

Índice

1.	Introducción	4
2.	Contexto energético en Nicaragua. Fundamentos de la utilización de la biomasa como fuente de energía renovable	6
2.1.	Usos energéticos en países empobrecidos, el caso de Nicaragua. Disponibilidad y necesidades	6
2.1.1.	<i>Situación socioeconómica de nicaragua</i>	<i>6</i>
2.1.2.	<i>Producción de energía en Nicaragua.....</i>	<i>7</i>
2.1.3.	<i>Aspectos del uso de los combustibles biomásicos en Nicaragua.....</i>	<i>9</i>
2.2.	Obtención de biomasa.....	11
2.2.1.	<i>Origen de la biomasa</i>	<i>11</i>
2.2.2.	<i>Caracterización de tipos de biomasa apropiadas dependiendo de su localización geográfica. .</i> <i>.....</i>	<i>12</i>
2.3.	Biomasa como forma accesible y renovable de energía.	14
2.3.1.	<i>Características medioambientales del uso de la biomasa. ¿La biomasa es accesible y renovable?</i>	<i>14</i>
2.3.2.	<i>¿Cómo evitar la deforestación derivada de la recolección de leña? Ordenación y medidas para una explotación sostenible de recursos madereros.....</i>	<i>18</i>
2.4.	Componentes químicos de la biomasa.	19
2.5.	Componentes fisicoquímicos de la biomasa desde un punto de vista térmico.	22
2.6.	Componentes estructurales de la biomasa.	22
3.	Tecnologías de conversión de la biomasa.	24
3.1.	Procesos bioquímicos.	24
3.1.1	<i>Digestión anaerobia.....</i>	<i>24</i>
3.1.2.	<i>Fermentación alcohólica.....</i>	<i>24</i>
3.1.3.	<i>Procesos agro-mecánicos.....</i>	<i>25</i>
3.1.4	<i>Obtención de hidrógeno de la biomasa.....</i>	<i>26</i>
3.2.	Procesos térmicos. Concepto de combustión, pirólisis y gasificación.....	27
3.2.1.	<i>Combustión.....</i>	<i>27</i>
3.2.2.	<i>Pirólisis.....</i>	<i>36</i>
3.2.3	<i>Licuefacción.....</i>	<i>36</i>
3.2.4.	<i>Gasificación.</i>	<i>37</i>
4.	Carbonización.....	45

4.1. Procesos de pirolisis. Características

4.1.1. *Productos primarios de la pirolisis.* 45

4.2. Caracterización del proceso de carbonización. (física, química y la fluidodinámica de la reacción) 49

4.2.1. *Reacciones de descomposición que gobiernan la pirolisis de las partículas de biomasa* 49

4.2.2. *Análisis cinético de la pirolisis.*..... 49

4.2.3. *Análisis de la degradación de los componentes de la biomasa sometidos a pirolisis.* 53

4.2.4. *Estudio de parámetros físicos que influyen en la pirolisis* 54

4.3. Estudio de las tecnologías disponibles para producción de carbón vegetal. 62

4.3.1. *Hornos tradicionales de carbonización.* 62

4.3.2. *Medidas técnicas para aumentar la eficiencia*..... 68

4.3.3. *Hornos industriales pirolíticos. Desarrollo de la industria de carbonización brasileña.* 70

5. Modelización..... 79

5.1. Parámetros de entrada 79

5.1.1. *Humedad.* 79

5.1.2. *Masa de biomasa* 83

5.1.3. *Mejora del proceso. Recirculación de los gases (f)*..... 84

5.1.4. *Tiempo de carbonización (d)*..... 86

5.1.5. *Temperatura de carbonización máxima (pico o final)* 87

5.1.6. *Tipos de biomasa utilizada*..... 88

5.1.7. *Datos y constantes de entrada*..... 92

5.2. Energía necesaria para el proceso. 96

5.2.1. *Cálculo de los requerimientos caloríficos del proceso de pirolisis de la biomasa.* 96

5.2.1.1. *Cálculos basados en los resultados experimentales obtenidos de [21]* 96

5.2.1.2. *Comparación de resultados experimentales y modelos matemáticos*..... 99

5.2.2. *Cálculo iterativo de las pérdidas de energía del horno y de las dimensiones del horno* 107

5.2.2.1. *Conversión de biomasa en carbón vegetal y volátiles.* 108

5.2.2.2. *Producción de carbón vegetal y volátiles* 109

5.2.2.3. *Rendimientos de los subproductos de la carbonización*..... 112

5.2.2.4. *Dimensiones del horno* 114

5.2.2.5. *Cálculo de pérdidas por la superficie superior (cubierta)* 115

5.2.2.6. *Cálculo de pérdidas por la superficie inferior (suelo)*..... 118

5.2.2.7. *Cálculo de pérdidas por los humos expulsados al exterior.* 119

5.2.2.9. *Cálculo de pérdidas por el escape de gases* 124

5.2.3. *Calor total necesario para llevar a cabo el ciclo de carbonización en condiciones reales.* 126

5.3. Cálculos económicos locales en el tercer mundo 127

5.3.1. *Generalidades* 127

5.3.2.	<i>Análisis 1: Tanzania en 1990.</i>	127
5.3.3.	<i>Análisis 2. Senegal</i>	128
5.3.4.	<i>Estudio en horno de ladrillos de arcilla en monte de sabana para rendimientos.</i>	129
5.4.	Parámetros de salida	131
6.	Resultados obtenidos de la ejecución del programa	133
6.1.	Influencia de la mejora del proceso	133
6.2.	Influencia de la humedad	138
6.3.	Influencia del tamaño del horno	144
6.4.	Influencia del tipo de biomasa	146
7.	Conclusiones	147
8.	Referencias bibliográficas	150

1. Introducción

La producción de carbón vegetal a partir de leña es una práctica muy extendida en el entorno rural en países empobrecidos. La biomasa es el recurso energético más utilizado por la población de los países subdesarrollados a nivel mundial.

En general tanto la producción de carbón vegetal como su combustión en los hornos domésticos del carbón vegetal o de la biomasa directamente suele tener unos rendimientos muy bajos. Esta ineficiencia energética afecta de manera negativa en el agravamiento de problemas medioambientales, como la deforestación, y de problemas de salud en los entornos domésticos, como es la contaminación. Se plantea la necesidad de erradicar este uso ineficaz. Sin embargo, no hay que olvidar que en la actualidad son una fuente de negocio y de subsistencia, aparentemente irrenunciable para estas comunidades rurales, cuyos recursos económicos son especialmente escasos.

