

45



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

Facultad de Ingeniería Química

FEB 2015

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



1119  
May  
04/02/2015  
10.30 hr.

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN GASIFICADOR DE LECHO  
FIJO PARA LA PRODUCCION DE GAS DE SINTESIS"**

**AUTOR: Luis Carrasco Venegas**

*Periodo de ejecución: 01/03/2013-28/02/2015*

*Resolución Rectoral: N°284-2013-R, 25-MAR.-2013*

**CALLAO, 2015**

## INDICE

<b>I.</b>	<b>INDICE</b>	01
<b>II.</b>	<b>RESUMEN</b>	03
<b>III.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	04
<b>IV.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	06
	4.1 Antecedentes	06
	4.2 La biomasa	07
	4.3 Tipos de biomasa	09
	4.3.1 Cultivos energéticos	10
	4.3.2 Biomasa de los residuos	11
	4.4 Características de la biomasa	14
	4.5 Procesos de conversión	18
	4.5.1 Conversión directa	18
	4.5.2 Procesos termoquímicos	19
	4.5.3 Procesos bioquímicos	21
	4.5.4 Procesos químicos	22
	4.6 Gasificación de la biomasa	24
	4.6.1 Agente gasificante	27
	4.6.2 Termoquímica de la gasificación	29
	4.6.3 Etapas del proceso de gasificación	31
	4.6.4 Tipos de gasificadores	38
	4.6.5 Lecho fijo	40
	4.6.6 Lecho fluidizado	45
	4.6.7 Lecho arrastrado	47
	4.7 Aplicaciones del proceso de gasificación	49
<b>V.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	51
	5.1 Materiales	51
	5.2 Métodos	51

<b>VI. RESULTADOS</b>	<b>52</b>
6.1 Desarrollo de planos	52
6.2 Construcción del gasificador	53
6.3 Pruebas de gasificación	54
<b>VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>55</b>
7.1 Revisión bibliográfica	55
7.2 Desarrollo de planos	55
7.3 Construcción del gasificador	55
7.4 Pruebas básicas de la gasificación	56
<b>VIII. REFERENCIALES</b>	<b>57</b>
<b>IX. APÉNDICE</b>	<b>59</b>
<b>X. ANEXOS</b>	<b>65</b>

## II.- RESUMEN

Se presenta una revisión bibliográfica sobre la biomasa y sus principales usos, principalmente como combustible para el proceso de gasificación; para lograr obtener dicho combustible, se ha diseñado un gasificador de lecho fijo tipo cross-draft (gasificador de flujo cruzado), con flujo natural de aire; es decir que el ingreso de aire es regulado mediante una válvula en la zona de succión. El gasificador antes indicado tiene las siguientes partes:

*Cámara de combustible*, donde se suministra la biomasa acondicionada (previamente secada y densificada, con una capacidad aproximada de 80 Kg/h; *cámara de ingreso de aire*, que es regulada a través de un mecanismo de apertura y cierre de dicha cámara; *cámara de combustión primaria*, donde se realiza los procesos de pirolisis, oxidación y reducción en forma simultánea, produciéndose el gas de síntesis; *cámara de combustión secundaria*, donde se realiza la combustión del gas de síntesis, pues la aplicación inmediata, es la utilización del gas de síntesis como combustible para la generación de calor, en lo que podría denominarse "cocinas mejoradas"

En la construcción del gasificador, se ha utilizado ángulos y planchas de hierro gris, fierro de construcción, ladrillo refractario, entre otros. Finalmente se obtuvo un prototipo de un gasificador de flujo cruzado con flujo natural de aire y fue acondicionada para ser usada como cocina para la cocción de alimentos.

### III. INTRODUCCION

En la actualidad, el calentamiento global, como consecuencia del uso de combustibles fósiles está causando una serie de estragos en el planeta, desde inundaciones, sequías, desaparición de especies, refugiados ambientales, etc.

Una alternativa al uso de estos combustibles fósiles, es la sustitución de estos combustibles por los denominados energías renovables, dentro de las cuales destaca la *biomasa residual* proveniente de diversas fuentes, tales como la tala de árboles, residuos de jardinería, residuos agrícolas, papel, cartón, restos de comida, y en general cualquier materia orgánica.

Para la mayoría de la población mundial, las formas más familiares de energía renovable son las que provienen del sol y del viento. Sin embargo existen otras fuentes de energía como la biomasa, por ejemplo, la leña, carbón de leño, cascarilla de arroz, que proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencial para suplir mayores volúmenes.

La biomasa es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego. Desde la prehistoria, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto, en hornos y cocinas artesanales e, incluso, en calderas; convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

Los métodos principales de obtención de energía a partir de la biomasa se realizan mediante dos procesos principales: Por métodos biológicos (por descomposición anaerobia de la materia orgánica) y por métodos térmicos como son la combustión y la gasificación. Los métodos biológicos tienen dos grandes limitaciones: proceso demasiado lento y solo una fracción es transformada en producto valioso; sin embargo los métodos térmicos, dentro de ellos el de la gasificación es bastante rápida, del orden de minutos, y a su vez, descompone totalmente la biomasa en gas de síntesis y residuos inertes como son las cenizas.

Desde esta perspectiva la gasificación se ha convertido en un alternativa limpia ya que convierte un combustible líquido o sólido (carbón, biomasa, basura, residuos sólidos, licores de algunos procesos) en gas haciendo reaccionar estos materiales con cantidades controladas de un gasificante (aire u oxígeno y vapor de agua a altas temperaturas). Además de utilizar tecnologías de limpieza de gases para mejorar las emisiones hacia el medio ambiente de acuerdo a las normativas mundiales. (*FORCER, 2002*).

Considerando lo antes expuesto, se ha propuesto este trabajo, con la finalidad de producir gas de síntesis (mezcla de monóxido de hidrogeno, hidrogeno y dióxido de carbono), para lo cual se diseñó y construyó un gasificador de lecho fijo de flujo cruzado (cross draft), con ingreso natural de aire. Con este gasificador diseñado y construido, se ha producido gas de síntesis a partir de restos de madera y su posterior combustión, que permitió su uso como una cocina mejorada.

## IV.- MARCO TEORICO

### 4.1 ANTECEDENTES

La historia de la gasificación nos remonta al siglo XVIII donde Murdoch, un ingeniero escocés, el cual pirolizó carbón en una retorta de hierro para producir gas que luego utilizó para iluminar su casa. Luego de esto Murdoch construye una planta de gas para James Watt para iluminar una de sus fundidoras.

La primera compañía de gas producido por la pirolisis del carbón fue fundada en 1812 en Londres bajo el nombre de "London Gas, Light and Coke Company", y fue usada para iluminar el puente de Westminster.

En 1816 nace en los Estados Unidos, en la ciudad de Baltimore la primera planta de fabricación de gas de síntesis para iluminar las calles de esta. Diez años después en 1826 fueron construidas más plantas de gas para iluminar las calles de Boston y Nueva York (Espinoza, J. 2011).

Al final de los años 1920 ya existían más de 1200 plantas de producción de gas en Los Estados Unidos, pero su uso se obligaba a un consumo cercano a su fuente de producción por los limitantes de almacenamiento, de transporte del gas y bajo poder calorífico. Para esta fecha las productoras de químicos se empezaron a interesar más por el proceso de gasificación, ya que se pudieron obtener gas de síntesis con cantidades iguales de hidrógeno y monóxido de carbono las cuales podían sintetizar en amoníaco y metanol. (Espinoza, J. 2011).

En la segunda guerra mundial, el interés por el gas de síntesis declinó, al encontrar grandes reservas de gas natural a un bajo costo, el cual posee un poder calorífico mayor a este (unos 37 MJ/m<sup>3</sup>).

Solo en la década de 1950 se desarrolló en Sudáfrica con SASOL se desarrolló un gasificador tipo Fischer-Tropsch, que luego se convertiría con su expansión veinte años más tarde en el más grande centro de gasificación del mundo.

También en esta década Texaco (más tarde GE) y Shell desarrollarían sus procesos de gasificación del petróleo. (Espinoza, J. 2011).

En la década de 1970 con la crisis del petróleo, y con controversiales investigaciones las cuales afirmaban que las demandas de gas natural excederían las reservas al llegar la década de 1990, se volvió a mostrar interés en la tecnología de la gasificación.

En los últimos 15 a 20 años se ha observado un claro renacer de la tecnología de gasificación, esto provocado por diferentes razones, pero la primera y primordial es el dramático crecimiento del costo de la energía. El incremento del costo del petróleo en el periodo 1990 a 2004 se incrementó en un 100%, pasando de US\$20 a US\$40 el barril, pasando por un pico máximo en 2008 donde llegó a la dramática cifra de US\$140 (Word Press, 2008), lo mismo ha ocurrido con el Gas Natural.

#### **4.2 LA BIOMASA**

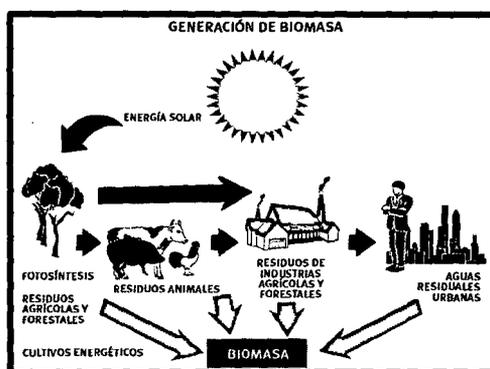
La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la "biomasa" como **"todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización"**. Entre estos últimos estarían el carbón, el petróleo y el gas, cuya formación y composición hace miles de años no es comparable con lo que llamamos **"el balance neutro de la biomasa"** en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el gas o el petróleo. (IDAE, 2007).

La **energía que contiene la biomasa es energía solar** almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO<sub>2</sub> presente en el aire) en compuestos orgánicos, que llamamos carbohidratos. De estos carbohidratos se puede extraer energía bien quemándolas directamente, bien convirtiéndolas en un líquido combustible como el alcohol o el aceite, o incluso transformándolas en gas.

Por tanto, la biomasa funciona como una especie de **batería que almacena la energía solar**, entonces, se produce en forma sostenida; es decir, en el mismo nivel en que se consume se produce y por consiguiente esa batería durará indefinidamente.

La biomasa vegetal, está conformada principalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina. En los Anexos 10.1, 10.2 y 10.3, se observa la estructura química de cada uno de estos constituyentes de la biomasa.

**Figura 4.1. Origen de la biomasa**



*Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007.*

### **Ventajas del uso de la biomasa**

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone unas ventajas medioambientales de primer orden (Energía de la Biomasa 2008), como son:

- Disminución de las emisiones de azufre.
- Disminución de las emisiones de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NO<sub>x</sub>.
- Ciclo neutro de CO<sub>2</sub>, sin contribución al efecto invernadero.
- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las casas.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).

- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.

***También existen algunas desventajas:***

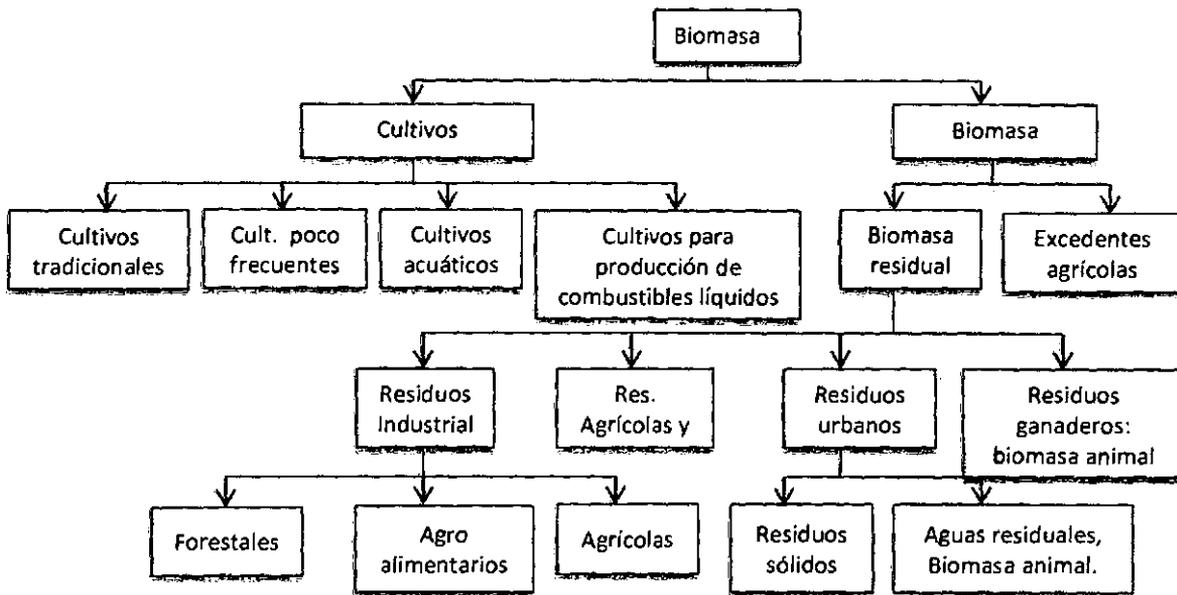
- Se corre el riesgo que por una falta de control, se lleven a cabo talas excesivas que agoten la masa vegetal de una zona.
- Rendimiento neto pequeño (3 kg de biocombustible equivalen a 1kg de gasolina).
- El alto grado de dispersión de la biomasa da lugar a que su aprovechamiento no resulte en ocasiones, económicamente rentable.
- Al emplearse cereales para producir biocombustibles, ha aumentado la demanda de éstos, con lo cual sube el precio de los alimentos, perjudicando principalmente a los países menos desarrollados. A este fenómeno se le denomina **crisis alimentaria**.

#### **4.3.- TIPOS DE BIOMASA**

La biomasa que podremos usar como fuente de energía se encuentra, principalmente, de dos formas: (*IDAE, 2007 y FORCER, 2002*).

- Como cultivos con un aprovechamiento claramente orientado a la producción de energía.
- Como un residuo de los trabajos forestales y agrícolas, o de sus industrias asociadas.

**Figura 4.2. Clasificación de los diferentes tipos de biomasa**



*Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central-FOCER, 2002*

### 4.3.1 CULTIVOS ENERGÉTICOS

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su periodo de cosecha varía entre los tres y los diez años. En la práctica, los cultivos energéticos se adaptan al clima y al suelo de cada lugar.

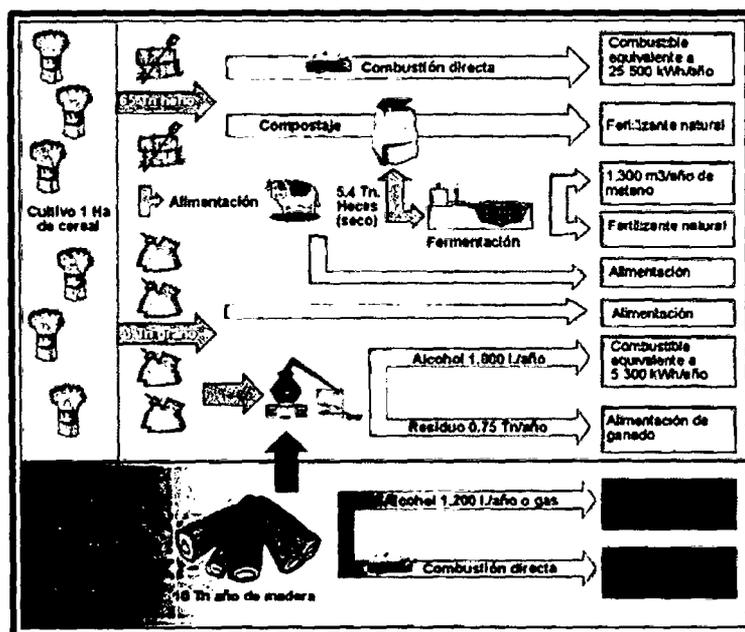
Así por ejemplo, en lugares como los países nórdicos hay bosques orientados a producir madera que se quema en centrales eléctricas, en otras zonas los cultivos energéticos se orientan a plantas herbáceas, por ejemplo, cereales y plantas oleaginosas como la palma de aceite, girasol o soya, que son cultivados de forma expresa con el objetivo de producir, respectivamente, alcohol o biodiesel.

Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos; además puede proveer otros beneficios a los agricultores. Una granja típica, usualmente, sólo genera uno o dos productos de

mayor valor comercial como maíz, café, leche o carne. El ingreso neto de ello es, a menudo, vulnerable a las fluctuaciones del mercado, al aumento del costo en los insumos, a las variaciones climáticas y a otros factores. Dado que las plantas de generación de energía requieren un suministro estable de combustible, los cultivos asociados a ellas pueden proveer un ingreso permanente a los granjeros que decidan diversificar su producción.

