo capaz de hidrolizar la celulosa, de metabolizar hexosas y pentosas y de producir etanol.

Con las tecnologías evaluadas, una planta para producir los 253.4 millones de litros de etanol anuales a partir de melazas requiere de un inversión del orden de los 102 millones de dólares, mientras que para la planta a partir de bagazo es del orden de 250 millones de dólares. Los costos de producción son de US\$0.26 y de US\$0.34 por kg de etanol respectivamente. En la siguiente tabla se presenta la comparación de diferentes parámetros que caracterizan los resultados de la evaluación económica.

Parámetro	A partir de:	
	Melazas	Bagazo de caña
Producción (l/año)	253.4 X10 <sup>6</sup>	253.4X10 <sup>6</sup>
Inversión total (US\$)	102,468,237	244,734,000
Inversión/L de etanol (US\$/l)	0.41	0.97
Requerimientos de materia prima (ton/año)	1,002,441	748,366
Costo de materia prima (US\$/ton)	40	10
Costo de producción (US\$/l)	0.26	0.34

Tabla 4-5: Costos de inversión de plantas de producción de etanol a partir del bagazo y la melaza de caña. Fuente No. 174

#### **4.2. PLANTA DE SALAMANCA, ESPAÑA**

Esta planta para la obtención de etanol emplea como materia prima el trigo y la cebada. Los principales datos del proyecto se presentan a continuación:

- Ubicación: Babilafuente, Salamanca
- Inversión: 162 millones de dólares (2003)
- Materia prima: 585,000 toneladas de cereal (cebada, trigo) y 60,500 toneladas de lignocelulosa
- Producción anual: 200,000,000 l de etanol
- Ventas anuales esperadas: 156 millones de dólares
- Puestos de trabajo directos: 103
- Puestos de trabajo indirectos: 700
- Puestos de trabajo en el campo: 2,400

#### **Ventajas del proyecto**

##### **Económicas**

- Incremento de la actividad agrícola y forestal
- Reducción de la dependencia energética exterior en unas 120,000 TEP/año
- Reducción del déficit de la balanza de pagos y fomento de actividad industrial
- Creación de mayor valor añadido a los productos agrícolas

##### **Medioambientales**

- Disminución de las emisiones netas de CO<sub>2</sub> en 230,000 toneladas/año
- Reducción de las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos inquemados, azufre y benceno
- Mejora de la biodegradabilidad de las gasolinas
- Reducción de la erosión y disminución de los incendios forestales
- Permite la utilización y valoración de lo que hasta ahora eran residuos

##### **Sociales y tecnológicas**

- Creación de más de 3,000 puestos de trabajo.
- Creación de know-how en el tratamiento de la Biomasa
- Posibilidades de exportación de esta tecnología a terceros países



Figura 4-1: Planta Cartagena (Murcia, España). Fuente No. 95  
Materia prima: 300.000 ton de cereal (cebada, trigo)  
Producción anual: Etanol 100 millones de litros de etanol

Cabe destacar que el fabricante de este tipo de tecnología es la sociedad Abengoa Bioenergía para operar y desarrollar la actividad de negocio de biocombustibles a escala internacional. Otras plantas puestas en marcha por esta sociedad son la planta de Cartagena (España), planta Teixero (España), planta York (Nebraska, USA), planta Colwich (Kansas, USA), y planta Portales (New Mexico, USA). Las fotografías de estas plantas se muestran a continuación.



Figura 4-2: Planta Teixero (La Coruña, España)  
 Materia prima: 337.000 ton de cereal (cebada, trigo)  
 Producción anual: 126 millones de litros de etanol



Figura 4-3: Planta York (Nebraska, USA)  
 Materia prima: 482.600 ton de cereal (maíz)  
 Producción anual: 190 millones de litros de etanol



Figura 4-4: Colwich (Kansas, USA)  
 Materia prima: 190.500 ton de cereal (maíz)  
 Producción anual: 75 millones litros de etanol  
 (Fuente No. 95)



Figura 4-5: Portales (New Mexico, USA)  
 Materia prima: 148.500 ton de cereal (maíz)  
 Producción anual: 60 millones litros de etanol  
 (Fuente No. 95)

### **4.3. PLANTA DE MOMOTOMBO, NICARAGUA**

El proyecto tiene como objetivo la obtención de levadura, anhídrido carbónico y alcohol mediante proceso de fermentación, destilación y licuación de la melaza de caña para lograr un mayor valor agregado local, ya que en la actualidad casi toda la melaza se exporta en bruto.