El objetivo principal del presente proyecto es el estudio de los procesos térmicos que intervienen en la carbonización de la madera para estudiar los límites de diseño de las carboneras, sus costes y viabilidad. Se trata de estudiar que perspectivas tiene el carbón vegetal para la producción de energía frente a combustibles fósiles y a otras energías renovables. Así mismo se pretende dar una visión sobre la tipología de hornos utilizados en países en desarrollo y sus ventajas e inconvenientes.

Este dossier está dividido en 5 capítulos principales. Dado que el proyecto se engloba en un trabajo global dedicado a mejorar las condiciones de comunidades rurales en Nicaragua, en el siguiente capítulo se explica cuál es la situación energética de este país centroamericano. Así mismo se abre un apartado dedicado al origen de la biomasa y a los efectos positivos y negativos que puede tener la biomasa en los países en vías de desarrollo.

En el tercero, se hace una revisión del estado del arte de los procesos térmicos de transformación de la biomasa, con especial atención a la combustión y gasificación. La combustión de biomasa ha sido y es parte fundamental de la obtención de energía en comunidades rurales en países en desarrollo. Por otro lado, los gasificadores downdraft de pequeña escala es una línea de trabajo con grandes perspectivas como tecnología apropiada.

En el cuarto capítulo, se explica el historial, el estado del arte y las posibilidades futuras de la pirolisis y más concretamente de la carbonización. Se trata de exponer que perspectivas se podrían desarrollar en este campo en los próximos años.

En el quinto capítulo se desarrolla la modelización en MatLab ® de la carbonización de 3 tipos de biomasa en un horno de parvas. El objetivo es estudiar como aumentar su eficiencia incidiendo en las propiedades de la biomasa y características del horno que afectan al rendimiento y calidad energética de los

subproductos del horno, principalmente carbón vegetal. Así mismo se describe como se han programado las necesidades energéticas del horno. Estas tienen una gran importancia dado que el horno consume parte de su carga en proporcionar energía para llevar a cabo la carbonización en el resto del horno.

Para terminar, en el capítulo sexto se han incluido ejemplos y resultados prácticos del modelo, y en el capítulo séptimo se resumen las conclusiones alcanzadas.

El trabajo realizado en este proyecto se enmarca en el desarrollo de tecnologías apropiadas. Se busca que los avances tecnológicos posean la suficiente adecuación moral y técnica, la adecuación a las normas y condiciones culturales, socioeconómicas y políticas de una determinada comunidad (que puede ser diferente a aquella en la que se genera la tecnología). Debe aumentar las capacidades de una comunidad y en consecuencia aumentar sus grados de libertad. Se debe buscar la maximización de la eficiencia en un contexto de recursos cada día más limitados.

Otra característica importante es la sostenibilidad, sobretodo debido al mundo en el que vivimos, donde cada vez hay menos recursos. Se apoya en el factor social (la búsqueda de una estructura justa y estable), el factor medioambiental, evitando la degradación de los ecosistemas y el factor económico, proporcionando bienestar y consumo adecuados a la comunidad.

Es imprescindible tener presente que la aplicación directa de tecnología actual de países desarrollados o tecnología de épocas de menor desarrollo en la mayoría de los casos no es viable ni apropiada, ya que genera dependencia tecnológica. Se debe promover el desarrollo local de tecnología a través de la educación y la financiación para conseguir una verdadera transferencia de tecnología.

2. Contexto energético en Nicaragua. Fundamentos de la utilización de la biomasa como fuente de energía renovable

2.1. Usos energéticos en países empobrecidos, el caso de Nicaragua. Disponibilidad y necesidades

2.1.1. Situación socioeconómica de nicaragua

Nicaragua posee el Producto Interno Bruto por habitante más bajo de Centroamérica, alcanzando 482.4 \$ estadounidenses en el año 2000, a diferencia de 1,522.7 \$ correspondiente a la media de la región, y considerablemente por debajo de 710 \$ correspondiente a Honduras, país que le sigue en la escala. El 70% de la población de Nicaragua es pobre, correspondiendo 64% a la población urbana y 77% a la población rural, mientras que el nivel de indigencia alcanza al 45%. Por su parte, el índice de desarrollo humano de Nicaragua, pese a su bajo valor de PIB por habitante, resulta muy similar al de Guatemala y ligeramente superior al de Honduras, dado por el mayor gasto social relativo por parte del gobierno.



Figura 2.1. Mapa político de Nicaragua

La tasa de crecimiento demográfico alcanza junto con Honduras los valores más altos de la región, ascendiendo al 2,7 % anual en el quinquenio 1995-2000 para Nicaragua. Nicaragua es el segundo país de la región de menor densidad de población, ligeramente por encima de Panamá (39,0 y 37,8 hab./Km² respectivamente), mientras que la media de Centroamérica es 78.6 hab./Km². La población urbana en el país alcanza al 55.3 % de la población, siendo para Centroamérica 47.9%, lo cual muestra un grado de urbanización relativamente mayor que la media de la región.

2.1.2. Producción de energía en Nicaragua

2.1.2.1. Energía Primaria

En Nicaragua, históricamente la producción de energía primaria ha estado constituida básicamente por Hidroenergía, Geoenergía y Biomasa (principalmente leña y residuos vegetales). La principal fuente de energía primaria en Nicaragua es la Biomasa, en el año 2000 los porcentajes de producción de energía primaria por fuente fueron los siguientes: 83.1% de leña, 16.9% de residuos vegetales, 8.7% de Geoenergía y el 3% de Hidroenergía.

El Instituto Nicaragüense de Energía (INE) estimó en 1998 que el consumo de leña fue de 2.898.550 m³ de madera equivalente a 2.000.000 Tn /año, siendo los principales usuarios de leña el sector residencial, el cual consumió 93,4%. A nivel nacional la producción de energía primaria durante el año 1998 alcanzó el orden de los 1.503,4 miles de TEP (8,2% menos que el consumo).