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

Figura 4.3. Aprovechamiento de los cultivos energéticos



Fuente: IDAE, Solarizate-Biomasa, 2007.

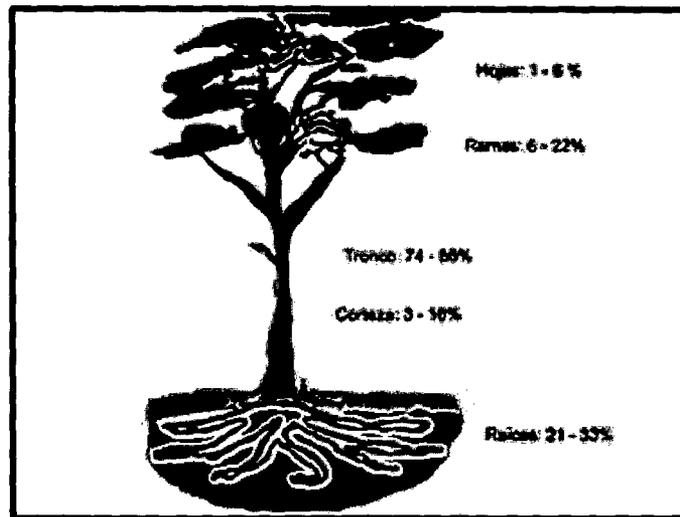
#### 4.3.2 BIOMASA DE LOS RESIDUOS

La mayoría de las plantas tienen un fin que no es el energético como por ejemplo alimentar el ganado o producir madera para los muebles. Pero de todos esos procesos siempre se genera un residuo que sí tiene un aprovechamiento energético.

*Residuos forestales:* Los residuos del aprovechamiento de nuestros bosques son una fuente muy importante de recursos de biomasa. Entre ellos se encuentran restos de las podas, serrín, virutas, recortes y cortezas, que se generan tanto en el campo como en las industrias donde se aprovecha la madera, que son las principales consumidoras de este recurso con fines energéticos.

Actualmente en Centroamérica esta biomasa es poco explotada, y se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor como se muestra en la figura 4, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

Figura 4.4. Distribución energética de un árbol



Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central- FOCER, 2002.

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

Son de muchos tipos, desde las podas de olivos, vides y frutales hasta los residuos de cultivos herbáceos, como la paja de cereales. Parte de estos residuos se queda en el campo, para recuperar los nutrientes de la tierra, pero otra parte puede ser

usada como combustible. Igual que en el caso anterior, dentro de este grupo se incluyen los residuos que se generan en las industrias que tratan los productos agrícolas, como el orujillo en el caso de la producción de aceite de oliva o las cáscaras de almendra en el caso de las industrias de frutos secos.

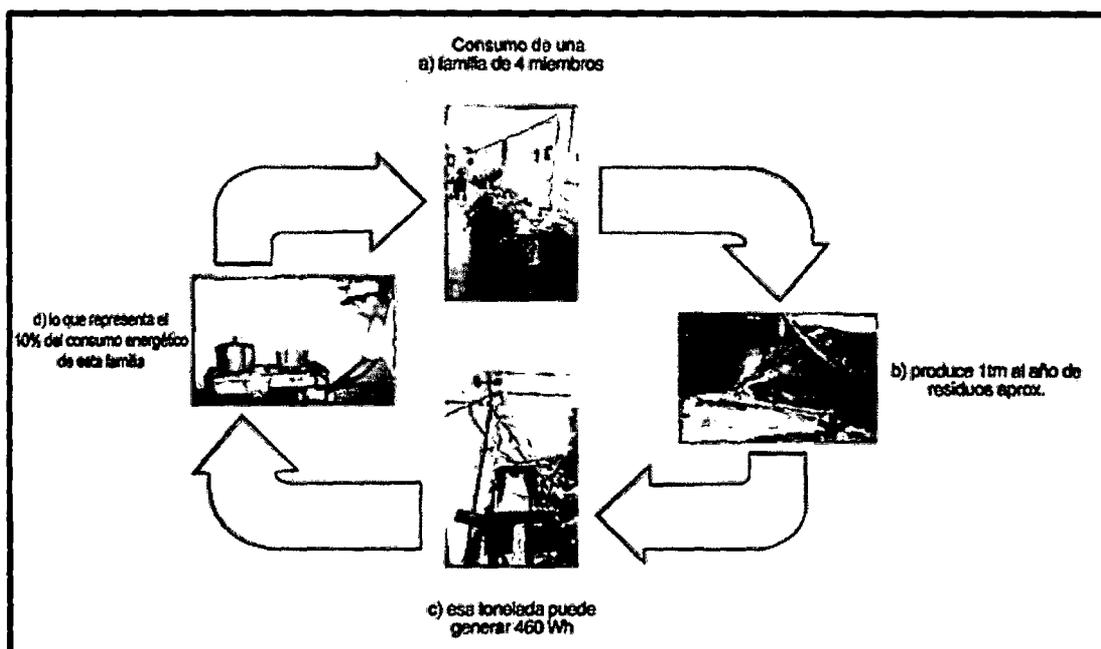
Un caso particular dentro de este grupo lo constituyen los residuos de las granjas de animales, denominados "residuos húmedos". La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolo en los campos de cultivos, así como también a partir de ello se puede extraer el llamado **biogás**.

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

**Desechos urbanos:** Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía "limpia".

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

Figura 4.5. Ejemplo del ciclo energético de residuos sólidos urbanos



Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central-  
FOCER, 2002.

#### 4.4.- CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan.

**Tipo de biomasa:** Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc.

El estado físico de la biomasa puede clasificarse según el tipo de recurso, como se indica en la tabla 1.

Tabla 4.1. Estados típicos de la biomasa

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

Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central FOCER, 2002.

**Composición química y física:** Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede

generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado "gas pobre", que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.

**Contenido de humedad:** El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un **contenido de humedad inferior al 30%**. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

**Porcentaje de cenizas:** El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

**Poder calorífico:** El contenido calorífico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.



**Tabla 4.2.** Poder calorífico de algunas formas de biomasa

Tipo de Biomasa	Valor calorífico bruto (MJ/Kg)
<b>Madera</b>	
Astilla de madera	20.89
Corteza de pino	20.95
Desechos industriales de madera	19.00
<b>Sub-productos agrícolas</b>	
Paja de trigo	18.94
Caña	18.06
Bagazo	18.09
Cascara de coco	18.60
Olote de maíz	17.72
Paja de arroz	15.61
Cascarilla de arroz	15.58
Aserrín	19.34

*Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central-FOCER-ANEXO, 2002.*

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

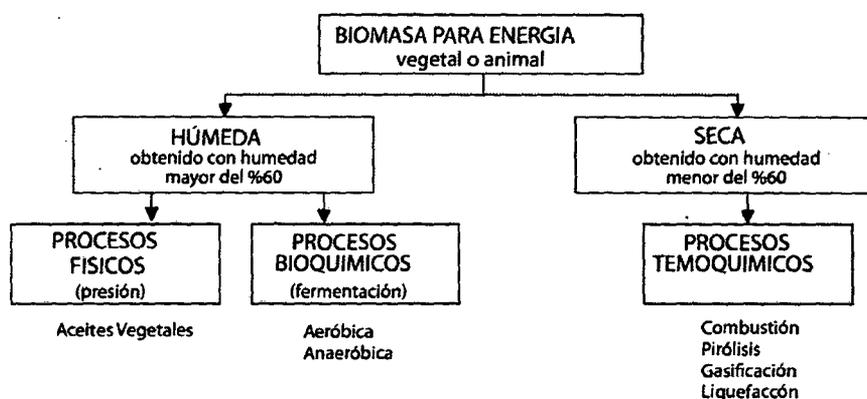
**Recolección, transporte y manejo:** Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional.

## 4.5.- PROCESOS DE CONVERSIÓN

La obtención de la energía contenida en la biomasa, se puede obtener por cuatro procedimientos (FORCER, 2002; COORDINACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE, 2008).

Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en dos grandes grupos, presentado en la figura 6.

Figura 4.6. División de la biomasa para el aprovechamiento de su energía



Fuente: Coordinación de Energía Renovable, 2008.

### 4.5.1.- CONVERSION DIRECTA

Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado.

Para este tipo de aprovechamiento la biomasa debe ser baja en humedad.

#### **Densificación**

Esta se refiere al proceso de compactar la biomasa en "briquetas", para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos,

comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta bajo presión alta.

**Tabla 3.** Uso directo de los desechos sólidos

Producto	Tecnología	Usos en América Central	Características
Polvos	Quemadores de polvo	De moderado a bajo	Costo de inversión elevado Facilita su empleo, incluyendo la escala doméstica. Mejora la eficiencia y características de la combustión.
Astillas Pellets	Hornos y calderas en suspensión y lecho fluidizado.	De moderado a bajo.	
Briquetas	Hornos y calderas en parrilla.	De moderado a bajo.	
Leñosos	Hornos y calderas, estufas domésticas.	Amplio	El tamaño dificulta el empleo en dispositivos de alta eficiencia, requiere procesamiento
Carbón Vegetal	Estufas domésticas		Disminuye la eficiencia energética total, pero su uso es más conveniente con menos humo.

*Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central-FOCER, 2002.*

El proceso de densificación, también denominado peletización, mediante el cual se obtienen briquetas, se lleva a cabo en rodillos con agujeros de salida, operados a gran presión, tal como se observa en los Anexos 10.5 y 10.6

#### **4.5.2.- PROCESOS TERMOQUÍMICOS**

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

Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su descompone en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos más simples, que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido.

### ***Producción de carbón vegetal***

Este proceso es la forma más común de la conversión termo-química de temperatura mediana. La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido se usa como carbón vegetal, el cual tiene mayor densidad energética que la biomasa original, no produce humo y es ideal para uso doméstico. Usualmente, este carbón es producido de la madera, pero también se usan otras fuentes como cáscara de coco y algunos residuos agrícolas.

La forma más antigua, y probablemente aún la más empleada para producirlo, son los hornos de tierra y los de mampostería. El primero es una excavación en el terreno en la que se coloca la biomasa, la cual es luego cubierta con tierra y vegetación para prevenir la combustión completa. Los segundos son construidos de tierra, arcilla y ladrillo.

Los hornos modernos son conocidos como retortas y fabricados en acero; conllevan cierta complejidad por su diseño y operación, lo que incrementa considerablemente los costos de inversión en comparación con los tradicionales, pero eleva su eficiencia y capacidad de producción, así como la calidad del producto.

**Gasificación:** tipo de pirólisis en la que se utiliza una mayor proporción de oxígeno a mayores temperaturas, con el objetivo de optimizar la producción del llamado “gas pobre” o “gas de síntesis”, constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con proporciones menores de dióxido de carbono y nitrógeno.

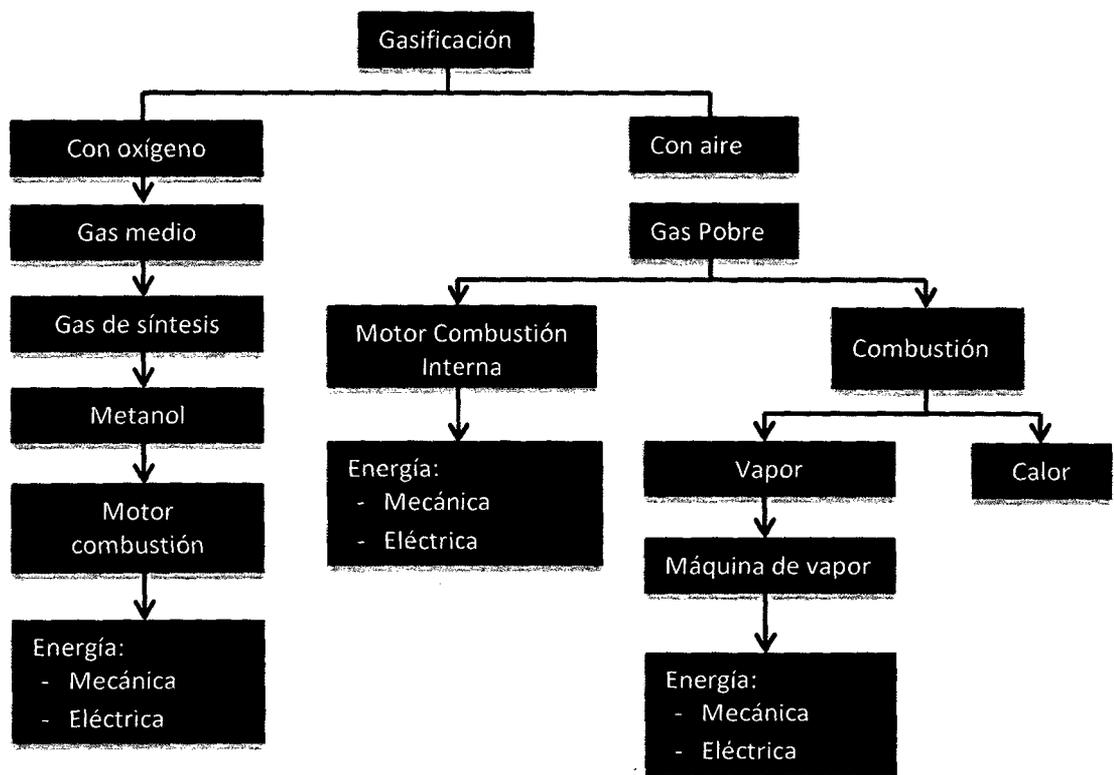
Este se puede utilizar para generar calor y electricidad, y se puede aplicar en equipos convencionales, como los motores de diésel. La composición y el valor calorífico del gas dependen de la biomasa utilizada, como por ejemplo: madera, cascarilla de arroz, o cáscara de coco. Existen diferentes tecnologías de gasificación y su aplicación depende de la materia prima y de la escala del sistema.

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

- El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural.

- Puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad.
- Produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse. Sin embargo, la operación de gasificación es más complicada. En principio, un gasificador simple puede ser construido en talleres metalmeccánicos convencionales, pero se requiere experiencia y un prolongado período de ajuste para llevar el sistema a sus condiciones óptimas de operación.

Figura 4.7. Gasificación y sus productos



Fuente: Coordinación de Energía Renovable, 2008.

#### 4.5.3 PROCESOS BIOQUIMICOS:

Ciertos microorganismos actúan sobre la biomasa transformándolos

- ✓ *Fermentación alcohólica:* Es el proceso de transformación de la biomasa para producir combustibles líquidos como etanol y metanol. El primero se



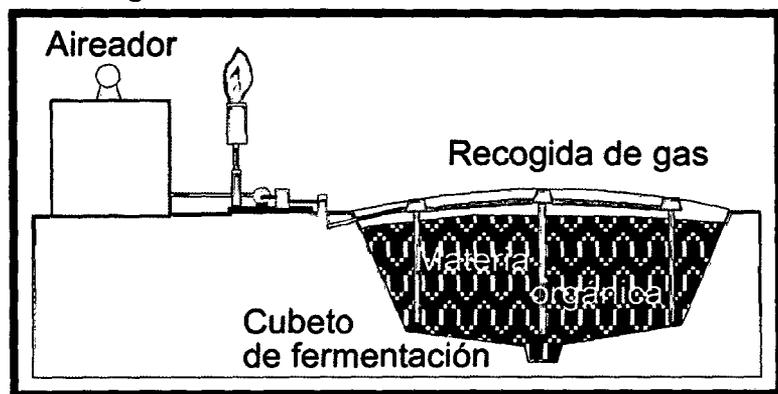
produce por medio de la fermentación de azúcares (glucosa) y, el segundo por la destilación destructiva de madera.

La fermentación de la glucosa da como resultado el **bioalcohol**, un combustible para vehículos. En Brasil, uno de cada tres vehículos funciona con etanol extraído de la caña de azúcar.

- **Fermentación anaerobia:** Proceso natural de descomposición de la materia orgánica (generalmente desechos de animales) en un contenedor (digestor) y allí se deja fermentar en ausencia de aire a través de bacterias, es decir, se fermenta durante un largo tiempo en ausencia de oxígeno. Esto origina principalmente metano y dióxido de carbono (**biogás**), este biogás se emplea en granjas para activas motores de combustión o calefacción.

La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico. Los digestores han sido promovidos fuertemente en China e India para usos domésticos en sustitución de la leña. También se pueden utilizar aguas negras y mieles como materia prima, lo cual sirve, además, para tratar el agua.

Figura 4.8. Proceso de fermentación anaeróbica



Fuente: IDAE, Solarizate-Biomasa, 2007.

#### 4.5.4 PROCESOS QUIMICOS

En este caso en el proceso de transformación no intervienen microorganismos.