El proceso de fabricación en sí consta de dos etapas:

- a) Desazucaramiento de la melaza para reducir el 50% de azúcar de la misma.
- b) Fermentación de la melaza, la cual produce lo siguiente: alcohol etílico de 100°, anhídrido carbónico, levadura para pan (*saccharomyces*), y vinaza.

En este proceso se puede regular la producción de alcohol y levadura aumentando una a expensas de la otra, entre un máximo de 48 kilos de alcohol por 100 de azúcar fermentable y 1.32 kilos de levadura, a un máximo de 50 kilos de levadura seca por 100 kilos de azúcar fermentable.

La disponibilidad de la melaza es relativamente amplia. El nivel de exportación ha superado las 40,000 toneladas anuales y tiende a aumentar junto a la producción de azúcar, de la cual es su principal subproducto. Algunos estudios realizados recientemente indican que el precio puede mantenerse a largo plazo por debajo de los US\$30 por cada tonelada.

Con un nivel de procesamiento de 20,000 toneladas por año de melaza se estima que podrían venderse las siguientes cantidades:

- 1,100 toneladas/año de levadura para el pan, a US\$0.108 el kg con destino al Mercado Común Centroamericano.
- 2,200 toneladas/año de anhídrido carbónico, a US\$0.025 el kg, con destino al mercado interno y al Mercado Común Centroamericano.
- 4,100,000 litros/año de alcohol etílico a US\$0.8 el litro.
- 41,000,000 de litros/año de vinaza.

El proyecto requiere una inversión de 1,120,000 dólares; genera 80 empleos, a razón de 14,000 dólares invertidos por trabajador. El costo total anual de producción alcanza a 1,017,200 dólares, o sea a 51 dólares por tonelada de melaza procesada. Los ingresos se estiman en 1,179,200 dólares, o sea 59 dólares por tonelada procesada de melaza, correspondiente 28% a las ventas de alcohol etílico, 49% a las ventas de levadura y 23% a las de anhídrido carbónico.

## 5. OTRAS TECNOLOGÍAS (plantas para la obtención de biodiesel)

Existen otros tipos de tecnologías empleadas para la obtención de productos cuyo valor energético y comercial puede ser importante. Estas tecnologías corresponden a plantas para la producción de biodiesel, siendo las más importantes las que emplean los aceites vegetales como el girasol y la soja; en el proceso de obtención las semillas son prensadas mecánicamente para extraer el aceite y puede emplearse solventes para aumentar el rendimiento. En el caso de la soja, el aceite es separado sólo por acción de solventes. Estos aceites permiten reemplazar al gas-oil en los motores de combustión interna, de ahí su importancia energética. También es posible producir combustible para motores diesel por trans-esterificación de los aceites vegetales formando lo que se ha llamado biodiesel.

### DESCRIPCIÓN GENERAL

La tecnología para la producción de biocarburantes parte de las variedades comunes de biomasa (madera, paja de cereales, oleaginosas, cereales, caña de azúcar, remolacha, semilla y frutos oleaginosos, así como de biomasa de origen animal). Según muestra el diagrama siguiente, dependiendo de la fuente de biomasa, se debe elegir el tipo de tecnología que transformará la materia prima en productos energéticos con valor agregado para el mercado: metanol, MTBE, TAME, etanol, ETBE, aceites vegetales y ésteres metílicos o etílicos (biodiesel). Los productos finales pueden emplearse en motores Otto sin modificaciones, motores diesel de inyección directa o modificada, en motores diesel sin modificaciones o en calefacciones.