2.1.2.2. Energía Secundaria

En el año 2000 los derivados del petróleo representaron el 79,7%, seguido por la energía eléctrica con el 18,6% y el 1,6% restante pertenecientes al carbón vegetal. La energía secundaria que se obtuvo en los centros de transformación a partir de fuentes primarias, el total obtenido le correspondió a los derivados de petróleo el 94,4%, electricidad el 3,7% y por último carbón vegetal con el 1,9%.

Respecto a la generación bruta de energía eléctrica del sistema eléctrico a nivel nacional (público y privado) para el año 2000 las fuentes fueron: 81% térmica, 9% hidroeléctrica, 6% geotérmica y 4% de Auto-productores (térmica).

2.1.2.3. La Red de Energía eléctrica

En Nicaragua, las redes de energía eléctrica llegan casi exclusivamente a la parte sur-oeste del país, la cual es el área concesionada. De la situación actual en cuanto a electrificación se puede decir que:

- El 60% de la Población del Área Concesionada dispone de energía eléctrica.
- El 21% de la población fuera del Área Concesionada dispone de energía eléctrica.
- Aproximadamente el 70% de los hogares en el área concesionada consumen un máximo de 100 Kwh. /mes.
- En el Área no Concesionada el consumo promedio corresponde a 37 Kwh. /mes.
- Índice de Electrificación Nacional 48%. (2000)

En total, la red de electrificación en el área concesionada cuenta con 48 subestaciones y 4 plantas. El índice de electrificación nacional no llega al 50%.

2.1.2.4. Ingenios azucareros

Actualmente en Nicaragua, los ingenios azucareros constituyen una alternativa de sustitución en la generación de energía eléctrica a partir de biomasa, en particular al desarrollar la dendroenergía. De acuerdo a la tabla 2.1., observamos que a mediados de los años 90 el total de electricidad generada por los ingenios azucareros fue de 39.862.997 Kwh., lo que significaba aproximadamente 2,5% del total de energía eléctrica generada en el país.

Ingenios	Combustible utilizado			Electricidad generada (kWh)
	Leña (Tm)	Bagazo (Tm)	Fuel oil (Gls)	
San Antonio		355.742	1.983.379	20.734.332
Victoria de Julio	2.015,9	82.214		10.468.263
Germán Pomarez	444	93.288	4.469	5.456.002
Julio Buitrago		40.682		3.200.000
Javier García	421	45.695		1.100
Benjamín Zeledón	240	69.425		3.300
Total	3120,9	687.046	1.987.848	39.862.997

Tabla 2.1. . Producción de energía eléctrica a partir de biomasa y fuel oil en los ingenios azucareros de Nicaragua (Zafra 95/96).

Un presupuesto energético típico, en un país en vía de desarrollo, depende mucho de la leña y del carbón vegetal, para la cocina y la calefacción doméstica. Los tres

principales aspectos a tomarse en cuenta, cuando se formula una política energética para la leña son:

- Las dimensiones actuales y características del recurso maderero y de su futuro desarrollo.
- El esquema actual del consumo de leña y de carbón vegetal, y su posible desarrollo futuro.
- Cómo se produce y distribuye la oferta actual, y qué posibilidades hay de racionalización y mejora.

Al analizar el diagnóstico de la leña y energía en Nicaragua se observa que es necesario formular una política global y coherente del sector energético, de tal forma que la leña sea vista como un recurso energético con toda su potencialidad y no como se mira actualmente, como un registro estadístico y una energía apta sólo para cocción de alimentos y para la industria artesanal.

Existe un déficit en la generación de electricidad, lo que propicia un mercado favorable para otras fuentes de energía, que estimula al sector privado a buscar inversiones en alternativas de generación con baja inversión por MW instalado utilizando tecnologías adecuadas y no de punta. Esto último se logra con fuentes alternativas que no tenga el impacto económico y ecológico que tienen las presas hidroeléctricas y las plantas eléctricas derivadas de petróleo.

En Nicaragua se espera que la dendroenergía, pueda tener un impulso de desarrollo a través de plantaciones energéticas como lo están desarrollando los ingenios azucareros, para generación de energía a partir de biomasa.

2.1.3. Aspectos del uso de los combustibles biomásicos en Nicaragua

2.1.3.1. Ambientales

El uso eficiente de la biomasa forestal para la producción de energía genera ventajas ambientales sobre la utilización de combustibles fósiles:

- Bien manejada, constituye un recurso natural renovable, y una fuente permanente de energía.
- Recuperar grandes áreas ganaderas y agrícolas marginales a la actividad productiva.
- El aprovechamiento de energía producida a partir de biomasa forestal, podrá aportar una contribución de mantener un equilibrio provechoso entre la liberación de CO₂ y la fijación fotosintética del carbono.

2.1.3.2. Económicos

A menudo se da una autosuficiencia energética lo que incide positivamente en el costo de producción de azúcar. Por otra parte, las industrias actualmente emplean técnicas ineficientes que provocan pérdida energética y mayor utilización de leña.

También hay una falta de líneas de crédito que apoyen el establecimiento de plantaciones para autoabastecimiento de leña y para el desarrollo tecnológico que mejore la eficiencia de este recurso energético. Las altas tasas de interés no incentivan a la empresa privada a invertir en plantaciones con fines energéticos.

2.1.3.3. Técnicos

Existen bastantes carencias:

- Falta de conocimiento sobre el manejo y comportamiento de rebrotes en las plantaciones energéticas, que permita el uso sostenible del recurso.
- Falta de personal capacitado para brindar la asistencia necesaria para un empleo adecuado del recurso forestal para leña.
- La escasez del recurso forestal para leña obliga al productor y al consumidor a utilizar cualquier especie, provocando efectos sobre especies en extinción.
- Niveles de investigación muy deficientes en materia de bosque, plantaciones y desperdicios energéticos.

2.1.3.4. Legales

Como no está bien definida la propiedad de la tierra, los propietarios no se atreven a invertir en la actividad forestal. Las leyes forestales y ambientales que rigen en el país no incentivan el desarrollo de plantaciones con fines de producción energética, ni el uso de tecnologías apropiadas para mejorar la eficiencia del uso de la leña como alternativa de sustitución energética.

2.1.3.5. Sociales

Hay ausencia de una cultura para el aprovechamiento permanente del bosque y plantaciones energéticas y además los programas dendroenergéticos no han tenido apoyo en el área rural.