- ✓ **Transformación de ácidos grasos:** consiste en transformar acetites vegetales y grasas animales en una mezcla de compuestos orgánicos

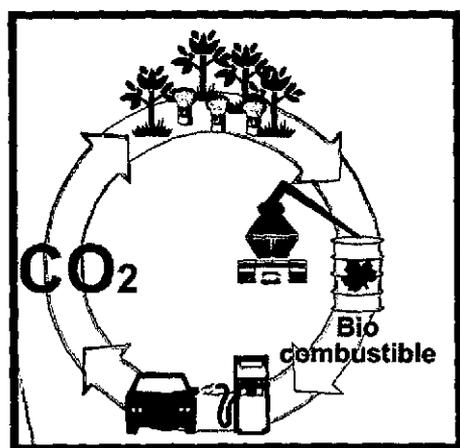
mediante procesos químicos no biológicos para crear un producto llamado **biodiesel**, que sirve de combustible.

Esta transformación se realiza por un proceso llamado “transesterificación”, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol (etanol o metanol) y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. Estos pueden ser mezclados con diésel o usados directamente como combustibles en motores comunes.

El biodiesel es utilizado, típicamente, como aditivo del diésel en proporción del 20%, aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir considerablemente las emisiones, el humo negro y el olor.

Tanto el bioalcohol, como el biogás y el biodiesel se llaman **biocombustibles** (La inclusión del prefijo “bio-” delante de las palabras diésel, gas o alcohol no indica otra cosa que el origen biológico de la materia prima empleada en su elaboración).

Figura 4.9. Representación del proceso cíclico del biocombustible



Fuente: IDAE, Solarizate-Biomasa, 2002.

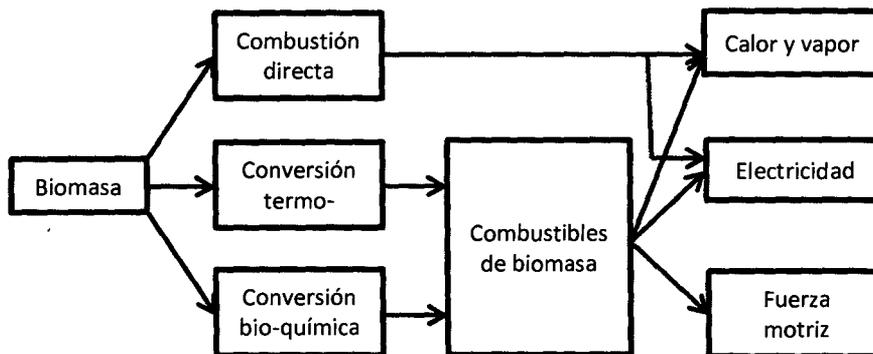
En la tabla 4.4, se muestran el aprovechamiento de la energía de la biomasa.

**Tabla 4.4.** Procesos de conversión de biomasa y sus aplicaciones.

Tipo de biomasa	Características físicas	Procesos de conversión aplicables	Producto final	Usos
Materiales orgánicos de alto contenido de humedad.	Estiércoles. Residuos de alimentos. Efluentes industriales. Residuos urbanos.	Digestión anaeróbica y fermentación alcohólica.	Biogas. Metanol. Etanol. Bio diesel.	Motores de combustión. Turbinas de gas. Hornos y calderas. Estufas domésticas.
Materiales lignocelulósicos (cultivos energéticos, residuos forestales de cosechas y urbanos).	Polvo Astillas Pellets Briquetas Leños Carbón vegetal	Densificación Combustión directa Pirólisis Gasificación	Calor, Gas pobre Hidrógeno Biodiesel	Estufas domésticas Hornos y calderas  Motores de combustión Turbinas de gas

Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central-FOCER, 2002.

**Figura 4.10:** Procesos de conversión y formas de energía



Fuente: Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central-FOCER, 2002.

#### 4.6.- GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

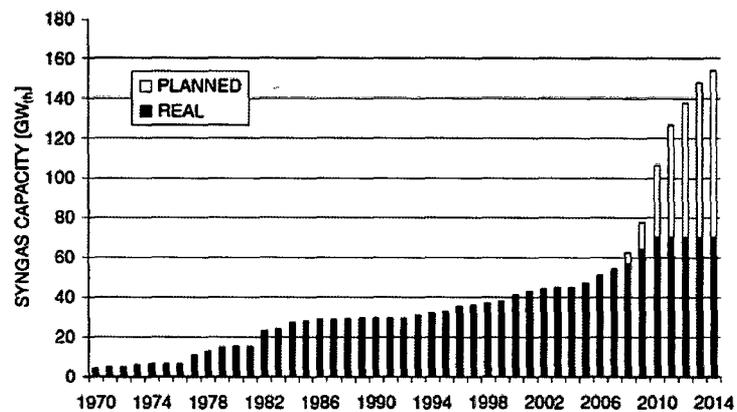
Debido al aumento del precio del petróleo y a los estudios científicos realizados sobre el calentamiento global producido por los gases de efecto invernadero, generados en proporción muy significativa por la utilización de combustibles fósiles (efectos vividos actualmente). Desde la década de los ochenta el desarrollo de sistemas de aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos, por medio de la gasificación, ha experimentado un notable incremento, alcanzando su mayor interés en la actualidad.

En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases llamada **gas de síntesis** o “**syngas**”, tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la

**sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural**, cuando se emplea aire como agente gasificante.

Sudáfrica desarrolló el proceso de obtención de gas de síntesis a partir de carbón y más recientemente gas natural y basó su industria petroquímica en estos dos recursos, promoviendo así su política de independencia de petróleo extranjero. Debido a la crisis petrolera de 1970, algunas potencias iniciaron sus programas de fuentes alternativas del petróleo, viendo así el interés por la gasificación como un importante bloque de desarrollo químico y energético. La Figura 11 se presenta la capacidad de gasificación mundial total (Rodríguez, D. 2013).

Figura 4.11. Capacidad de gasificación mundial



Fuente: Universidad Pontificia Bolivariana. 2013.

La gasificación de biomasa es un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados. Además también puede aplicarse para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (proceso Fischer-Tropsch).

Además de sustituir a combustibles ligeros de origen fósil, la gasificación permite obtener altos rendimientos eléctricos a partir de biomasa, cuestión ésta muy difícil mediante combustión directa para generación de vapor y posterior expansión de éste en un turbo alternador. **Mediante gasificación se pueden alcanzar**

rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de motogeneradores accionados por syngas, mientras que con un ciclo Rankine convencional simple las cifras rondan un 22% de rendimiento eléctrico (IDAE-BIOMASA, 2007)

### ***Ventajas de la gasificación frente a la combustión directa***

Según los resultados de las experiencias realizadas de gasificación, los autores, (Izaguirre, C y Erazo, D. 2010; Logic-Energy. 2013), detallan las ventajas y desventajas de la gasificación.

- La gasificación de madera o de un residuo agrícola es un proceso ecológico, ya que el CO<sub>2</sub> generado es el mismo que absorbe el árbol durante su vida y el mismo que se generaría durante su descomposición si fuera abandonada en su medio natural.
- Ausencia de humos contaminantes.
- Control absoluto de los subproductos generados para su posterior gestión.
- Mayor eficiencia del proceso.
- El gas producido es fácil de almacenar y puede ser utilizado para alimentar motores de combustión interna.
- Posibilidad de obtención de energía eléctrica y térmica conjuntamente.
- Facilidad de aplicación a proyectos de cogeneración.

Sin embargo:

- La gasificación exige una mejor calidad del combustible.
- Los sistemas deben estar suficientemente sellados para evitar la fuga de gas que tiene características tóxicas por contener CO.
- Peligros de explosiones.
- La gasificación de biomasa produce alquitrán.
- La gasificación aunque es un proceso de cierto tiempo, todavía para la producción de energía eléctrica se mantiene sobre la base de instalaciones experimentales producto de los altos costos inversionistas.

Algunos Riesgos ambientales y sanitarios de la gasificación son:

- Riesgos Tóxicos: CO

- Riesgos de incendios:
  - Elevada temperatura exterior del equipo.
  - Riesgos de chispas al recargar el combustible.
  - Llamas en la entrada de aire del Gasificador o en la tapa de recarga.
- Riesgos de explosión:
  - Filtraciones de aire.
  - Retroceso de la llama desde el quemador de gases de escape en el arranque.
- Riesgos Ambientales:
  - Producción de resinas fenólicas y alquitrán.

#### Medidas de seguridad

- Los sistemas deben estar suficientemente sellados para evitar la fuga de gas que tiene características tóxicas por el contenido de Monóxido de Carbono (CO).
- Se debe tener especial cuidado de no producir explosiones durante la operación de estos equipos.

#### 4.6.1 AGENTE GASIFICANTE

Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el syngas —producto final— varía en su composición -y poder calorífico. Se puede gasificar con aire, oxígeno, hidrogeno y vapor de agua.

Si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del syngas es nitrógeno y, en términos de poder calorífico, el gas ronda los 5,5 MJ/Nm<sup>3</sup>. Este syngas es apropiado para motores de combustión interna convencionales, ya que como materia prima para la síntesis del metanol es **un gas pobre**.

La gasificación con vapor de agua u oxígeno, mejoran el rendimiento global y aumenta la proporción de hidrógeno en el syngas. Es el sistema más adecuado de

producir syngas si se desea emplearlo como materia prima para producir metanol o gasolina sintética. Si bien el aire es gratuito y el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, el oxígeno tiene un costo energético y económico a tener en cuenta.

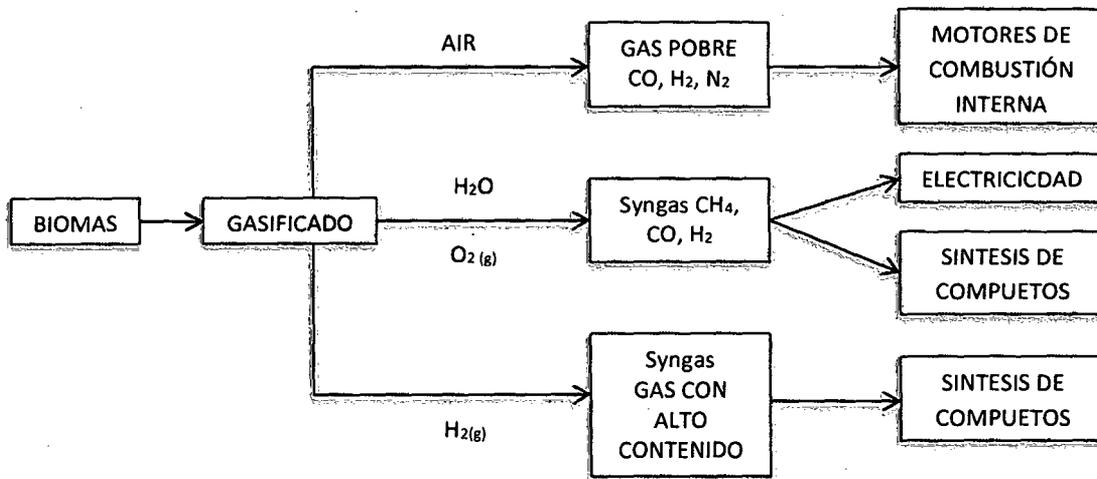
La utilización de hidrógeno como agente gasificante permite obtener un syngas que puede sustituir al gas natural, pues puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/kg. No obstante, el hidrógeno es el mejor de los combustibles, susceptible de usarse en cualquier dispositivo termoquímico o electroquímico, por lo que no es muy recomendable como gasificante en el ámbito industrial, excepto en los casos de excedentes de baja pureza, no aptos para otra aplicación como una pila de combustible (IDAE-GASIFICACION, 2007).

Tabla 4.5. Poder calorífico del Syngas en función del agente gasificante.

AGENTE GASIFICANTE	PRODUCTO	PODER CALORÍFICO
Aire	Gas Pobre	< 5.5 MJ/Nm <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O (v) ; O <sub>2</sub> (g)	Syngas	10 20 MJ/Nm <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> (g)	Syngas	> 30 MJ/Nm <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.12. Gasificación de biomasa en función del agente gasificante



Fuente: Universidad Carlos III de Madrid, 2010.

En el Anexo 10.7 se muestra el proceso de tratamiento de la biomasa, su transformación en energía y su uso respectivo.

#### **4.6.2 TERMOQUÍMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN**

##### ***Reacciones del Proceso de Gasificación***

El número de reacciones que tienen lugar en el proceso de gasificación de biomasa es muy elevado. La composición final del gas depende de diversos factores, entre ellos: la composición de la biomasa (de la cual depende su poder calorífico), el contenido de humedad, la temperatura a la que se llevan a cabo las reacciones, la relación aire/biomasa, el tamaño y la densidad de la biomasa triturada y el tipo de gasificador utilizado. El gas obtenido contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados, agua (H<sub>2</sub>O), nitrógeno (N<sub>2</sub>) (cuando se usa aire como agente gasificante) y diversos compuestos no deseados como pequeñas partículas carbonosas (Char), cenizas y alquitranes (*Vargas, C. 2012*).

EL CO, el H<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> son los componentes que principalmente confieren poder calorífico al gas. Las ecuaciones que se llevan a cabo en el proceso de gasificación de la biomasa, clasificadas según las reacciones con C, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, producción de CH<sub>4</sub> y reformado con vapor tal como se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Clasificación de las principales reacciones en el proceso de gasificación.

Reacciones	R	Ecuación	Calor $\Delta H_{25^\circ C}$ kCal/mol	Reacción
Cambios de estado y pirólisis	Pirólisis	Biomasa + calor $\rightarrow$ char + liq + gas		
		líquidos + calor $\rightarrow$ gases		
		Alquitrán(líquido) $\rightarrow$ Alquitrán(gas)		
con carbono	R1	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$	41,1	Boudouard
	R2	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	31,3	Gasificación con vapor.
	R3	$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	-17,9	Metanización o Hidrogasificación
	R4	$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$	-26,5	Combustión parcial del C
con oxígeno (reacciones de combustión)	R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-94,5	Combustión completa del C
	R6	$CO + 1/2O_2 \rightleftharpoons CO_2$	-67,4	Oxidación del CO
	R7	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	-191,8	Comb. del $CH_4$
	R8	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	-57,8	Oxidación del $H_2$
Shift	R9	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	-9,8	Shift (agua gas)
de metanización	R10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-58,9	
	R11	$CO + 3H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O$	-49,2	Metanización
	R14	$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O$	-39,4	
Reformado con vapor	R12	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$	48,5	Gasificación del metano
	R13	$CH_4 + 1/2H_2O \rightarrow CO + 2H_2$	-8,6	Gasificación del metano
	R14Rev	$CH_4 + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 4H_2$	39,6	
con otros hidrocarburos	R15	$C_nH_m + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	-317,2	
	R16	$C_nH_{2n} + H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2}$		
	R17	$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + m/2)H_2$		
Otras reacciones con carbono y agua	R18	$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$		
	R19	$2C + 2H_2O \rightarrow H_2O + CH_4$		

(Endotérmica, Exotérmica, En negro: pueden ser endotérmicas o exotérmicas dependiendo de la temperatura y la dirección a la que se lleve a cabo la reacción)

Fuente: Instituto de Energía Eléctrica. 2012.