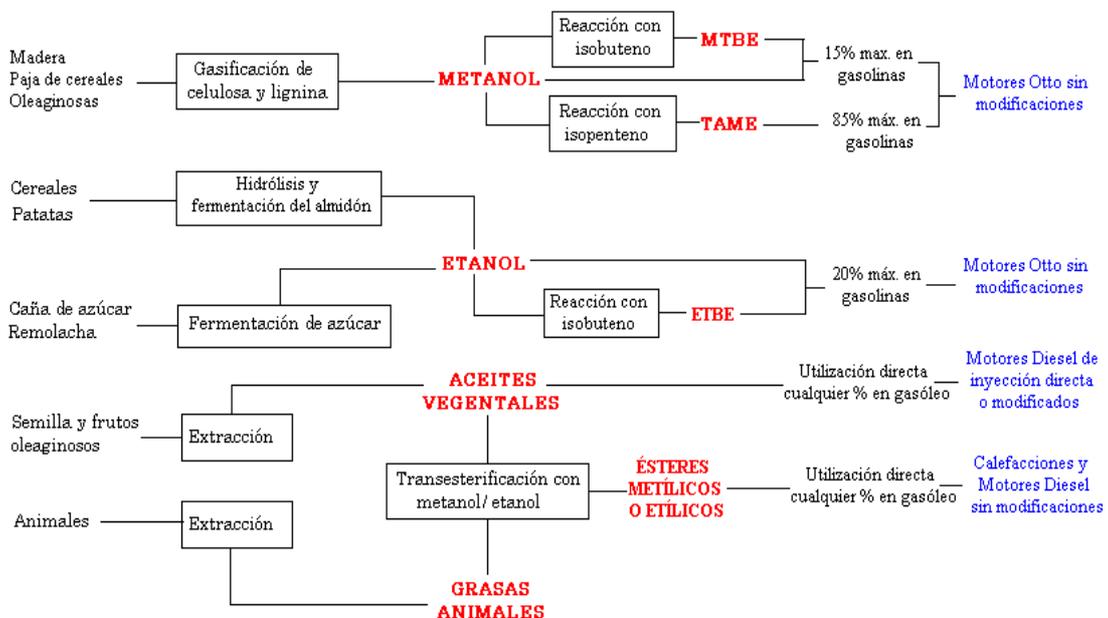


Figura 5-1: Tipos de tecnología para la obtención de biocombustibles

## Sectores socioeconómicos beneficiados con la producción de biocarburantes

- Agrícola: Siembra y recogida
- Industrias aceiteras: Producción de aceite
- Ganadero e industrias de producción de grasas animales: Producción de grasa animal
- Hostelero: Salida a la producción de residuos compuestos por aceites y grasas
- Industria química: Trans-esterificación
- Empresas petroleras: Mezclado con gasóleo y distribución del biodiesel
- Cooperativas agrícolas: Uso de biodiesel y etanol
- Administraciones locales: Flotas de autobuses, taxis, calefacciones, entre otros.

## TIPO DE TECNOLOGÍA

La tecnología para la producción de biodiesel parte de las variedades comunes de especies convencionales como el girasol y la soja, con alta riqueza en grasa y unos métodos de producción adaptados al medio rural tradicional.

A partir de estas materias primas se consigue el biodiesel, siguiendo un proceso que incluye operaciones de extracción y refino seguido de un proceso de esterificación, con el que se consigue un combustible utilizado en motores convencionales y glicerina como subproducto.

Uno de los procesos de producción de biodiesel más empleados es el que emplea el aceite de girasol como materia prima; el cual se muestra esquemáticamente en la figura 5-2.

<b>Corriente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Aceite vegetal (kg)	21.23						
Metanol (kg)	4.33	1.60	1.94	trazas	1.50		
KOH (kg)	0.30		0.12				
Biodiesel (kg)		19.09	0.01	19.05	0.04		0.01
Glicerina (kg)			2.02				2.03
Ácidos grasos (kg)	0.14	0.02		0.02			0.83
Aceites (kg)		0.28		0.28			
Jabón (kg)		0.01	0.90		0.01		
Agua (kg)			0.01	trazas	8.62	0.22	0.34
Fosfatos (kg)							0.65
Ácido fosfórico (kg)						0.50	
<b>Total</b>	<b>26.00</b>	<b>21.00</b>	<b>5.00</b>	<b>19.35</b>	<b>10.17</b>	<b>0.72</b>	<b>3.86</b>

Tabla 5-1: Balance de materia para un proceso industrial de obtención de biodiesel. Laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados.