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

2.2. Obtención de biomasa.

2.2.1. Origen de la biomasa

Biomasa es cualquier tipo de materia orgánica cuyo origen inmediato sea un proceso biológico, vegetal o animal. Hay una gran variedad de la materia orgánica en cuanto a orígenes, composición y modos de recolección y tratamiento. Dentro de la biomasa vegetal se diferencian 3 grupos: lignocelulósica (paja, leña,...), amilácea (patatas, cereales,...) y azucaradas (remolacha,...).

- Maderero

La madera sigue siendo la materia prima preferida y más ampliamente empleada, desde el punto de vista de la disponibilidad, de las propiedades del carbón vegetal final, y por sanos principios ecológicos, y parece que no hay motivos para que esta situación cambie en el futuro. Se emplean a veces para producir carbón vegetal otros materiales leñosos, como cáscaras de nueces y cortezas.

- Herbáceo

Figura 2.2 Miscanthus



- Residuos sólidos urbanos.

Se separan los materiales inorgánicos (vidrios y metales) y se someten a procesos térmicos a la fracción orgánica. Su atractivo radica en que los RSU que son difíciles de gestionar, pueden convertirse en productos líquidos. Así el bioaceite o el slurry de carbón de agua o aceite tienen ventajas en relación con el transporte, el almacenamiento, la combustión, la flexibilidad o la adaptación.

- Residuos procesados de comida

- Residuos agrícolas e industriales

El carbón que resulta es un polvo fino que debe generalmente ser aglomerado en briquetas, a un costo adicional, para la mayoría de los usos del carbón. De todos modos, estimular un uso más amplia de los residuos de las cosechas para la producción de carbón vegetal o aún para combustible, no es generalmente una práctica agrícola, si bien se ha realizado, como parte de una política agrícola racional, la quema de bagazo de caña de azúcar para proporcionar calor en la producción de azúcar, así como la quema

en algunas regiones de los tallos de maíz y de pastos bastos para combustible casero, para suplir un beneficio general.

- Cultivos energéticos.

Cultivos vegetales de ciclo corto y con alto poder calorífico. Su uso es discutible, ya que su rentabilidad no es muy alta y además pueden suponer competencia.

- Plantas acuáticas y algas

Se trata de cultivo de algas unicelulares, algas marinas y plantas superiores, que pueden desarrollarse en granjas marinas o estanques o recolectarse.

- Desperdicios animales.

Para muchas familias pobres en zonas rurales y urbanas recoger estiércol es una fuente de ingresos. El estiércol tiene ciertas características positivas por las cuales es considerado un buen combustible: arde lentamente, genera un potente calor comparado a otras fuentes de combustibles locales, es fácil de almacenar y menos toxicidad. Tiene ciertos problemas asociados, el principal la escasez. Además, mientras que se seca el estiércol hay riesgo de que sea robado. Arde más rápidamente que la madera si no es comprimido adecuadamente y en muchos casos propietarios del ganado no permiten la recogida en sus tierras.

2.2.2. Caracterización de tipos de biomasa apropiadas dependiendo de su localización geográfica.

Los recursos de biomasa natural varían en cantidad y tipo dependiendo de su localización geográfica. Se puede diferenciar en tres regiones:

- **Regiones templadas.** Se produce madera, residuos de las cosechas, por ejemplo paja u hojas, y residuos animales y humanos. Las especies madereras de crecimiento rápido como el sauce son cortadas cada 2 ó 3 años y cortadas en astillas como combustible para quemadores. También hay multitud de cosechas no madereras que pueden ser cultivadas para la producción de biocombustibles y biogas y la investigación de cosechas energéticas para la combustión directa está progresando.
- **Regiones áridas ó semiáridas.** Hay muy poca vegetación en exceso para combustible. La gente que vive en estas zonas es la más afectada por la desertificación.

- **Regiones húmedas tropicales.** Se produce abundante suministro de madera, residuos de las cosechas, desperdicios animales y humanos, así como residuos provenientes de las actividades comerciales, industriales, y del procesado de alimentos. Las cáscaras de arroz, las de algodón, y las de cacahuete son ampliamente usadas para proveer calor para la generación de energía en particular. El bagazo de la caña de azúcar es procesado para proveer etanol además de ser quemado directamente. Muchas plantas como el girasol y la palma de aceite son procesadas para proveer petróleo para la combustión. Una gran mayoría de los países más pobres se encuentran en regiones húmedas por lo que hay una alta incidencia del uso doméstico de biomasa. Las áreas tropicales son a menudo las más afectadas por la deforestación y la tala.

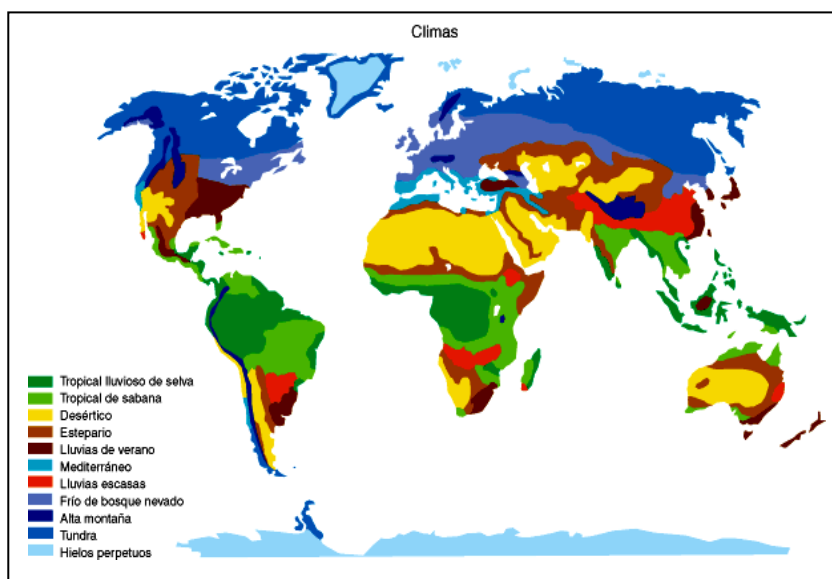


Figura 2.3. Zonas climáticas mundiales

2.3. Biomasa como forma accesible y renovable de energía.

La biomasa es utilizada para satisfacer una amplia variedad de necesidades energéticas, incluyendo generación de electricidad, calefacción doméstica, combustible para vehículos y suministro de calor a las instalaciones industriales. El aumento de eficiencia en todos estos casos supone una necesidad. La biomasa es la principal fuente energética para 2.400 millones de personas que suplen cerca del 40% de la demanda energética de los países en desarrollo. Su uso aumentará en los próximos años.