En el proceso de combustión según las reacciones R4 y R5, el residuo carbonoso (Char) reacciona con el oxígeno, pero al haber defecto de éste se produce una combustión incompleta que produce CO y residuo carbonoso sin reaccionar, este residuo carbonoso posteriormente reacciona con los gases presentes, principalmente  $CO_2$  y  $H_2O$  (reacciones heterogéneas gas-sólido) para producir CO

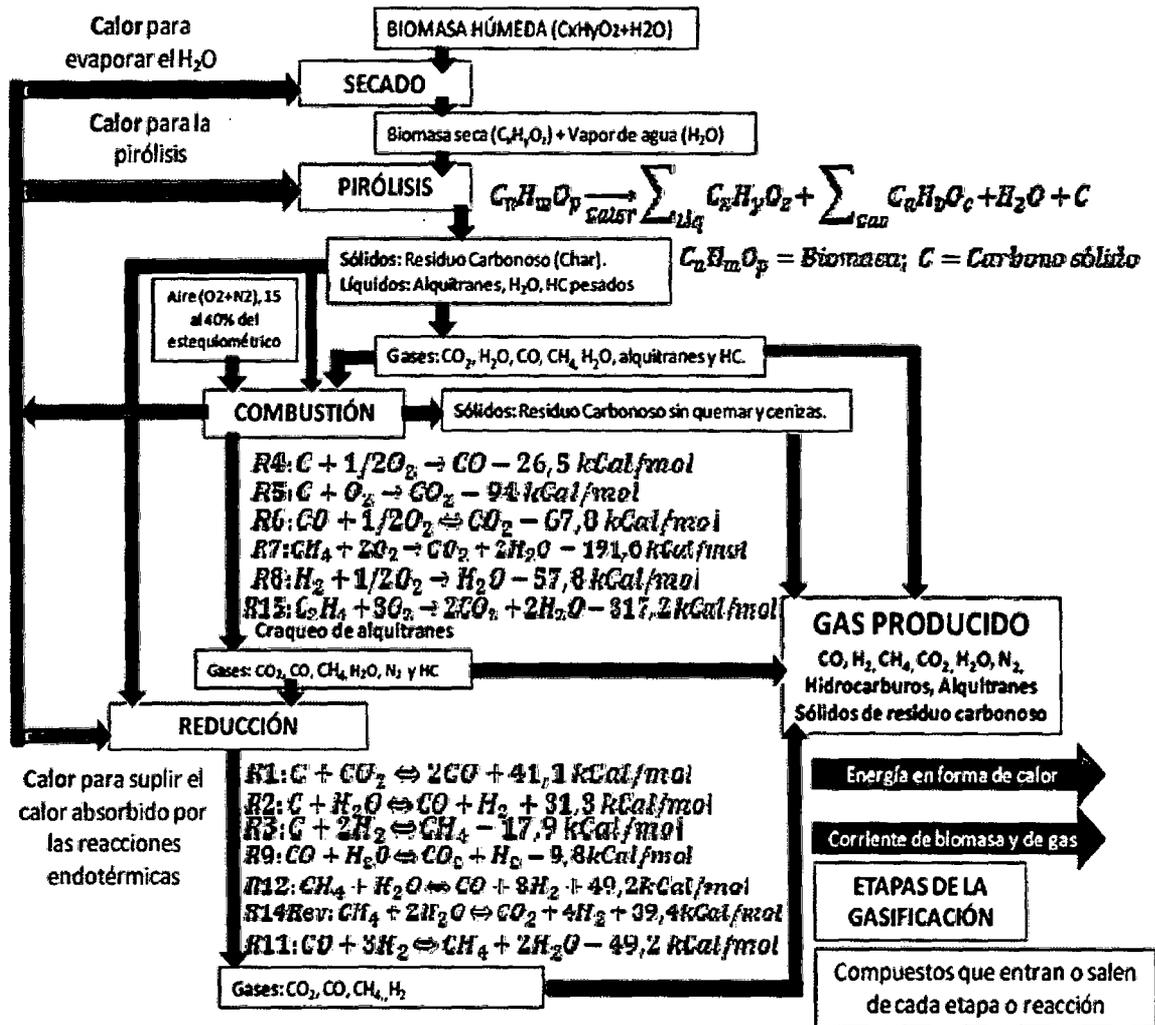
y H<sub>2</sub> (Reacciones R1 y R2). Al ser las más lentas, las reacciones que limitan la velocidad son las reacciones sólido - gas donde no participa el oxígeno (R1 a R3). La producción de hidrógeno se ve favorecida por la presencia de agua en la biomasa y vapor de agua en el agente gasificante. El hidrógeno se produce principalmente por las reacciones R2 y R9, y en menor medida a partir de R12, R13, R14Rev y R17. No obstante un exceso de humedad disminuye el rendimiento del proceso global. **Son aceptables valores hasta un 30% de humedad en la biomasa**, de lo contrario habría que hacer un tratamiento previo para secarla con el consiguiente consumo energético.

La formación de metano se lleva a cabo mediante las reacciones R3, R10, R11 y R14. Siendo la reacción R3 la de especial importancia en procesos en los que se requiera la producción de gas como reemplazo del gas natural y se lleva a cabo en procesos a elevadas presiones (*Rincón, S. Gómez, A. Klose, W. 2011*).

#### **4.6.3 ETAPAS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN**

Proceso de gasificación consta principalmente de cuatro etapas: **secado, pirolisis, combustión y reducción**, que se muestran en la Figura 4.13, con las respectivas reacciones químicas que tienen lugar en cada una de ellas.

Figura 4.13. Entradas, salidas y reacciones de las etapas del proceso de gasificación



Fuente: Instituto de Energía Eléctrica. 2012.

Aunque estas etapas son frecuentemente modeladas en serie, no hay un límite claro entre ellas, y a menudo se superponen. En un proceso típico, la biomasa se calienta (seca) y luego se somete a degradación térmica o pirólisis, los productos de la pirólisis (gases, sólidos y líquidos) reaccionan entre sí, así como con el medio gasificante para formar el gas final. En la mayoría de los gasificadores comerciales, la energía térmica necesaria para el secado, la pirólisis, y las reacciones endotérmicas de reducción provienen de las reacciones exotérmicas llevadas a cabo en la etapa de combustión como se muestra en la Figura 4.13.

### **Secado**

La biomasa que ingresa al gasificador se calienta y se seca, evaporando parte de la humedad contenida en ella con el calor producido por las reacciones de combustión.

Para la producción de un gas combustible con un valor calorífico aceptable, la mayoría de los sistemas de la gasificación usan biomasa seca con un contenido de humedad entre 7% y el 20%. La humedad contenida en la biomasa hace necesario que se le suministre energía para evaporar el agua y la energía consumida en este proceso no es recuperable.

Si bien no se puede hacer mucho acerca de la humedad interna de la biomasa ya que ésta se encuentra dentro de la estructura celular, si se puede disminuir la humedad externa o de la superficie. Por encima de 100 °C el agua que está en la superficie de la biomasa es retirada definitivamente. A medida que aumenta la temperatura, los compuestos extraíbles de bajo peso molecular inician el proceso de volatilización que continúa hasta que se alcanza una temperatura aproximada de 200 °C (Vargas, C. 2012).

Cuando la humedad es muy alta, un pre-secado es necesario para eliminar tanta humedad de la biomasa como sea posible antes de alimentar el gasificador con ella.

### **Pirolisis**

Consiste en la primera etapa de la degradación de la biomasa, es un proceso de descomposición térmica sin casi presencia de oxígeno que ocurre entre 300 y 500 °C. En esta etapa se desprenden los gases combustibles más volátiles, algunos de los cuales no se queman por la ausencia de oxígeno y se convierten en alquitranes (Tar). Además de los gases, se produce un residuo sólido de aspecto carbonoso llamado residuo carbonoso, **char o carbón vegetal**. Entre los gases producidos, los más importantes son: vapor de agua, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO e hidrocarburos (como el benceno).

La pirolisis habitualmente es dividida en pirolisis lenta (donde se crean los alquitranes por condensación de moléculas) y pirolisis rápida. La etapa de pirolisis es más rápida que la de gasificación. La producción de gases se ve favorecida por un tiempo de permanencia y/o temperatura adecuadas. La fracción de hidrocarburos está compuesta de CH<sub>4</sub> y alquitranes, la cantidad de alquitranes y



aire introducida es inferior a la estequiometricamente requerida para una combustión completa, (por lo tanto el oxígeno es el reactivo límite) se produce una combustión incompleta (R4,  $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ ) que genera CO, parte de éste se mezcla con el  $O_2$  para producir otra reacción de combustión (R6,  $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$ ). Las reacciones de combustión completa e incompleta mencionadas son de carácter exotérmico y en ellas se produce principalmente CO y  $CO_2$ , adicionalmente el oxígeno remanente, que ya es poco, se mezcla con  $CH_4$  y  $H_2$  producidos en reacciones anteriores de pirólisis y se forma  $CO_2$  y  $H_2O$  (R7 y R8).

Esta etapa produce el calor necesario para llevar las etapas de secado, pirólisis y además suministrar calor a las reacciones de reducción que son endotérmicas, para mantener la temperatura. La reacción R5 ( $C + O_2 \rightarrow CO_2$ ) es la que desprende la mayor cantidad de calor, 94 kcal/kmol de carbono consumido, seguida de la reacción R4 ( $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ ), que además produce CO, y libera 26,5 kcal/mol de calor. La velocidad de la reacción R4 es relativamente lenta.

#### ***Reducción- gasificación del residuo carbonoso***

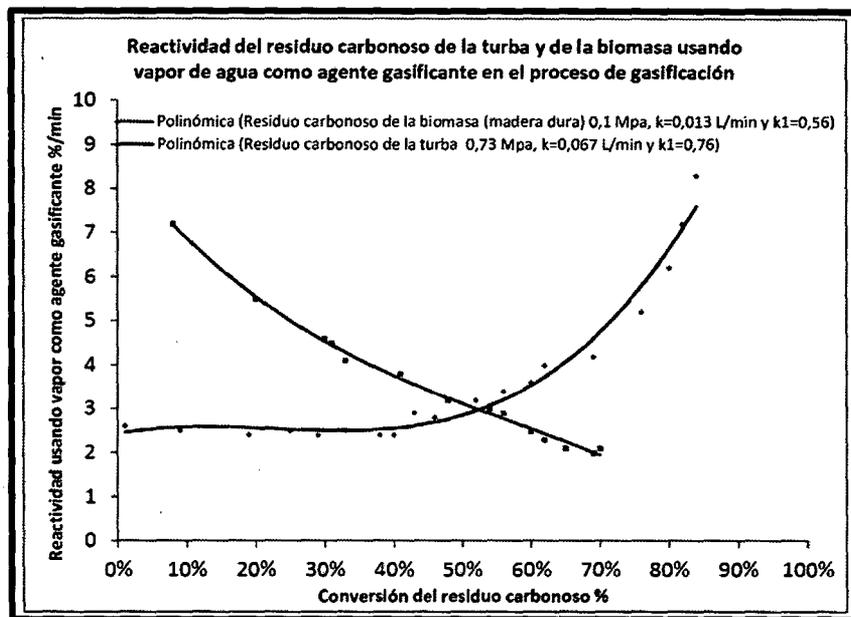
Esta etapa se lleva a cabo después de la pirólisis y las reacciones correspondientes se llevan a cabo en paralelo con la etapa de combustión, aunque el calor y los productos de la combustión (como el  $CO_2$  y el  $H_2O$ ) son requeridos en esta etapa. La reducción es la más compleja de todas las etapas, envuelve reacciones químicas entre HC,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $H_2$ , así como entre los gases desprendidos. De todas estas reacciones, las de **gasificación del residuo carbonoso producido son las más importantes**, por tanto las reacciones que se presentan son solido-gas, a través del cual el sólido se convierte en gas. Además también se presenta la reacción en fase gas llamada reacción shift ( $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ). En el Anexo 10.9 se muestra la curva de formación de los principales productos de la reacción de descomposición térmica de la biomasa., mientras que el Anexo 10.9 muestra la variedad de productos formados durante el proceso denominado gasificación.

Figura 4.15. Carbón vegetal o residuo carbonoso (Char) de la madera



Fuente: ECO SA distribuidora carbonifera, 2015.

Figura 4.16. Reactividad del residuo carbonoso de la turba y biomasa (madera seca)



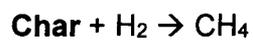
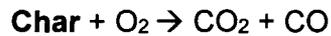
Fuente: Instituto de Energía Eléctrica, 2012.

Si comparamos el residuo carbonoso de la biomasa (madera seca), con el del carbón fósil y coque, los poros del residuo carbonoso de la biomasa son mucho más grandes (20-30 micras) que los del carbón fósil (~ 5 angstrom) (Vargas, C. 2012).

Por lo tanto, el comportamiento de las reacciones es diferente cuando se utiliza el residuo carbonoso de la biomasa que cuando se utiliza lignito o turba. La reactividad de la turba decrece con el tiempo conforme se va convirtiendo, mientras que la reactividad del residuo carbonoso de la biomasa aumenta a lo largo del proceso de conversión (Figura 16). Esta tendencia inversa se puede atribuir a la

creciente actividad catalítica de los componentes metálicos alcalinos del residuo carbonoso de la biomasa (Vargas, 2012).

La gasificación del residuo carbonoso de la biomasa implica varias reacciones entre éste y el agente gasificante. A continuación se muestra algunas de las reacciones del residuo carbonoso (Char) con diferentes agentes gasificantes como el oxígeno, el dióxido de carbono, el vapor de agua y el hidrógeno (Vargas, C. 2012).



**Reacción de Boudouard**

**Reacción agua-gas**

**Reacción de Hidrogasificación**

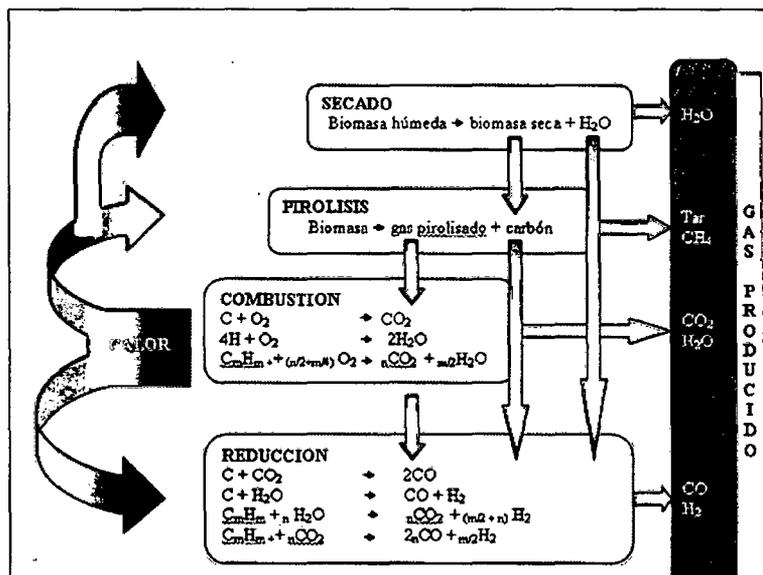
Las ecuaciones anteriores muestran cómo agentes gasificantes como el O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y el H<sub>2</sub> reaccionan con el carbono sólido para convertirlo en gases de bajo peso molecular como el CO, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. En este trabajo de investigación se realizan pruebas utilizando aire como agente gasificante, por lo tanto las reacciones que predominan son las que se llevan a cabo entre el carbono y el oxígeno, sin embargo debido a que hay reacciones de combustión incompleta (producción de CO) y la biomasa está húmeda, se produce hidrógeno en la reacción entre carbono y agua.

**Algunos autores consideran las etapas de combustión y reducción conjuntamente en una sola etapa de gasificación**, dado que se realizan en forma paralela. En ella se tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el Char, alquitrán y la mezcla gaseosa presente (Benjamin y Otros, 2010).

Para entender mejor el proceso de la producción del gas, a continuación se presenta el en la Figura 4.17, el esquema resumido con algunas de las reacciones.

En el Anexo 10.11, se muestra los principales mecanismos de la descomposición térmica de la biomasa residual.

Figura 4.17. Esquema resumen de la producción del gas



Fuente: Universidad de Centro América, 2006.

Tabla 4.7. Composición típica del gas de la gasificación de biomasa con aire

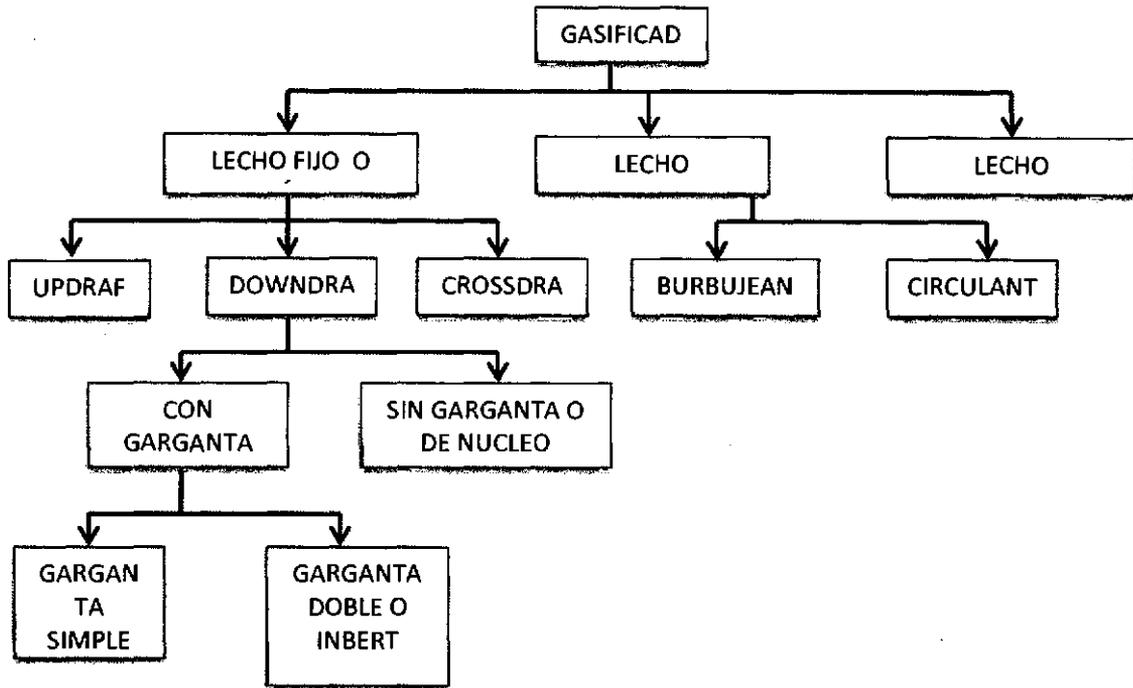
Componente	Contenido (% Vol)
Monóxido de carbono	20-25
Hidrógeno	15-20
Metano	1-2
Dióxido de carbono	10-12
Nitrógeno	48-50

Fuente: Agroensa-Gasificador. 2010.