Fuente No. 129: Universidad complutense de Madrid

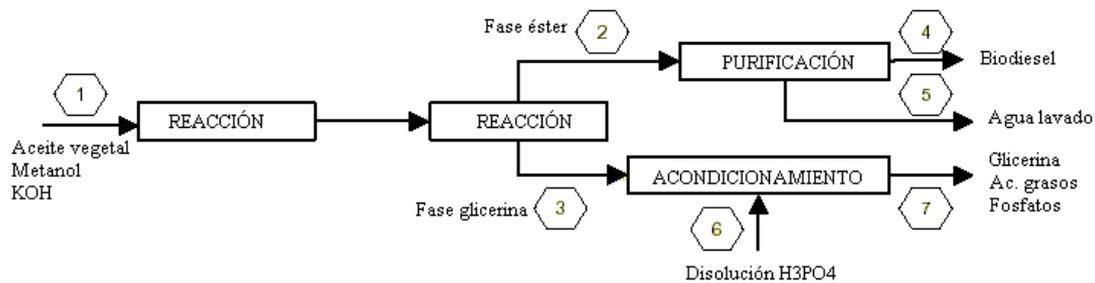


Figura 5-2: Proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal.

Fuente No. 169

### Preparación casera de un litro de biodiesel

La forma de hacer un litro de biodiesel es la siguiente:

Materia prima: Aceite de soja comercial 500 cm<sup>3</sup> (puede ser cualquier otro, pero este es más económico)

Reactivos: 100 cm<sup>3</sup> de metanol y 1.7 gramos de soda cáustica (NaOH)

Técnica: Calentar el aceite a 30 grados centígrados y agregarle lentamente y removiendo, la mezcla de metanol/ soda cáustica. Elevar la temperatura a 50 grados y remover durante una hora. Dejar reposar para el fondo del recipiente se deposite la glicerina. Filtrar y separar el diodiesel, lo que es sencillo pues la glicerina es más pesada. Mezclar con agua, decantar y separar. El agua tiene por objeto arrastrar las impurezas, tras lo cual queda listo para usar. Si cree que este último pasa es difícil puede obviarlo, pero la calidad del combustible no es la óptima.

### PRODUCTO OBTENIDO

El producto obtenido bajo este proceso de transformación es el biodiesel. A diferencia del etanol, que es un alcohol, el biodiesel es un éster que puede producirse a partir de diferentes tipos de aceites tales como los de soja, girasol y grasas vegetales o animales. Se encuentra registrado como combustible y como aditivo para combustibles en la Agencia de Protección del Medio Ambiente (Environment Protection Agency, EPA, EEUU).

A través de un proceso denominado transesterificación, los aceites orgánicos derivados son combinados con alcohol (etanol o metanol) y alterados químicamente para formar ésteres grasos tales como el éster etílico o el éster metílico.

El biodiesel puede usarse como combustible puro al 100 % (B100), como una base de mezcla para el gasoil de petróleo (B20), o en una proporción baja como aditivo del 1 al 5 %. De esta forma el biodiesel se complementa y no compite con el petróleo. El biodiesel puro y mezclado se usa en motores de ignición y compresión de embarcaciones, naves turísticas y lanchas.

Existe creciente interés en utilizar biodiesel donde los trabajadores son expuestos a gases de escape de diesel, en aeronaves para controlar la polución, en el área de los aeropuertos y en locomotoras que enfrentan restricciones en su uso. En las siguientes fotografías se simplifican algunas de las aplicaciones que se le llegan a dar al biodiesel.



Figura 5-3: Aplicaciones del biodiesel

A continuación se describen algunas de las propiedades más importantes:

Propiedad	Unidad	Especificaciones
<b>Propiedades como combustible</b>		
Densidad a 15°C	g/cm <sup>3</sup>	0.86-0.90
Viscosidad Cinemática 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	3.5-5.0
Punto de Inflamación	°C	>101
Punto de obstrucción del filtro Frio (POFF)	°C verano °C invierno	máx. 0 máx. <-15
Azufre	mg/kg	máx. 10
Residuo Carbonoso Conradson (10 % residuo destilación)	% p/p	máx. 0.30
Índice de Cetano	-	mín. 51
Contenido en Cenizas	% p/p	máx. 0.02
Contenido en Agua	mg/kg	máx. 500
Partículas Sólidas	g/m <sup>3</sup>	máx. 20
Corrosión al Cobre (3h/50 °C)	-	máx. 1
Estabilidad a la Oxidación (110 °C)	horas	6
<b>Propiedades como éster</b>		
Índice de Acidez	mg KOH/g	máx. 0.5
Contenido en Metanol	% p/p	máx. 0.2
Contenido en Monoglicéridos	% p/p	máx. 0.8
Contenido en Diglicéridos	% p/p	máx. 0.2
Contenido en Triglicéridos	% p/p	máx. 0.2
Glicerina total	% p/p	máx. 0.25
Índice de yodo	-	máx. 120
Metales Alcalinos (Na + K)	mg/kg	máx. 5
Fósforo	mg/kg	máx. 10