2.3.1. Características medioambientales del uso de la biomasa. ¿La biomasa es accesible y renovable?

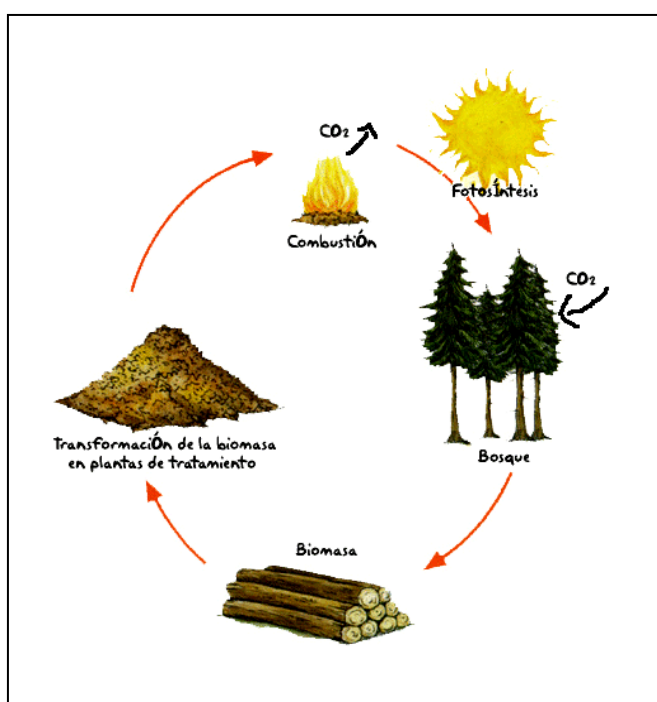


Figura 2.4. ¿Cómo mantener este ciclo de manera sostenible?

Inicialmente, la preocupación dominante de los trabajos de investigación referidos al desarrollo de los sistemas que utilizaban biomasa era salvar árboles. Hoy ese objetivo ha sido minimizado, al tiempo que se han aclarado las verdaderas causas de la deforestación. En paralelo, otra cuestión ambiental ha llegado a ser dominante, las condiciones del entorno doméstico, con sus necesidades y limitaciones de luz, calefacción, cantidad de humos, ...

Inhalar humos cuando se cocina provoca enfermedades como bronquitis crónica, enfermedades del corazón, enfermedades respiratorias agudas e infecciones oculares.

Es importante subrayar que la combustión a gran escala de la biomasa es sólo factible medioambientalmente hablando, si se lleva a cabo sobre una base sostenible. La explotación continua de los recursos madereros sin ningún tipo de medidas de reposición y regeneración puede causar graves daños ambientales y poner en peligro el propio recurso en sí. Hay que asegurar que cualquier tecnología relacionada con la biomasa tenga un carácter renovable por completo.

En cualquier tecnología apropiada un principio fundamental a respetar es el concepto VLOM (“Village level operation and maintenance”). Es decir que el entorno local se beneficie desde todos los puntos de vista (económico, social, medioambiental,...), que la comunidad local pueda gestionar, operar y mantener sus recursos energéticos a través de tecnología adaptada a su formación y posibilidades sin dependencia ninguna del exterior.

2.3.1.1.¿Qué ventajas medioambientales tiene la biomasa?

- Balance neutro en emisiones de CO₂. Realizada en las condiciones adecuadas, la combustión de biomasa produce agua y CO₂, pero la cantidad emitida de este gas (principal responsable del efecto invernadero), fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento. Es decir, el CO₂ de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación, por lo que no supone un incremento del gas invernadero en la atmósfera (siempre que la vegetación se renueve a la misma velocidad que se degrada).

- **No** produce emisiones con contenidos de sulfuro o nitrógeno (lluvia ácida), ni apenas partículas sólidas.

- Como una parte de la biomasa procede de residuos que es necesario eliminar, su aprovechamiento energético supone convertir un residuo en un recurso. Así se evitan incendios, plagas, enfermedades vegetales, proliferación de agentes patógenos,...

2.3.1.2.¿Qué ventajas socioeconómicas tiene la biomasa?

- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles. Se produce de manera dispersa, por lo que se evita la concentración energética y disminuyen los transportes de energía.

- Favorece el desarrollo del mundo rural y supone una oportunidad para el sector agrícola, ya que permite sembrar cultivos energéticos en sustitución de otros excedentarios.

- Abre oportunidades de negocio a las industrias locales, favorece la investigación y el desarrollo tecnológicos, e incrementa la competitividad comercial de los productos.

2.3.1.3.¿Qué inconvenientes medioambientales específicos de regiones en vías de desarrollo tiene la biomasa?

• La cosecha de biomasa no sólo produce emisiones de dióxido de carbono, también otros productos con mayor impacto como pueda ser el metano. El impacto del ciclo de pirólisis sin la recuperación de los subproductos es más dañino que el uso final en forma de la quema del carbón vegetal