#### 4.6.4 TIPOS DE GASIFICADORES

Los equipos usados para la gasificación de biomasa se dividen de manera general en: gasificadores de lecho fijo (semimóvil), de lecho móvil, de lecho fluidizado y de flujo de arrastre.

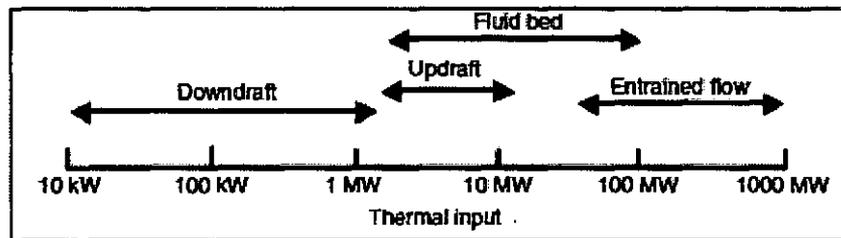
**Figura 4.18.** Clasificación de los gasificadores



Fuente: Elaboración Propia.

Un tipo de gasificador no es necesariamente adecuado para toda la gama de capacidades, hay una rango apropiado para cada tipo, por ejemplo, el de lecho fijo o móvil (corriente ascendente y descendente) se utiliza para las plantas más pequeñas (Downdraft de 10 kWth a 1 MWth y Updraft de 1 MWth a 10 MWth), el de lecho fluido es más apropiado para las unidades intermedias (1 MWth - 100 MWth), y los reactores de flujo por arrastre son utilizados para las unidades de gran capacidad (> 50 MWth) (Vargas, C. 2012).

**Figura 4.19.** Rango de aplicación de los gasificadores para producción de Energía eléctrica.



Fuente: Instituto Ingeniería Eléctrica, 2012.

#### 4.6.5 LECHO FIJO

Los gasificadores de lecho fijo (alimentación por lotes) y semimóvil (alimentación continua) tienen una zona de reacción estacionaria típicamente soportada por una rejilla, la alimentación se realiza por la parte superior del reactor formando una cama de partículas sólidas de biomasa a través de las cuales se introduce el agente gasificante. La fase sólida se mueve lentamente hacia la parte baja del reactor a medida que ocurre la descomposición de la biomasa (de aquí su nombre de lecho fijo), a este tipo de gasificadores también se conoce como de lecho móvil porque el combustible se mueve lentamente hacia abajo en el reactor (Vargas, C. 2012)

Estos reactores cuentan con una tecnología simple, son fáciles de diseñar y operar; alcanzando altas conversiones de carbono, largos tiempos de residencia, baja velocidad del gas y bajo transporte de cenizas (García, E. 2011). Su uso es **apropiado para la producción de energía a pequeña escala y mediana escala** con requerimientos térmicos de hasta pocos MW.

A grandes escalas, los gasificadores de lecho fijo pueden encontrar problemas con la alimentación de biomasa. Esto conlleva un flujo irregular de gas, por lo que conseguir temperaturas uniformes a lo largo del gasificador puede ser difícil debido a la ausencia de mezclado en la zona de reacción (Moreno, F. 2010).

Dentro de las principales desventajas de estos gasificadores se encuentran la existencia de altos gradientes de temperatura en el interior del mismo, la falta de uniformidad del flujo de la fase sólida, formación de puentes y adherencia del material y caídas considerables de presión a través de la cama de material sólido.

Dependiendo de la dirección del flujo en la cual se mueve el agente de reacción y su relación con la dirección del movimiento del sólido, estos gasificadores se clasifican en gasificadores de flujo en contracorriente, flujo paralelo y flujo cruzado.

##### ***Lecho fijo: updraft***

En un gasificador updraft, o de corriente ascendente; la biomasa se alimenta por la zona superior del gasificador y el aire entra por la parte inferior. **El gas producido fluye hacia arriba en sentido opuesto al de la biomasa (por eso se llama**

**updraft)** saliendo por la parte superior del gasificador. Se pueden identificar tres zonas, las cuales ocurren de manera secuencial (*García, E. 2011*).

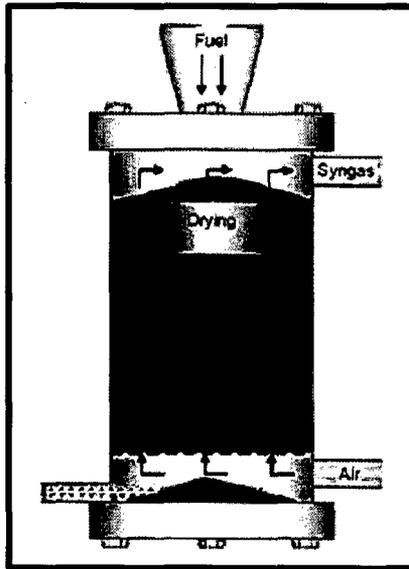
La primera zona es denominada zona de secado, en donde se produce la eliminación de la humedad contenida en la biomasa, debido a la disposición del equipo el agua liberada sale del sistema sin oportunidad de reaccionar.

La segunda zona es denominada zona de pirólisis, en la cual se inicia la descomposición térmica de la biomasa. Las reacciones no son lo bastante rápidas como para descomponer todo el material volátil de la biomasa, es decir, existen moléculas orgánicas producidas por fracturas de otras mayores; además, el tiempo de permanencia en la zona no permite que estas sufran un grado de transformación notable saliendo a la zona de secado e incluso al exterior.

La tercera zona es la zona de gasificación (oxidación y reducción), en esta zona se producen las reacciones de oxidación entre la fase sólida proveniente de la pirólisis y el agente gasificante, las cuales son de naturaleza exotérmica; asimismo se producen las reacciones de reducción entre los alquitranes y los gases presentes.

**El gas resultante sale a baja temperatura (400°C). Las concentraciones de alquitrán en el gas resultante son altas** (principal desventaja) ya que los vapores formados en las reacciones de pirólisis son arrastrados hacia arriba a través del reactor con el gas resultante. **Los niveles de partículas en el gas resultante a tratar son bajos** a causa de las condiciones de no turbulencia. La ceniza es arrastrada junto con los sólidos en la dirección opuesta a la del flujo de gas y es retirada de la parte inferior del gasificador. Con este tipo de gasificador se consigue un buen intercambio de calor, además de admitir combustible con alta humedad, puesto que en este caso pasa por una zona de secado (*Moreno, F. 2010*).

Figura 4.20. Gasificador de Lecho Fijo "Updraf".



Fuente: Universidad Carlos III Madrid, 2010.

### **Lecho fijo: down draft**

En un gasificador downdraft, o de corriente descendente; la biomasa se alimenta por la parte superior del gasificador y el aire entra a una cierta altura por debajo de la parte superior, directamente a la zona de combustión o por encima de esta. **El gas producido fluye hacia abajo al igual que la biomasa (por eso se llama downdraft)** y sale por la parte inferior del lecho de residuo carbonoso.

En el diseño de estos gasificadores, la sección transversal se reduce mediante un tronco de cono en la garganta a partir de la cual el área del cono empieza a aumentar de nuevo progresivamente, en esta garganta se encuentra la zona de oxidación y el propósito de este arreglo es forzar a todo el gas producido en la pirólisis que pase a través de esta parte estrecha. (Vargas, C. 2012).

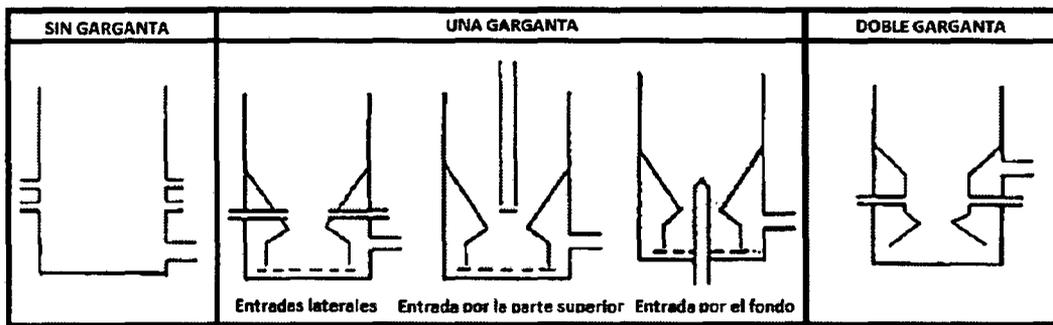
Con esta configuración se evita el problema de arrastre de alquitrán con la corriente de gas, esto debido a que en su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de residuo carbonoso y se transforman por ello en gases permanentes de hidrogeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. De esta manera **la presencia de alquitrán en la corriente de gas producido es mínima**, la tasa de producción alquitranes en estos tipo de gasificadores son de

0,015 - 3 mg/Nm<sup>3</sup>, lo cual lo hace apropiado para el uso en motores de combustión.

Los niveles de partículas en el syngas son típicamente bajos debido a la ausencia de turbulencia en el gasificador, pero el gas puede contener componentes alcali mientras sale de la zona caliente del reactor. El principal inconveniente de los gasificadores downdraft es el alto contenido en cenizas arrastradas junto con el gas producido. Este tipo de reactores requieren combustibles con un contenido de humedad bajo (Moreno, F. 2010).

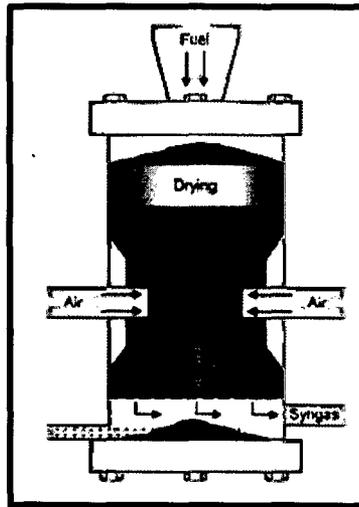
Hay dos tipos principales de gasificador downdraft: sin garganta (o de núcleo abierto) y con garganta (o restringido), como se muestra en la Figura 4.21.

Figura 4.21. Tipos de gasificador de lecho fijo downdraft



Fuente: Instituto Ingeniería Eléctrica, 2012.

Figura 4.22. Gasificador de Lecho Fijo "Downdraft" con garganta.



Fuente. Universidad Carlos III Madrid, 2010.

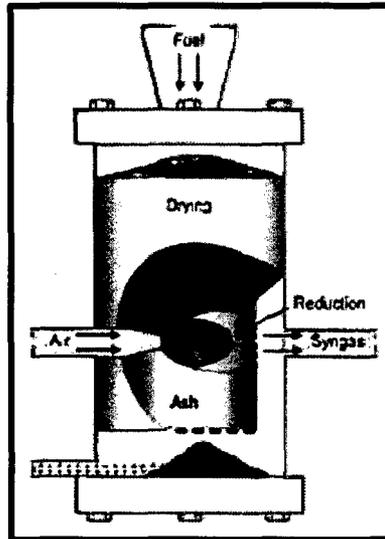
### **Lecho fijo: cross draft**

En un gasificador crossdraft, o gasificador de tiro transversal; la biomasa se alimenta por la parte superior del gasificador y aire entra por el lado lateral del reactor. El gas producido fluye por el lado diametralmente opuesto al ingreso del aire. Las distintas etapas de gasificación ocurren concéntricas a la zona de inyección del agente oxidante (Moreno, F. 2010).

Estos gasificadores constituyen una adaptación para el empleo de carbón vegetal, con la característica que se producen elevadas temperaturas en la zona de oxidación. Por ejemplo cuando se emplea carbón vegetal se alcanzan temperaturas mayores a 1500°C que pueden traer problemas en los materiales (Meléndez, B y otros. 2006).

Las ventajas del sistema están en poder funcionar en muy pequeña escala, debido a la gran sencillez del conjunto de depuración del gas, este tipo de gasificador se puede utilizar con motores pequeños. Un inconveniente de estos gasificadores es su mínima transformación de los alquitranes (Meléndez, B y otros. 2006).

Figura 4.23. Gasificador de Lecho Fijo "Crossdraft".



Fuente. Universidad Carlos III Madrid, 2010.

#### 4.6.6 LECHO FLUIDIZADO

Los gasificadores de lecho fluidizado fueron originalmente desarrollados para la gasificación del carbón y han sido adaptados para la conversión de biomasa. En estos gasificadores, el agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, gas resultante de un reciclado, o una combinación) se alimenta por la parte inferior del gasificador a una velocidad suficiente para fluidizar (suspender) la biomasa.

Este tipo de gasificador pretende eliminar las dificultades presentes en los gasificadores lecho fijo, tales como la formación de escoria y la excesiva caída de presión, las cuales son ocasionadas por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible.

Al contrario de los gasificadores de lecho fijo, **no existen diferentes zonas de reacción en el gasificador**. El secado, la oxidación, la pirolisis y la reducción se dan lugar en la misma área; es decir, cada partícula es sometida de forma instantánea a estos procesos en cualquier punto del gasificador tras su entrada a él, lo cual origina que las cenizas sean arrastradas por el gas obtenido. Los lechos fluidizados son gasificadores versátiles y no son sensibles a las características del

combustible, exceptuando el tamaño que debería de ser pequeño (Izaguirre, C y Erazo, D. 2010).

Durante el proceso se realiza calentamiento externo y el material se introduce cuando la temperatura es elevada. El material ingresa por el fondo del reactor y se calientan casi instantáneamente. La biomasa se piroliza muy rápidamente, además el equipo es muy flexible en cuanto al material de la alimentación. (Meléndez, B y otros. 2006)

Una de las ventajas más importantes de la gasificación en lecho fluidizado es la uniformidad conseguida en la distribución de temperatura en el lecho, puesto que el movimiento de las partículas favorece un mejor contacto gas-sólido, propiciando que el perfil de temperatura y conversión sean uniformes a lo largo del reactor, permitiendo un control muy preciso de las condiciones de operación.

Los gasificadores de lecho fluidizado **pueden ser dimensionados para instalaciones de mediana y gran escala** y son los más adecuados para situaciones donde hay una relativa demanda constante del gas resultante. Esencialmente, todas las instalaciones gasificadoras de grandes dimensiones construidas y probadas en la última década usan diseños de lecho fluidizado. El **gas resultante tiene un nivel medio de alquitranes y altos niveles de partículas** como resultado de la turbulencia en el reactor. Las partículas consisten en cenizas originadas por la biomasa y partículas finas que escapan del lecho [Moreno, F. 2010].

Dentro de esta clasificación, se pueden encontrar gasificadores de lecho fluidizado burbujeante y de lecho fluidizado circulante.

#### **Lecho fluidizado: burbujeante**

En los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante existe una interfase que divide la zona libre de reacción (freeboard) de la zona de reacción (lecho). Como consecuencia del mezclado, las distintas etapas de la gasificación no se distinguen.