Tabla 5-2: Especificaciones del biodiesel obtenido en la Unión Europea.

Fuente No. 129

Comparando las propiedades entre el biodiesel y el gasoil se observa lo siguiente:

<b>Propiedad</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>Gasoil</b>
Punto de inflamación (°C)	Superior a 149	52
Azufre máximo (%)	0.04	0.05
Número de octano	50	42
Aromáticos	mucho menor	
Oxígeno	mucho mayor	
Punto de fluidificación (°C)	0	- 20.5
Biodegradabilidad (%)	38	26
Lubricidad (BOCLE, gramos)	5,000	4,000

Tabla 5-3: Comparación del biodiesel y del gasoil. Fuente No. 169

Como puede observarse el biodiesel presenta muchos atributos técnicos que lo hacen mejor que el gasoil, como son no contener azufre, no contiene aromáticos, presenta puntos de inflamación superior a 149 °C, no es tóxico y es biodegradable.

#### **Ventajas del uso del biodiesel**

1. Competitivo frente a otras tecnologías que reducen la contaminación
2. Rendimiento similar al del combustible diesel
3. No requiere nueva infraestructura ni adiestramiento  
No es necesario cambiar o convertir motores. En EEUU más de 100 demostraciones para demostrarlo recorrieron diez millones de millas con mezclas de biodiesel. No se encontraron problemas en los motores, se redujo el humo y las emanaciones de escape fueron inofensivas.
4. No altera el equipo de mantenimiento
5. No altera el tiempo de recarga de combustibles
6. Mejora notablemente la lubricación en el circuito y en la bomba de inyección.  
El B20 muestra mejora en lubricidad, bajando los niveles de sulfuros y aromáticos contenidos en el gasoil. El poder de arranque y el comportamiento ante bajas temperaturas son similares al diesel. No modifica el torque, potencia o consumo.
7. No requiere un almacenaje especial. De hecho estando puro o en mezcla puede ser almacenado igual que el gasoil, excepto en tanques de concreto. Las mezclas almacenadas no son tóxicas, y no forman mezclas explosivas con el aire.
8. El biodiesel es más seguro que el diesel de petróleo. El punto de inflamación del biodiesel en su forma pura es de más de 147 grados Celsius contra unos 51° Celsius del diesel común tipo 2; por lo que mejora las condiciones antiexplosión e incendio
9. La mezcla se puede hacer en el momento de carga o previamente
10. La mezcla es estable y no se separa en fases
11. Sus emanaciones son menos ofensivas, por lo tanto, es mas beneficioso su uso en lugares confinados. Su olor es comparable con el de las papas fritas y los operadores no demuestran irritación ocular.

12. Desde que el biodiesel fue oxigenado, los motores tienen una combustión más completa que con gasoil.
13. El biodiesel es fácilmente biodegradable, las pruebas realizadas por la Universidad de Idaho, mostraron que la degradación en una solución acuosa fue del 95 % después de 28 días (el mismo rango del azúcar). En el mismo lapso de tiempo el gasoil se degradó el 40 %.
14. La producción de biocarburantes supone una alternativa de uso del suelo que evita los fenómenos de erosión y desertificación a los que pueden quedar expuestas aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores.
15. Los impactos ambientales son menores, ya que reduce en los escapes la fracción de carbono en partículas, reduce la cantidad de monóxido de carbono, reduce la cantidad de hidrocarburos no quemados, reduce la emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos, reduce la cantidad de óxidos de azufre, además los motores diesel ofrecen un beneficio neto de 45 a 71 % menos de emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con la gasolina.
16. El Biodiesel puro o en mezclas reduce significativamente las emisiones de partículas en suspensión, de las cuales se sospecha pueden ser cancerígenas. En mezclas al 20 % (B20) y con uso de convertidores catalíticos, las PM han demostrado una caída del 17.2 % y el monóxido de carbono y los hidrocarburos no quemados una reducción del 9.8 %. Asimismo hay una reducción en las emisiones sulfurosas y aromáticas. Supone un ahorro de entre un 25% a un 80% de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los combustibles derivados del petróleo, constituyendo así un elemento importante para disminuir los gases invernadero producidos por el transporte. La emisión de azufrados se reduce en un 20%, el humo visible en el arranque se reduce en un 30%, además de que se disminuye significativamente el olor y se elimina la irritabilidad en piel y ojos.