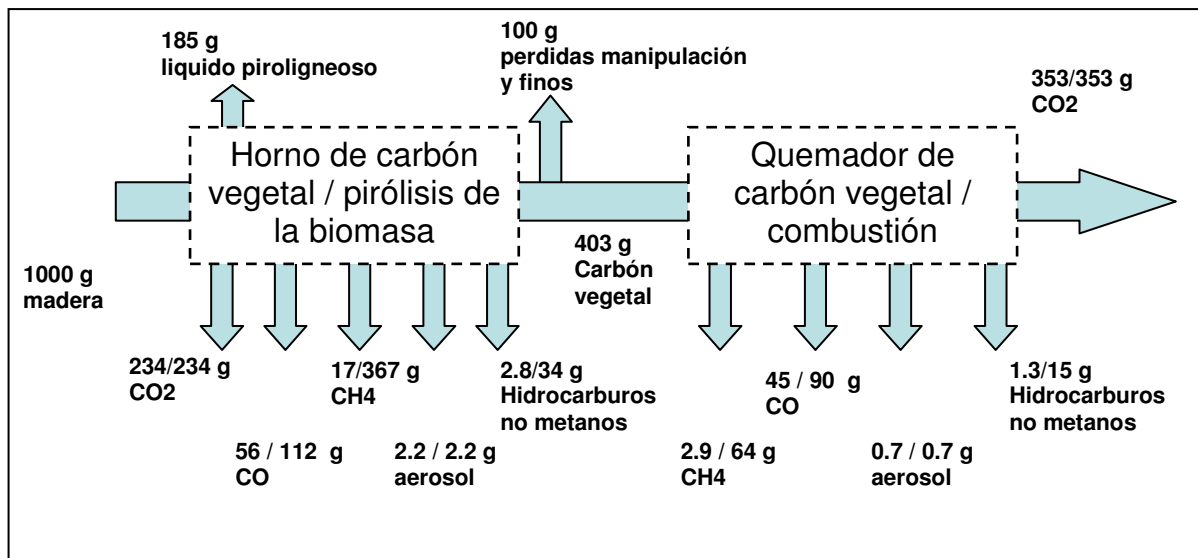


Figura 2.5. Emisiones producidas de gases contaminantes en la producción y combustión de carbón / Emisiones equivalentes de CO₂

• Normalmente, la demanda de carbón vegetal se encuentra en las ciudades. Esto significa que el carbón es producido lejos de su punto de consumo y debe ser transportado. Debido a que el aprovisionamiento de las zonas rurales decae y que las cercanías de las ciudades son agotadas de recursos madereros rápidamente. La cuestión es dónde se encuentra el límite de Km. a alcanzar para obtener carbón sin que sea económicamente inviable.

Un ejemplo, dentro de la energía de las urbes de Kenya el 66% lo provee el carbón vegetal y el 18% la madera. En el medio rural sólo el 5% usa carbón vegetal frente a un 90% que usa madera. En los 90 el crecimiento de la población en África fue de un 2,9% frente a un 4,6% de ratio de urbanización, con lo que el transporte del carbón pasa a ser un factor importante.

• En muchos casos, la cosecha de madera para la producción de carbón es un proceso intensivo, concentrado en un área y un periodo de tiempo lo más pequeños posible. En algunos casos esta recogida es ilegal, en bosques estatales, con una sobrepresión añadida. Por el contrario, si se recogen pequeñas cantidades de madera diariamente el impacto es disperso y mucho menos severo.

• En el artículo [22] se expresa lo siguiente “... desde la perspectiva del calentamiento global, el uso de carbón vegetal está entre las peores, sino es la peor,

como fuente de energía para las cocinas, y su substitución o el desarrollo de nuevos métodos de producción son aconsejables...” lo cual es bastante discutible, aunque hay que indicar que la mitad de la población mundial usa carbón para cocinar.

2.3.1.4. Inconvenientes a escala global de la biomasa con relación a los combustibles fósiles.

- Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los de las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso.

- La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores.

- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costes de operación y mantenimiento (respecto a las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente.

- Los canales de distribución de la biomasa no está tan desarrollados como los de los combustibles fósiles (sólo aplicable en el caso de que los recursos no sean propios).

2.3.1.5. “The petroleum link” (Equilibrio entre el uso de carbón vegetal y petróleo).

Dado que el uso del carbón está centralizado en las ciudades, en el futuro los costes de transporte en determinadas circunstancias determina la mayor parte del precio del carbón vegetal. Así las fluctuaciones en el precio del petróleo tendrán grandes efectos en los precios reales del carbón. Este fenómeno tiene repercusión en un amplio espectro del empleo doméstico, por ejemplo en Kenya la industria del carbón incluye 30000 productores, 400 transportistas, y 800 minoristas. Además la producción de carbón y las plantaciones de árboles provee de trabajo en las zonas más pobres, las rurales.

Una solución parcial a la amenaza de la deforestación es introducir combustibles alternativos en áreas donde se daba una gran escasez. Un país que se encuentra ante una crisis maderera o deforestación debe motivar el uso del petróleo o de otro tipo de energías para proteger sus recursos y facilitar la repoblación de los bosques. Si un país es demasiado dependiente del petróleo, la biomasa debe ser promocionada. En comparación con el carbón el petróleo tiene asociado fiabilidad y seguridad en el aprovisionamiento.

2.3.2. *¿Cómo evitar la deforestación derivada de la recolección de leña? Ordenación y medidas para una explotación sostenible de recursos madereros.*

En el caso de países con baja densidad de población y grandes superficies remanentes de bosques, resultará, que sus perspectivas parezcan ser buenas. La superficie forestal requerida será adecuada y debería aún ser posible dedicar zonas forestales de producción de tamaño suficiente, para producir, en forma continua, la cantidad necesaria de carbón vegetal, aún si estos bosques naturales pueden tener un incremento medio anual (IMA) bastante bajo, en el marco de cualquier sistema de ordenación factible. En el caso de países con mayor densidad de población y menos dotados de bosques, se hallará, que la superficie forestal disponible no es adecuada para satisfacer las necesidades futuras de leña y carbón vegetal, a menos que se tomen medidas drásticas para controlar la situación.

Las principales opciones al alcance de los países en desarrollo y que se hallan en esta situación son:

- Mejor ordenación, o introducción de la ordenación, donde actualmente no existe, en las zonas forestales puede ser suficiente disminuir las producciones, hasta el punto en que la regeneración natural resolverá el problema.
- Pueden implantarse forestaciones de elevados rendimientos, frecuentemente con especies de eucalipto, lo que permite generar suficiente madera y bastante rápidamente para nivelarse con la demanda, y superar el problema. Los sitios de plantación deben ser elegidos con cuidado, teniendo en cuenta la fertilidad del suelo, lluvia, ubicación con respecto a los centros de consumo, y la posibilidad de que las tierras puedan dedicarse a fines forestales en forma permanente.

Es común que surjan conflictos por la necesidad de usar la tierra para producir alimentos. Para una creciente población bajo estas condiciones adquieren importancia predominante los factores sociales que gobiernan la supervivencia choca con el crecimiento de las plantaciones forestales en el medio de zonas de agricultura de subsistencia. Las plantaciones muy productivas pueden fácilmente dar un IMA superior a 20 (m³/hectárea) de madera con rotaciones de 10 a 12 años, si se compara con el IMA de 2 a 3 (m³/hectárea) en bosques naturales no ordenados. Sin embargo, debe ponerse en claro que los altos rendimientos de las plantaciones no se obtienen sin invertir en una buena tierra, con una correcta ordenación y quizás también con fertilizantes.