#### **Lecho fluidizado: circulante**

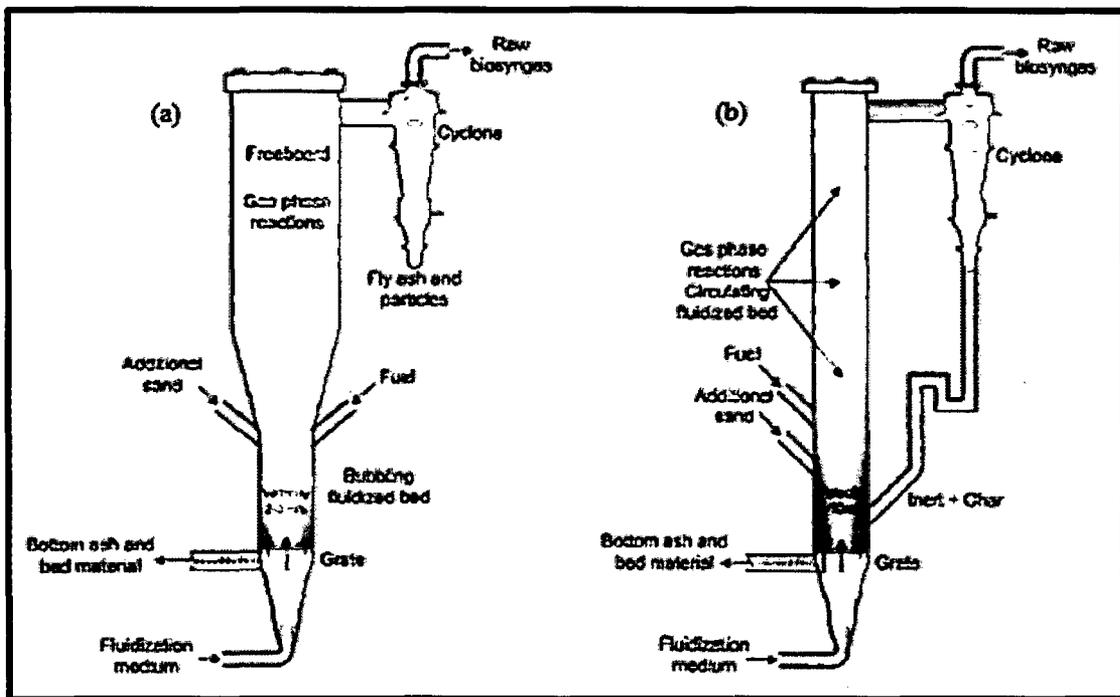
La diferencia que suponen los gasificadores de lecho fluidizado circulante, es la existencia de una tubería de retorno al reactor; como consecuencia de la



recirculación, se obtienen gases de síntesis con un poder calorífico 3 veces superior al de los gasificadores convencionales (4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>).

En estos lechos, las condiciones de fluidización son rápidas y los sólidos son arrastrados, debiendo ser recogidos y recirculados, logrando una mayor conversión; así mismo, se reduce la tendencia de las partículas a aglomerarse pudiendo adicionarse reactantes gaseosos a diferentes niveles.

Figura 4.24. a) Gasificador de Lecho fluidizado burbujeante. b) gasificador de lecho fluidizado circulante



Fuente. Universidad Carlos III Madrid, 2010.

#### 4.6.7. LECHO ARRASTRADO

En este tipo de gasificadores los sólidos son arrastrados en el flujo de gas, fluyendo en paralelo a altas velocidades. Para la obtención de buenas conversiones, se requieren temperaturas de reacción de 1200 °C, puesto que el tiempo de residencia de los sólidos es muy corto (del orden de segundos). Al operar con temperaturas tan altas, se suele operar en modo slagging (con cenizas fundidas) a elevadas presiones (Moreno, F. 2010).

Presenta las siguientes características:

- ❖ Obtención de gas prácticamente limpio de alquitranes y metano.
- ❖ Volúmenes de gas producido superior al obtenido en los distintos tipos de lechos anteriormente mencionados.
- ❖ Se precisa mayor demanda de agente gasificante que en los lechos fluidizantes burbujeantes y circulante.
- ❖ Alta carga de partículas que pueden llegar a ser arrastradas.
- ❖ Equipos de alto costo económico.
- ❖ **No aptos para empleo de biomasa (Biling, . 2009).**

### **Comparación de los distintos tipos de gasificadores**

Cada tipo de gasificador tiene sus requerimientos para operar de manera eficiente, debido a esto es de esperarse que los resultados por la operación sean diferentes. A continuación se muestra una tabla con un resumen de las características de operación.

**Tabla 4.8. Característica operación de los gasificadores**

<b>Característica</b>	<b>Downdraft</b>	<b>Updraft</b>	<b>Lecho fluidizado</b>
<b>Tamaño del material (mm)</b>	20-100	5-100	0-20
<b>Contenido de Ceniza (%Peso)</b>	Max 6	Max 25	Max 25
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	700	200-400	750-950
<b>Contenido de Alquitrán (g/Nm<sup>3</sup>)</b>	0.015-0.5	30-150	5
<b>Sensible a Cambio de carga</b>	Si	No	Si
<b>Valor calorífico del Gas (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	4.5-5	5-6	4.5

Fuente. Universidad Centroamericana, 2006.



Tabla 4.9. Ventajas y desventajas de los gasificadores

Tipo de gasificador	Ventaja	Desventaja
<b>Corrientes opuestas (Updraft)</b>	Pequeña caída de presión.	Sensibilidad a los alquitranes y contenido de humedad de la biomasa.
	Alta eficiencia de conversión.	Alta producción de alquitranes.
	Bajos niveles de partículas en el gas.	Potencial formación de canales.
	Alta eficiencia térmica.	Potencial formación de canales.
<b>Corrientes paralelas (Downdraft)</b>	Bajo contenido de alquitranes en el gas obtenido.	Sensibilidad al contenido de ceniza de la biomasa.
	Adaptación flexible de producción de gas al tipo de biomasa.	Potencial formación de puentes.
	Baja sensibilidad a los alquitranes. Apropiado para motores.	No aceptan cualquier biomasa (especialmente materiales blandos de baja densidad).
<b>Lecho fluidizado</b>	Aceptan gran variedad de biomasa. Puede funcionar con materiales blandos y de baja densidad. Fácil control de Temperatura.	Alta generación de Alquitrán. Mala respuesta a los cambios de carga. Solo aplicables en rangos de potencia alta.

Fuente. Universidad Nacional de Colombia, 2011.

#### 4.7 APLICACIONES DEL GAS PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN

Debido a la existencia de un amplio rango de procesos de conversión de la biomasa, se pueden obtener diferentes productos finales. Las principales aplicaciones son:

**Generación de electricidad.** Actualmente existe un amplio rango de tecnologías de generación de electricidad de forma renovable que suponen menores costes de generación que mediante la utilización de los gases procedentes de un proceso de gasificación de biomasa, como son la energía eólica, hidráulica y geotérmica. Únicamente hay plantas experimentales y se pone en tela de juicio su rentabilidad.

Sin embargo, este gas se puede utilizar en motores y turbinas para producir electricidad, así como también para la utilización en motores estacionarios con aplicaciones como bombas, molinos, tractores, ventiladores, etc. (Benjamín y Otros. 2006).

**Tabla 4.10.** Límites de concentración de partículas y alquitranes-aplicación en generación de energía.

Aplicación	Máximo contenido de partículas (mg/Nm <sup>3</sup> )	Máximo contenido de alquitranes (mg/Nm <sup>3</sup> )
<b>Combustión directa</b>		(Sin límite)
Producción de gas de síntesis	0.02	0.1
<b>Turbina de gas</b>	<b>0.1-120</b>	<b>0.05-5</b>
Motor de combustión interna	30	50-100
<b>Transporte en tuberías</b>		<b>50-500 para el compresor</b>
Celdas de combustible		<1

Fuente: Instituto de Energía Eléctrica, 2012.

**Producción de combustibles líquidos sintéticos procedentes de gases de síntesis purificados (syngas).** Los que más aplicación tienen son los combustibles producidos del proceso Fischer-Tropsch y el biometanol. Para producir un combustible líquido de hidrocarburos similar a los combustibles procedentes del petróleo a partir de la biomasa, el gas producido es convertido en un gas de síntesis, haciéndolo pasar por una serie de procesos que mejoran su rendimiento. Al no generar un gas de síntesis puramente formado por H<sub>2</sub> y CO, se deben eliminar los componentes adicionales (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, alquitrán e hidrocarburos ligeros). A medida que se incrementa el precio del petróleo, se prevé un aumento mundial de la inversión en la optimización de la producción de estos combustibles (Moreno, J. 2010)

**Uso de la energía térmica generada** en procesos industriales y domésticos mediante la combustión del gas producido, aplicando directamente los gases de síntesis en hornos y calderas, ya que normalmente estos equipos requieren requisitos más bajos en la calidad del gas producido. Se puede utilizar este gas como sustituto del gas natural, incrementando su contenido en metano mediante tratamientos previos.

**Producción de hidrógeno** tras la separación del resto de componentes gaseosos; el hidrógeno tiene multitud de aplicaciones, y se usa ampliamente en refinerías de petróleo para craqueo térmico (romper cadenas de hidrocarburos más pesados), industria de la alimentación y electrólisis del agua, entre otras aplicaciones. En el futuro se estima un incremento de la producción de hidrógeno utilizándolo como reactante para producción de electricidad en pilas de combustible.

## **V. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 MATERIALES**

Como materiales se ha utilizado información bibliográfica y el resultado de otras investigaciones similares.

También se ha utilizado el software Solid Work, especializado para realizar el diseño de equipos, y en este caso específico, se ha usado para el diseño del gasificador de flujo cruzado con ingreso natural de aire.

Por otro lado, para la construcción, se ha utilizado planchas de hierro gris, ángulo ranurado, ladrillo refractario.

### **5.2 METODOS**

1.- Se ha realizado una investigación bibliográfica referido a los tipos de gasificador de lecho fijo, específicamente el de flujo cruzado (cross-draft) con ingreso natural de aire, lográndose determinar las dimensiones físicas de cada una de las partes del gasificador, como son el tanque de combustible, la cámara de combustión primaria, longitud del tiro de ingreso de aire, el quemador secundario, etc.

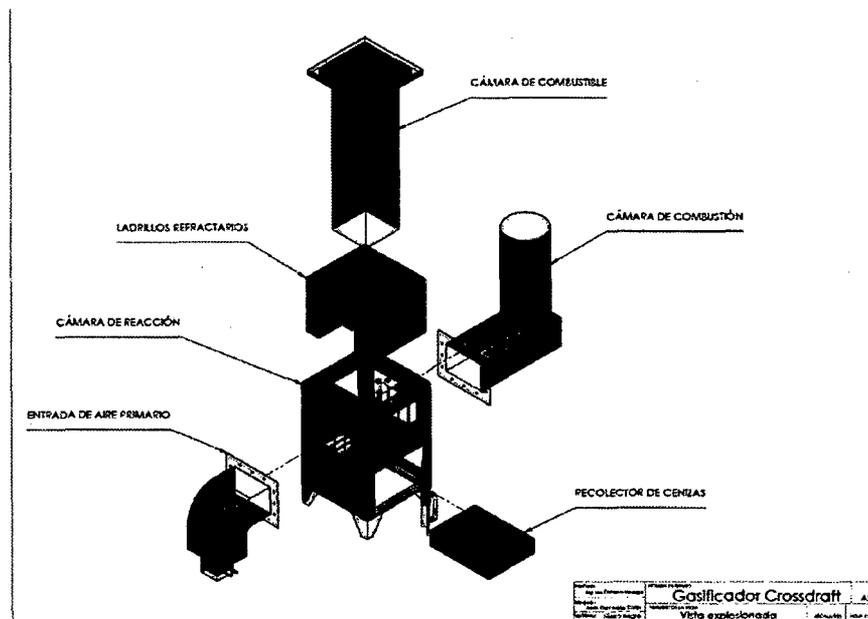
2.- Se dibujó los planos respectivos con el software solid work, obteniéndose el dibujo isométrico, el de planta, el frontal y lateral respectivamente.

3.- Con los planos ya desarrollados, se procedió a la construcción del gasificador, siguiendo las especificaciones del plano.

4.- Con el equipo construido, se procedió a la producción de gas de síntesis haciendo uso de biomasa residual producido en las carpinterías.



Figura 6.2: Vista isométrica expansionada del gasificador cross-draft

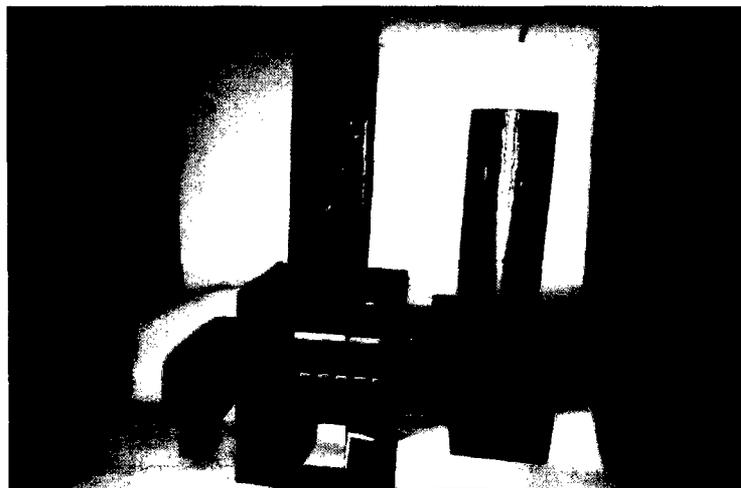


Fuente: Elaboración propia

## 6.2 CONSTRUCCION DEL GASIFICADOR

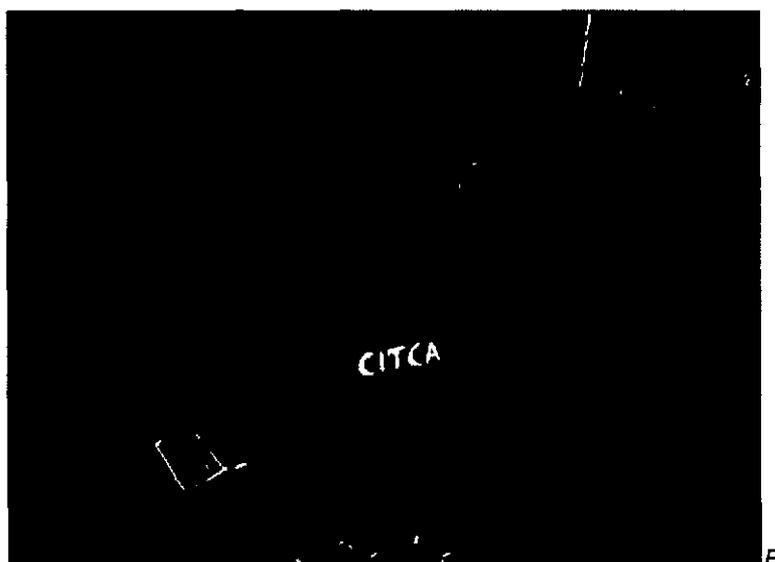
Con todos los planos desarrollados previamente, se ha construido el gasificador de lecho fijo de flujo cruzado con ingreso natural de aire. Dicho trabajo ha sido llevado a cabo en el taller metalmecánico del Ing. Hernan Machuca ubicado en la Urb. San Carlos de Comas.

Figura 6.3: Gasificador cross draft en su etapa final de ensamblado



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.4: Gasificador cross draft ensamblado



Fuente: elaboración propia

### 6.3. PRUEBAS DE GASIFICACION

Con el gasificador ya construido, se ha realizado las pruebas de gasificación, usando como combustible trozos de madera de aproximadamente 5 cm. de lado, obteniéndose el gas de síntesis, el cual fue utilizado para ser usado en el proceso de combustión directa en una cocina mejorada.

Figura 6.5: Proceso de combustión del gas de síntesis



Fuente: elaboración propia

## **VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **7.1 LA REVISION BIBLIOGRAFICA**

Se ha realizado un estudio bibliográfico sobre los tipos de gasificadores, siendo los principales tipos, los de lecho fluidizado, los de lecho circulante y los de lecho fijo. Estos últimos pueden ser aplicados a capacidades pequeñas y medianas y son de tres tipos: de flujo ascendente, relativo al flujo del gas de síntesis (up draft), de flujo descendente (down draft) y de flujo cruzado (cross draft). Para la aplicación escogida, es decir la combustión directa del gas, se ha escogido el gasificador de lecho fijo de flujo cruzado con ingreso natural de aire, cuyo producto gaseoso obtenido es de fácil aplicación como combustible directo.

### **7.2.- DESARROLLO DE PLANOS**

Se ha utilizado el software SOLID WORK para el desarrollo de los planos, en vista isométrica y sus vistas auxiliares (alzado, frontal y lateral), para lo cual ha sido preciso matricularse en el curso respectivo, que ha facilitado de una manera sustancial el respectivo diseño. Por otro lado, para efectos de una exposición, se cuenta con la simulación del proceso, que permite visualizar y entender de una mejor forma, los fenómenos físicos y químicos que se llevan a cabo dentro del gasificador.

### **7.3.- CONSTRUCCION DEL GASIFICADOR**

La construcción del gasificador cross draft ha implicado varios aspectos tales como:

- Selección del taller de construcción: No todos los talleres metalmecánicos, están dispuestos a construir un equipo nuevo sobre el que no han tenido experiencia alguna.
- Selección de materiales: Se ha seleccionado los materiales que sean estructuralmente resistentes a temperaturas elevadas; el aislante apropiado estándar existente en el mercado, capaz de soportar temperaturas del orden de 1000°C.