## **COSTOS DE LA TECNOLOGÍA**

Para investigar los costos de la tecnología, a continuación se muestran tres aplicaciones; dos sobre plantas de producción de biodiesel y uno sobre el panorama mundial en la producción de este energético.

### **5.1. PLANTAS A BASE DE ACEITE DE GIRASOL**

Las inversiones para la instalación de plantas de biodiesel dependen considerablemente del tipo de tecnología a utilizar, ya que esto influye en el grado de pureza del biodiesel y de los subproductos obtenidos. A continuación se describen el orden de la magnitud de las inversiones en función de la capacidad del proceso de la planta.

▪ **Costos de inversión**

Tipo de planta	Capacidad de transformación	Inversión
Semi-industrial	3,300 ton/año	US\$ 290,000
Industrial bajo costo	22,000 ton/año Obteniéndose residuos de bajo costo	US\$ 1,450,000
Industrial	22,000 ton/año Obteniéndose residuos de alto costo	US\$5,510,000

Tabla 5-4: Costos de inversión de una planta de biodiesel a partir del aceite de girasol, 2000. Fuente No. 169.

▪ **Costos de operación**

Los costos de operación para una planta semi-industrial (para transformar 3,300 ton/año de materia prima) se puede estimar en US\$ 446,600/año, desglosadas de la siguiente forma:

Concepto	Costo (US\$/ton biodiesel)
Costo de extracción	40.16
Costo de refinó	12.85
Costo de esterificación	82.94

Tabla 5-5: Costos de operación de una planta de biodiesel a partir del aceite de girasol, 2000. Fuente No. 169.

▪ **Costos de producción de biodiesel**

El costo del biodiesel depende del precio de mercado de los aceites vegetales. En general el B20, mezcla al 20 % eleva el precio del combustible entre 6 y 8 centavos de dólar por galón. En Argentina estando hoy el precio del gasoil en US\$0.50/l, una mezcla B20 estaría entre los US\$0.52 y US\$0.57/l.

No obstante su costo mas elevado, se justifica en objetivos superadores que contemplan beneficios ambientales, desarrollos de nuevos mercados para la producción primaria y para la industria, posibilidades alternativas en combustibles de base renovable, desarrollo de nuevos circuitos económicos con su consiguiente generación de riqueza y ocupación de mano de obra.

**5.2. PLANTAS A BASE DE ACEITE DE SOJA**

Para determinar el costo de producción del biodiesel, se tomó como modelo el trabajo realizado en 1996 por el Instituto de Economía y Sociología Rural del INTA junto con ASA (American Soybean Association), convenio para estudios de factibilidad técnica y económica para su desarrollo.

El modelo de la planta es para una industria que tiene una capacidad de molienda de 500 ton por día de soja y que dedica la totalidad del aceite producido a la fabricación de biodiesel. Esto significa una molienda anual de 182,500 ton para una producción de aceite de 33,000 ton.

El costo de inversión inicial para montar la planta, se calcula en US\$ 6,000,000 para lo que se infiere un préstamo bancario con amortización anual a 10 años y un interés del 15 % anual directo. Los impuestos se calculan en base a tributos provinciales como el inmobiliario (1 % sobre valor) e ingresos brutos (1 % sobre ventas), y los nacionales como activos o renta presunta (1 % sobre valor activos) e impuesto a las ganancias (35 % sobre ganancias netas). No se computa el cálculo del IVA por que se considera que es de efecto neutro, a pesar de algún costo financiero que provenga de la posible demora en la recuperación de los créditos fiscales.

En el cálculo de los costos operativos se computan las necesidades de insumos para la producción del biodiesel. De alcohol metílico son necesarios 3,546,000 litros y 49,500 kg de catalizador.