Bosque tropical alto	80 - 100 m ³ /ha
Monte de sabana	20 - 45 m ³ /ha
Producción anual de plantaciones de eucalipto bien ordenadas, sobre buenos sitios; rotación 12-20 años.	14-20 m ³ /ha

Tabla 2.2. Producción probable de leña por cortas en diferentes bosques.

2.4. Componentes químicos de la biomasa.

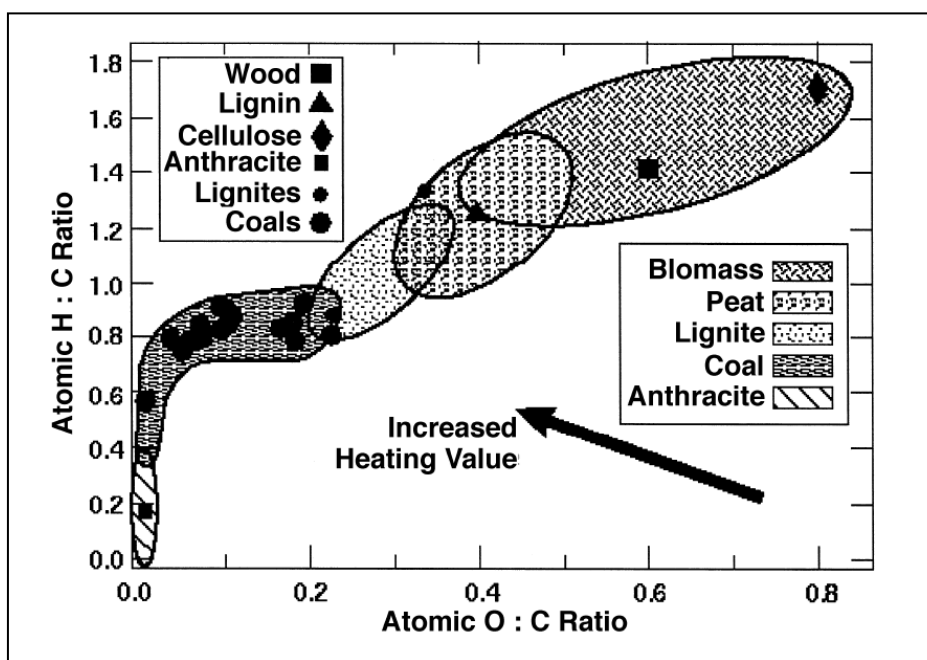


Figura 2.6. Ratio O:C frente a ratio H:C. Diagrama de clasificación que muestra las diferencias en la composición de la biomasa y el carbón.

La importancia de los ratios O:C y H:C en los combustibles sólidos se ilustra en la figura 2.6., el diagrama de Van Krevelen. La comparación de biocombustibles con combustibles fósiles como el carbón vegetal muestra que los primeros como tienen una mayor proporción de oxígeno e hidrógeno, comparada con el carbono, tienen un poder calorífico menor debido a la menor energía contenida en los enlaces C-O y C-H que en C-C.

El poder calorífico superior se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$PCS \text{ (MJ/Kg)} = 0,335 * C \text{ (%m)} + 1,423 * H \text{ (%m)} - 0,154 * O \text{ (%m)}$$

El contenido de metales alcalinos como Na, K, Mg, P y Ca es especialmente importante para varios procesos termoquímicos. La reacción de metales alcalinos con Silicio presente en las cenizas produce una fase líquida y pegajosa que puede provocar obstrucción en los conductos de calderas y otras instalaciones.

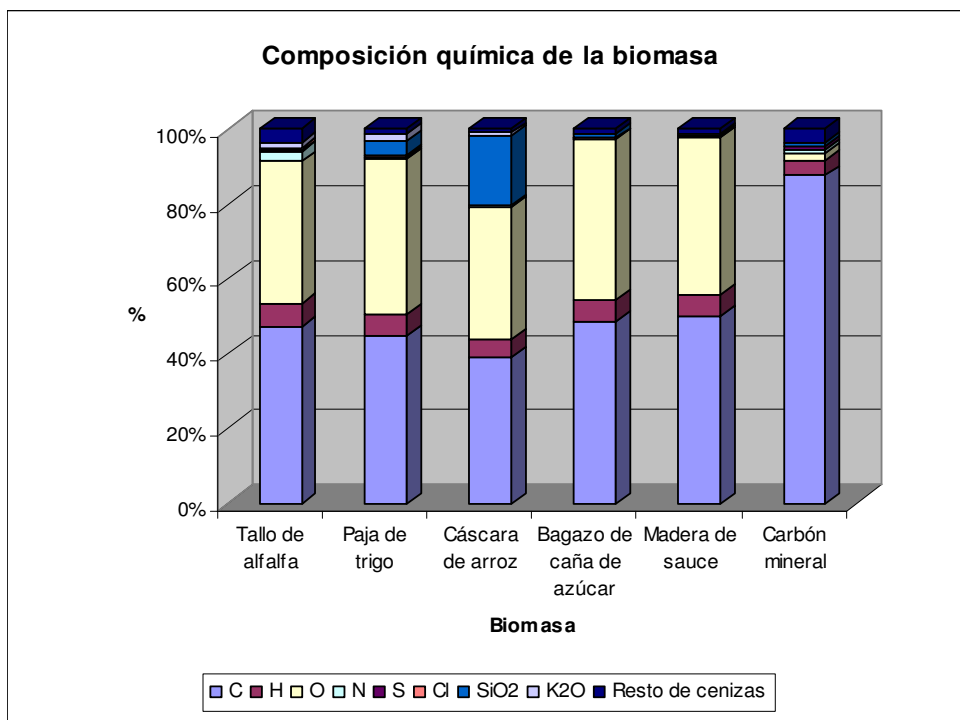


Figura 2.7. Composición química de 5 tipos de biomasa y de carbón mineral.