- La cámara de combustión primaria se ha construido de tal forma que es capaz de hacer una combustión total de la materia orgánica, generando un residuo fino de cenizas de carácter alcalino.

#### **7.4.- PRUEBAS BASICAS DE GASIFICACION**

El gasificador construido fue sometido a pruebas básicas de gasificación, para lo cual se cargó la tolva con 10 Kg. de biomasa (trozos de madera de sección cuadrada) de 5 cm. de lado. El encendido se realiza por la parte inferior prendiendo fuego sobre papel o un trozo de tela empapada con combustible líquido. Dichos materiales se introducen en primer lugar en el gasificador y sobre este material se carga la madera. El encendido dura unos tres a cuatro minutos. Luego de este tiempo se estabiliza el proceso de producción del gas de síntesis. La calidad del gas de síntesis se expresa en términos de la composición del gas de salida que básicamente contiene monóxido de carbono, hidrogeno, metano, dióxido de carbono, hidrocarburos (alquitranes), vapor de agua, etc.

Se obtuvo en un principio una llama intermitente de color negruzco, esto debido fundamentalmente a la relación inadecuada entre el aire y el combustible. Dicha relación se regula abriendo o cerrando el ingreso de aire con la manivela que se encuentra en el sistema de alimentación de aire.

Luego de la regulación del flujo de entrada de aire, se obtuvo una llama azul potente que permitió hervir un volumen grande de agua en un tiempo relativamente corto.

El consumo de combustible fue de 10 Kg. en 40 minutos, lo que indica que la producción de gas es bastante elevada, suficiente para hacer funcionar una gran cocina industrial.

Dada las limitaciones de equipamiento, no se pudo realizar la evaluación de eficiencia térmica del gasificador, por lo que se recomienda la continuación de dicho trabajo de determinación de la eficiencia térmica y calidad del gas obtenido.

## VIII. REFERENCIALES

- 1.- [http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos\\_documentos/Biomasa.pdf](http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Biomasa.pdf)
- 2.- **“ENERGÍA DE LA BIOMASA”**. 2008. Disponible en: <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2008/10/energia-de-la-biomasa.pdf>
- 3.- **Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**. “LA BIOMASA”. Revista Solarísate. Madrid. España. 2007.
- 4.- **Fortalecimiento para la Capacidad en Energía Renovable para América Central (FORCER)**. “MANUAL SOBRE ENERGÍA RENOVABLE”. San José. Costa Rica. 2002.
- 5.- **Coordinación de Energías Renovables, Secretaría de Energía**. “ENERGÍA RENOVABLE 2008-ENERGÍA BIOMASA”. República de Argentina. 2008.
- 6.- **Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**. “ENERGÍA DE LA BIOMASA”. Madrid. España. 2007.
- 7.- **Logic-Energy**. 2013. Disponible en: [http://www.logicenergy.es/es/pdf/logic\\_energy\\_gas\\_info.pdf](http://www.logicenergy.es/es/pdf/logic_energy_gas_info.pdf)
- 8.- **Rodríguez, D.** “POLIGENERACIÓN A PARTIR DE CARBÓN Y BIOMASA MEDIANTE LA SÍNTESIS DE FISCHER-TROPSCH” Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Mecánica. Medellín. Colombia. 2013.
- 9.- **Vargas C.** “ESTUDIO COMPARATIVO DE LA UTILIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN DOWNDRAFT Y LECHO FLUIDO BURBUJEANTE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN APLICACIONES DE BAJA POTENCIA”. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Ingeniería Energética. España. 2012.
- 10.- **Rincón, S. Gómez, A. Klose, W.** “GASIFICACION DE BIOMASA RESIDUAL DE PROCESAMIENTO AGROINDUSTRIAL”. Universidad de Kassel. Kassel. Alemania. 2011.
- 11.- **Moreno, J.** “SIMULACIÓN DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA EN LECHO FLUIDIZADO BURBUJEANTE”. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2010.
- 12.- **Meléndez, B. Rodríguez, A. Urrutia, G.** “IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LA GASIFICACIÓN PARA OPERAR EN LOS BENEFICIOS DEL CAFÉ”. Universidad de Centroamérica JOSE SIMEON CAÑAS. San Salvador. El Salvador. 2006.

13.- Combustión vs Gasificación, disponible en:

<http://agroensa.com/static/docs/2375RESUMEN%20DE%20LA%20TECNOLOGIA%20DE%20GASIFICADOR.pdf>

14.- <http://www.bdigital.unal.edu.co/4133/1/291461.2011.pdf>

15.- **Biling, A.** "GASIFICACION DE BIOMASA", 2009.. disponible en:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20097/fichero/CAP%C3%8DTULOS%252FC-2.+GASIFICACI%C3%93N+DE+BIOMASA.pdf>

16.-**Espinoza, J.** EVALUACIÓN DE LA CADENA DE PRODUCTIVA PARA LA POTENCIAL IMPLEMENTACIÓN Y FABRICACIÓN DE SISTEMAS DE GASIFICACIÓN DE CARBÓN A ESCALA INDUSTRIAL EN COLOMBIA. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia. 2011.

17.-

[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf)

18.

<http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/805/1/POLIGENERACION%20MEDIANTE%20LA%20SINTESIS%20DE%20FISCHER-TROPSCH.pdf>

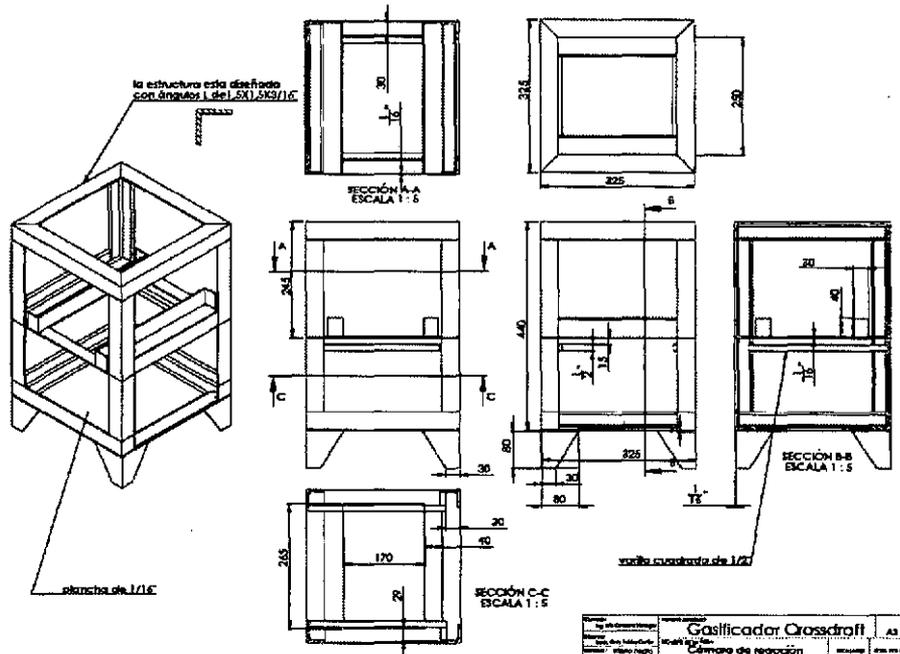
19. **Urien Pinedo, Andrea;** "OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL"; Tesis de Maestría; Universidad Nacional de Educación a Distancia Facultad de Ciencias Departamento de Ciencias Analíticas; 2013.

20. <https://www.youtube.com/watch?v=GWY1zrAL35M>.

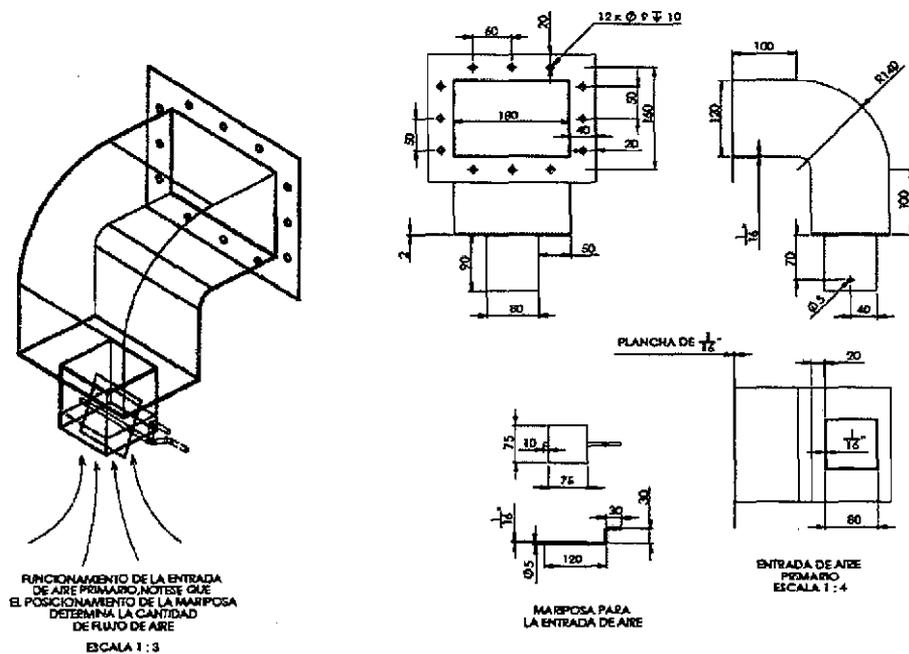
21. Gómez A, Klose, W.; "Pirolisis de la Biomasa", Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatronica de la Universidad Nacional de Colombia; Instituto de Ingeniería Térmica, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Kassel, Alemania, 2008.

## IX. APÉNDICE

### 9.1. Plano de la estructura del quemador primario



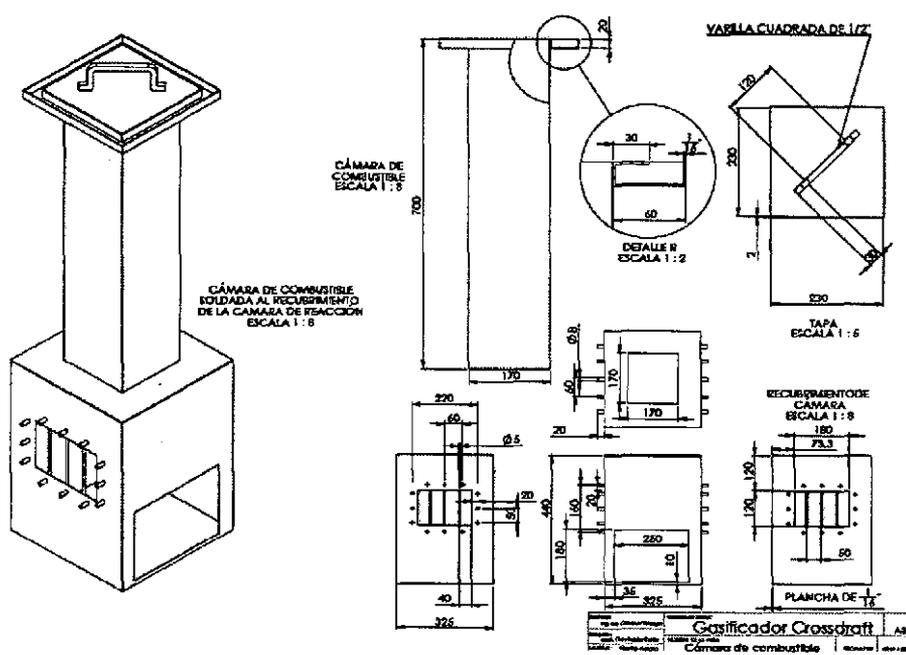
### 9.2. Plano del sistema de suministro de aire con flujo natural



Proyecto	Gasificador Crossdraft	AS
Autores	Equipo de Ingeniería	
Revisado	Cámara de revisión	
Fecha		