El costo de la energía eléctrica y para la generación de 16,500 ton de vapor, más grandes volúmenes de agua refrigerante son tomados en cuenta, igualmente que el personal en relación de dependencia con su correspondiente costo laboral.

Para el mantenimiento de la planta se calcula el 2.3 % sobre el capital invertido, y para seguros el 1.5 %. El costo financiero sobre el capital de trabajo se calcula con una tasa del 18 % anual.

Finalmente se toma el aceite al precio de mercado que es actualmente de 360 US\$/ton, porque no necesariamente la planta de producción de biodiesel requiere invertir en otra de molienda de soja, sino que es complementaria de aquella.

Las ventas de subproductos de una planta como la descrita en este modelo, consisten en 3,399,000 litro de glicerina, 429,000 kg de ácidos grasos y 33,000,000 litros de biodiesel.

El costo neto adjudicado al éster de soja, luego de descontar los ingresos provenientes por las ventas de los otros subproductos, es de US\$ 0.42/l, y se calcula un margen de ganancia por la venta del biodiesel del 20 %, por lo que el precio de venta a la salida de planta sería de \$US 0.50/l.

Con estos supuestos el monto de las ventas anuales serían de US\$ 22,824,000 y los costos de US\$20,153,000, por lo que la renta sería de US\$ 2,671,000 al año. Un resumen de los conceptos anteriores se detalla a continuación:

<b>Concepto</b>	<b>Costo (cvs de dólar/l)</b>
Precio a la salida de planta	50.00
Impuesto ingresos brutos (2.5 a 3 %)	1.50
IVA (21 %)	10.00
Impuesto a los combustibles	12.00
Flete	6.00
Margen comercial estaciones de expendio	6.00
<b>Precio de venta B 100 con impuestos</b>	<b>85.50</b>

Tabla 5-6: Costo del biodiesel B100 con impuestos a base de metilo de soja, 2000. Fuente No. 130

<b>Concepto</b>	<b>Costo (cvs de dólar/l)</b>
80 % de gasoil de 50 cvs/l	40.00
20 % de metilo de soja de 855 cvs/l	17.10
<b>Total B20 con carga tributaria</b>	<b>57.10</b>

Tabla 5-7: Costo del biodiesel B20 con carga tributaria a base de metilo de soja, 2000. Fuente No. 130

Se realizó un cuadro comparativo de los diferentes precios del biodiesel con el precio del gasoil. Para cuantificar los mayores costos que insumiría en las diferentes actividades y sectores el uso del biodiesel, se hace un análisis tomando las alternativas para el uso en estado puro o en mezcla al 20 % y con carga tributaria similar al gasoil o sin ella.

Tomando el actual precio del gasoil a US\$0.50/l y teniendo en cuenta que según los cálculos efectuados en el capítulo correspondiente, el precio del biodiesel sin carga tributaria es de US\$0.524 cvs/l, esto significa un mayor costo de 24 US\$/m<sup>3</sup>. El B20 con carga tributaria se calcula en US\$0.571/l por lo que en este caso el costo adicional es de 71 US\$/m<sup>3</sup>. En caso de usarlo puro, los mayores costos ascienden a 120 US\$/m<sup>3</sup> en caso de no tener impuestos y a 355 US\$/m<sup>3</sup> con impuestos.

<b>Producto</b>	<b>Precio Gasoil US\$/l</b>	<b>Precio Biodiesel US\$/l</b>	<b>Diferencia US\$/l</b>	<b>Precio US\$/m<sup>3</sup></b>
B20 sin impuestos	0.500	0.524	-0.024	24
B20 con impuestos	0.500	0.571	-0.071	71
B100 sin impuestos	0.500	0.620	-0.120	120
B100 con impuestos	0.500	0.855	-0.355	355

Tabla 5-8: Comparación de precios entre el biodiesel y el gasoil, 2000 (Fuente No. 2)

### **Impacto económico con la instalación de una planta de biodiesel**

1. Aparición de un nuevo mercado
2. Valor agregado al material de base (semillas de aceite)
3. Inversiones en plantas y equipos
4. Mayor cantidad de empleos
5. Mayor base tributaria por las operaciones de planta e impuestos de utilidades