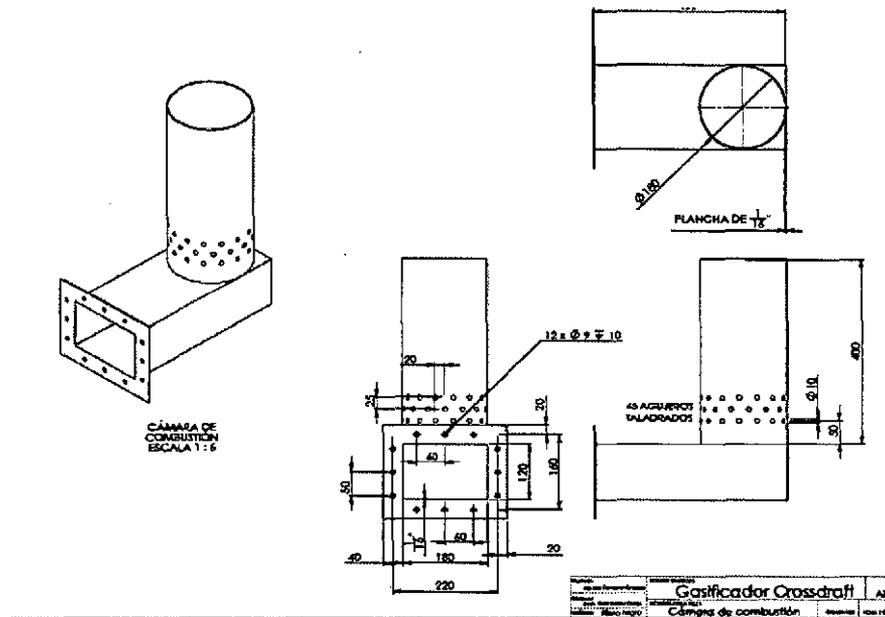
Fuente: elaboración propia

### 9.3. Plano de la cámara de alimentación y combustión primaria



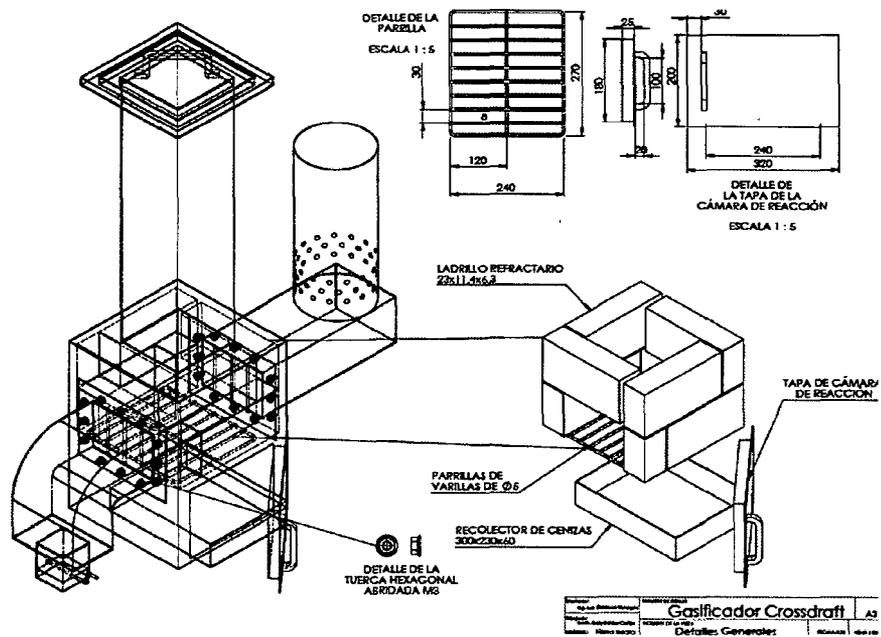
Fuente: elaboración propia

### 9.4. Plano de la cámara de combustión secundaria



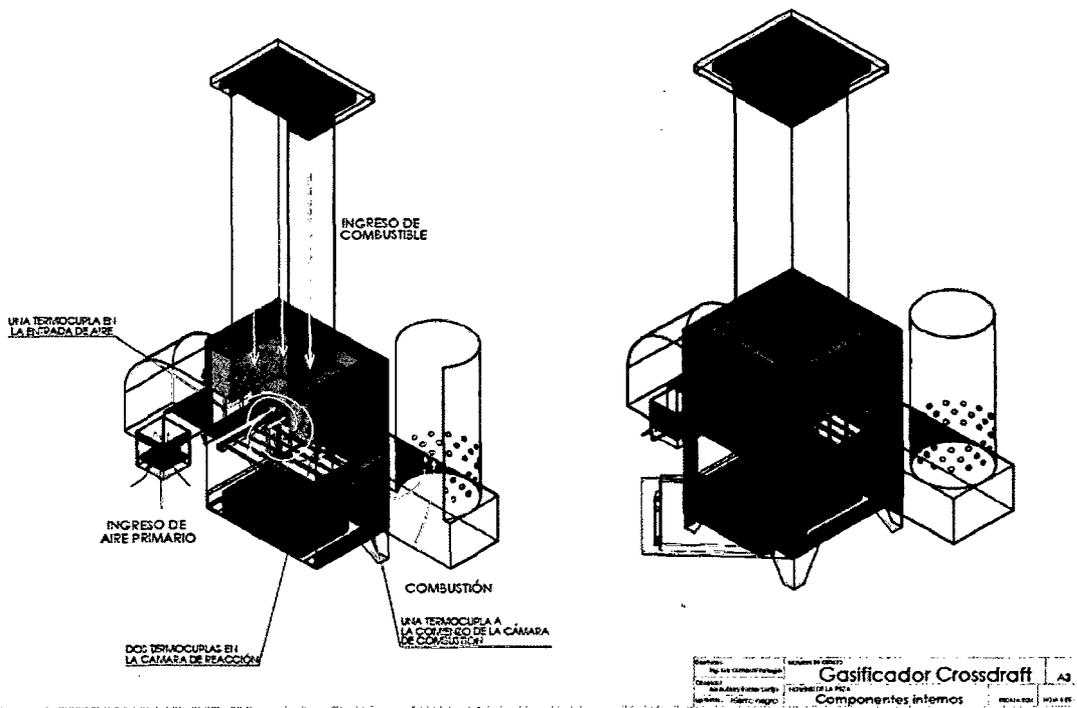
Fuente: elaboración propia

### 9.5. Plano de detalles generales



Fuente: elaboración propia

### 9.6. Plano de componentes internos del gasificador



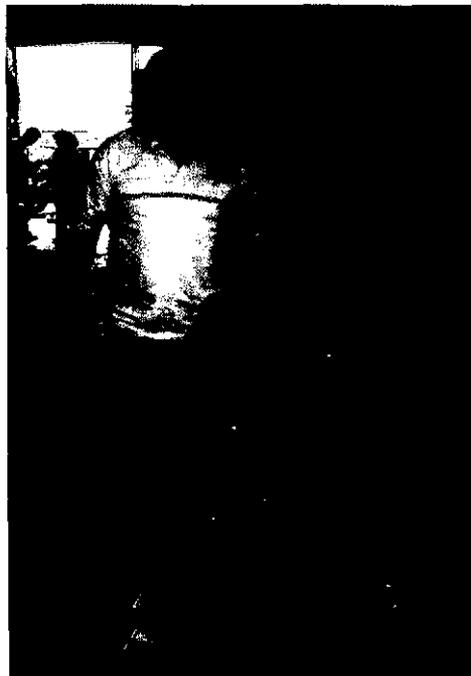
Fuente: elaboración propia

**9.7. Construcción de la cámara de combustión primaria**



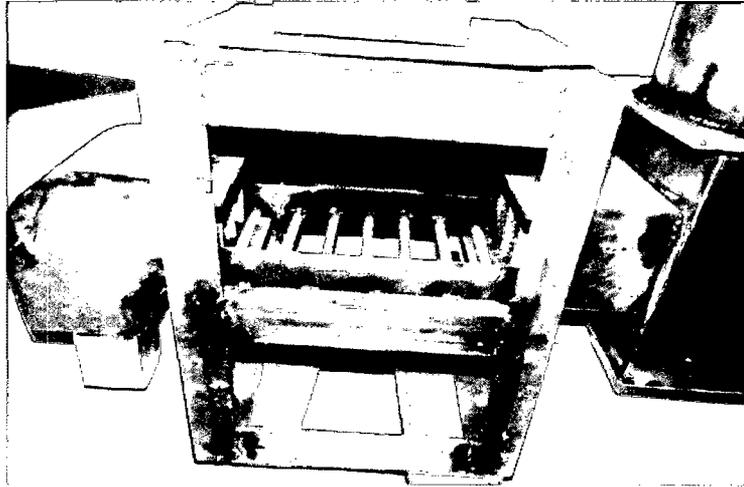
*Fuente: elaboración propia*

**9.8. Supervisión de la construcción de la cámara de combustión primaria**



*Fuente: elaboración propia*

**9.9. Ensamblado del sistema de admisión de aire, cámara de combustión primaria y cámara de combustión secundaria.**



*Fuente: Elaboración propia*

**9.10. Inicio de las pruebas de gasificación y combustión**



*Fuente: Elaboración propia*

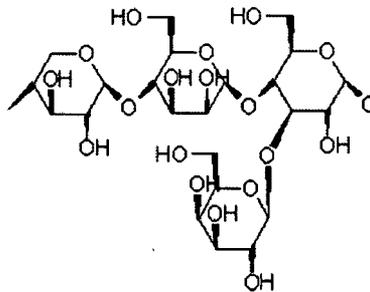
9.11. Pruebas de gasificación y combustión. Al inicio, la llama es negra, luego, cuando se estabiliza el sistema, la llama se torna roja.



*Fuente: Elaboración propia*

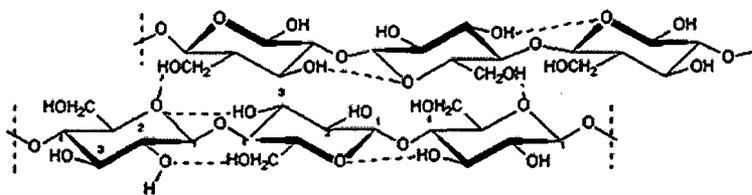
## X. ANEXOS

**10.1 Estructura química de la hemicelulosa:** Es una cadena lineal con numerosas ramificaciones formada por varias unidades de azúcares diferentes tales como: D-xilosa, L-arabinosa, D-glucosa, D-galactosa, D-manosa, ácido glucurónico, que se unen en diferentes proporciones, al azar en una estructura amorfa.



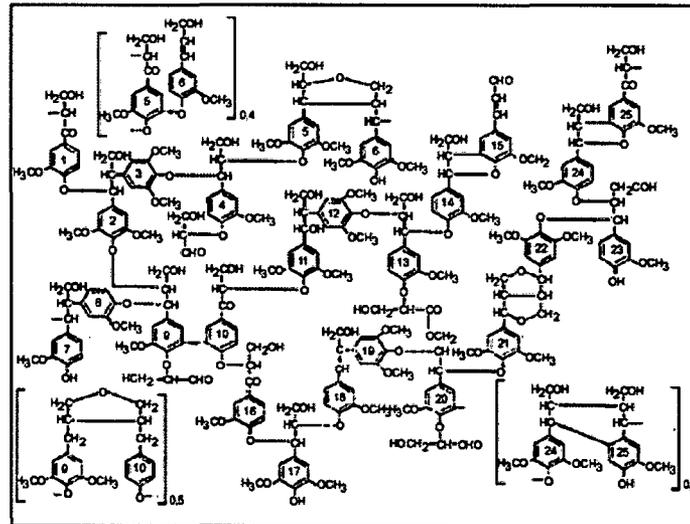
*Fuente: Andrea Urien Pinedo, 2013*

**10.2 Estructura química de la celulosa:** Al contrario que la hemicelulosa, esta constituida por estructuras cristalinas (altamente ordenadas) y samorfias (desordenadas). Entre ellas no existen fronteras bien definidas. La celulosa es un homopolisacarido lineal, sin ramificaciones, formada por hasta 15000 unidades de glucosa.



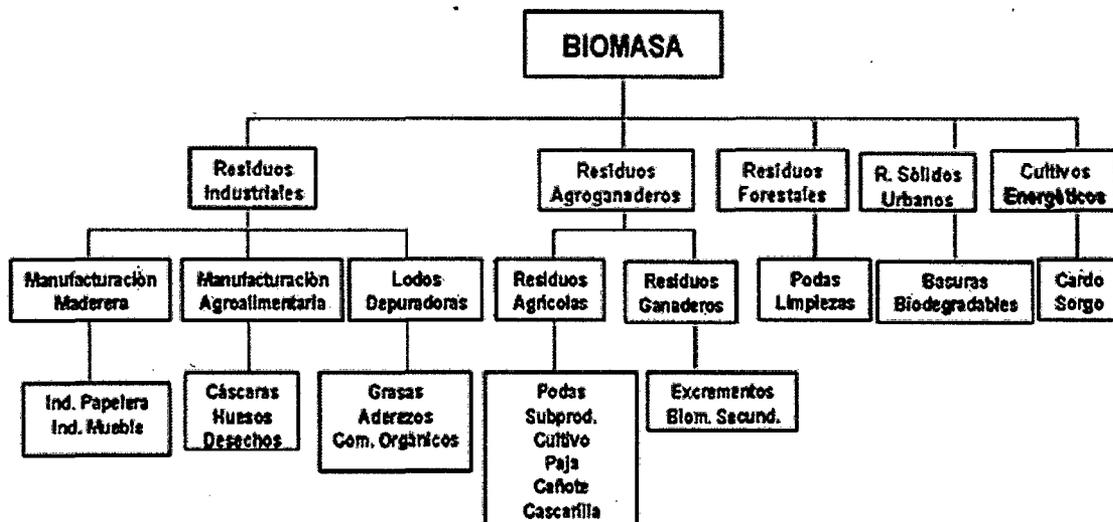
*Fuente: Andrea Urien Pinedo, 2013*

**10.3 Estructura química de la lignina:** Es una molécula poli fenólica, física y químicamente heterogénea, amorfa y formada completamente por anillos aromáticos ramificados a partir de la polimerización y deshidrogenación de monómeros de fenilpropanoides, coniferilico, sinapilico y alcoholes cumarinicos.



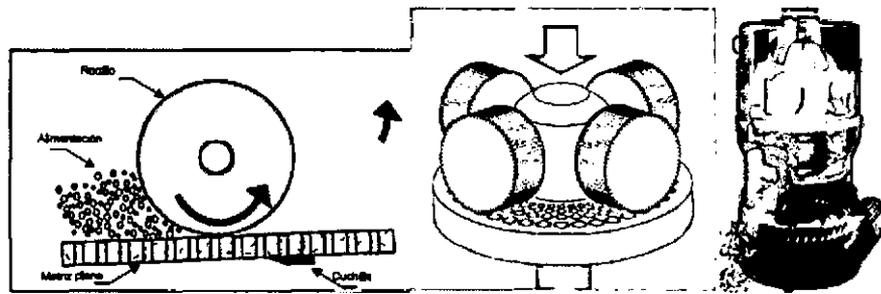
Fuente: Andrea Urien Pinedo, 2013

**Anexo 10.4 Clasificación de la biomasa residual:** Otra manera de clasificar la biomasa residual, en función al origen, es decir, de tipo industrial, agroganadero, urbano y energético.



Fuente: Billing, A., 2009

**Anexo 10.5:** Proceso de obtención de briquetas a partir de residuos forestales



a) Esquema del peletizador    b) Vista principal del peletizador    c) Vista del peletizador completo

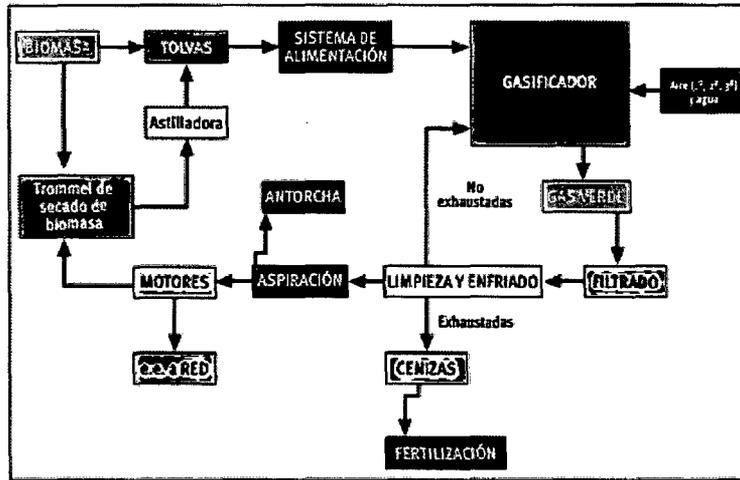
*Fuente: Meléndez, B., 2006*

**Anexo 10.6:** Residuo forestal transformado en pelets: En la figura se observa la transformación de la biomasa residual en sus respectivos pelets.



*Fuente: Meléndez, B., 2006*

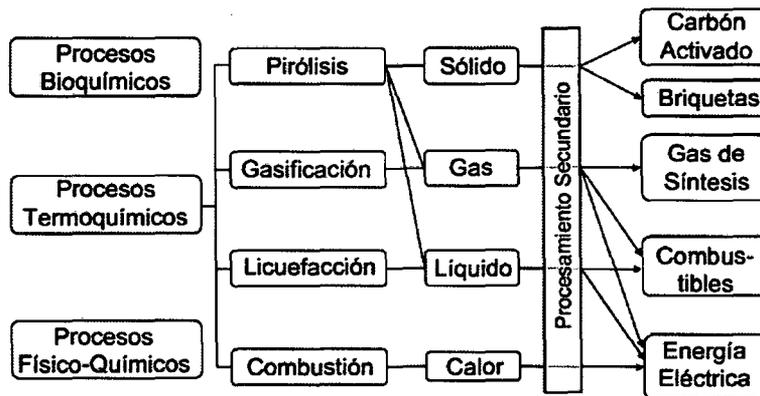
**Anexo 10.7:** En la figura adjunta, se muestra el proceso de tratamiento de la biomasa, su conversión en energía y su utilización en la producción de energía eléctrica.



Fuente: Biomasa, Gasificación, disponible en:

[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf)

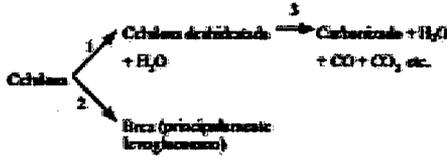
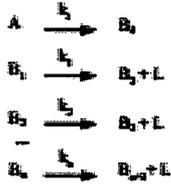
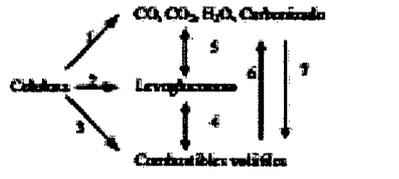
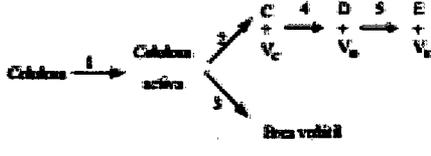
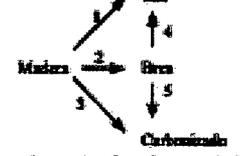
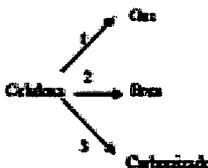
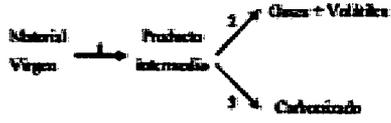
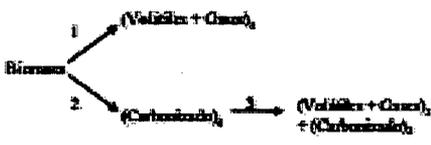
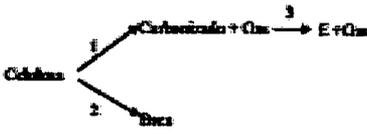
**Anexo 10.8:** Proceso de tratamiento de los productos de la pirólisis de la biomasa.



Fuente: Gomez, A. ; Klose W. 2008



Anexo 10.11: Modelo cinético del proceso de gasificación de la biomasa residual..

 <p>1. Kilar - Boudry; 1968</p>	 <p>2. Reacción en cadena, Chatterjee y Cooray; 1966</p>
 <p>3. Tres reacciones primarias competitivas; Shafiqzadeh; 1968</p>	 <p>4. Reacciones competitivas; Aronson; 1971</p>
 <p>5. Reacciones competitivas; Boudry et al.; 1971, 1975</p>	 <p>6. Tres reacciones primarias y dos secundarias. Shafiqzadeh; 1977 Ejemplado por: Thauer y Mann; 1981; Krüger et al.; 1985; Frost et al.; 1990; Ghadi y Mahran; 1999</p>
 <p>7. Boudry - Shafiqzadeh; Bradbury et al.; 1979. Ejemplado por: Di Bilio, 1996 (con una reacción posterior a la lignina para formar gas)</p>	 <p>8. Modelo reacciones independientes; Agrawal; 1962</p>
 <p>9. Kilar - Boudry modificado; Agrawal; 1962</p>	 <p>(Biomasa) = a(Celulosa) + b(Lignina) + c(Hemicelulosa)</p> <p>10. Modelo de reacción análoga; Korfmann et al.; 1989</p>
 <p>11. Korfmann et al.; 1991</p>	 <p>12. Várbgyi et al.; 1996</p>

Fuente: Gomez, A. ; Klose W. 2008