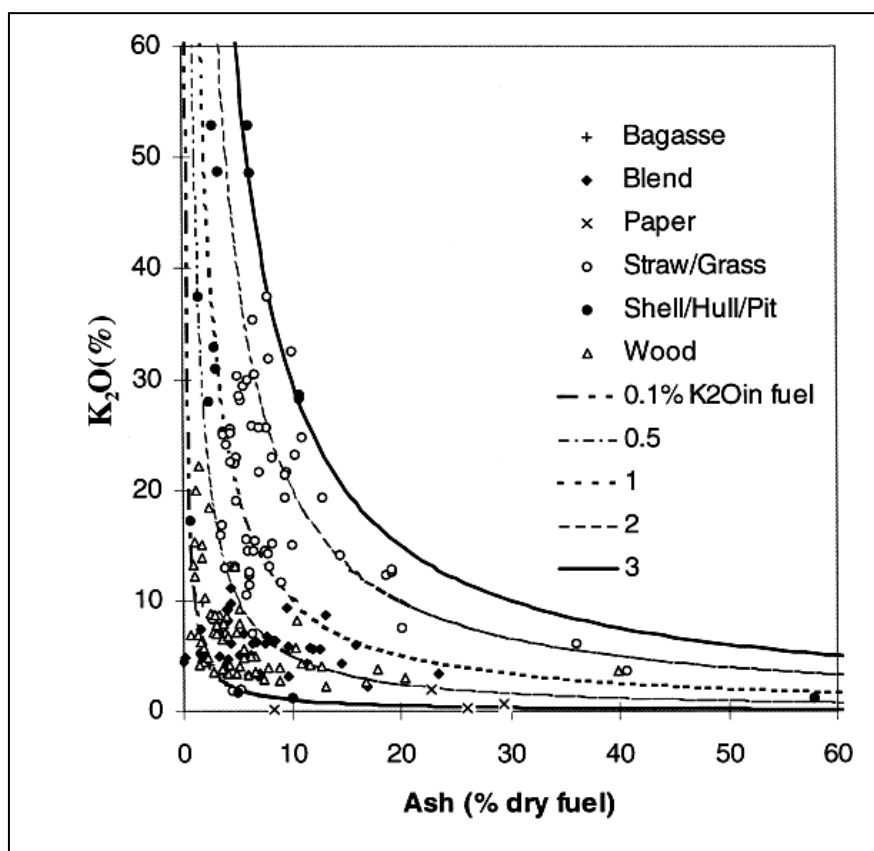


Figura 2.8. Concentraciones de óxido de Potasio en función del contenido porcentual de cenizas del combustible.

El contenido de cenizas afecta a la manipulación y a los costes globales del proceso. Dependiendo de la magnitud del contenido de cenizas, la energía disponible del combustible es reducido proporcionalmente. En un proceso de conversión termoquímica, la composición química de la ceniza puede presentar significantes problemas operacionales. Esto es especialmente grave para los procesos de combustión, donde la ceniza puede reaccionar y derivar a una forma de escoria formada a elevadas temperaturas, lo cual puede reducir el rendimiento y suponer un aumento de costes de operación.

2.5. Componentes fisicoquímicos de la biomasa desde un punto de vista térmico.

La energía química en los combustibles se almacena en 2 formas:

- Materia volátil, porción extraída en forma gaseosa por calentamiento
- Contenido de carbono fijo, la masa remanente después de la liberación de los volátiles, excluyendo las cenizas y los contenidos en cenizas.

La importancia de estos 2 contenidos es que proveen la medida de la facilidad con la cual la biomasa puede encenderse y gasificada o oxidada, dependiendo de cómo se utilice la biomasa como fuente de energía.

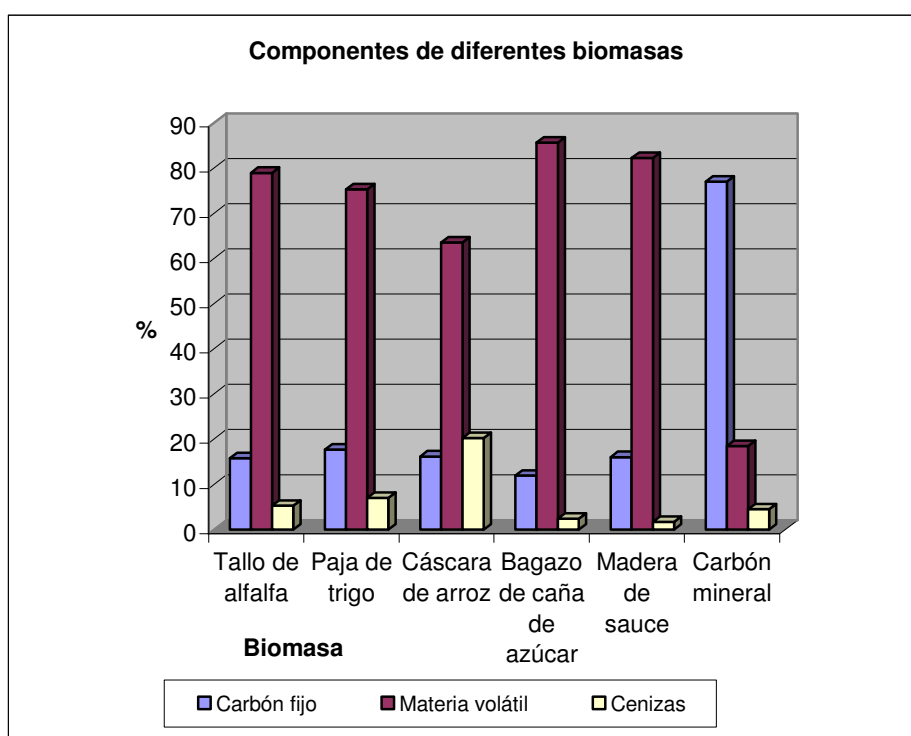


Figura 2.9. Composición de 5 tipos de biomasa y de carbón mineral desde un punto de vista térmico.

2.6. Componentes estructurales de la biomasa.

2.6.1. Celulosa

Posee una energía de activación de 235 KJ/mol y una alta estabilidad térmica. Está compuesta por largos polímeros de glucosa. Produce gran cantidad de CO debido al alto contenido de carbonilo. Insoluble en agua, forma parte del esqueleto estructural de la

mayoría de biomásas y supone el 50% del material exterior del material celular. Para biomásas altamente celulósicas, la fracción líquida contiene ácidos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, derivados heterocíclicos, y compuestos fenólicos.

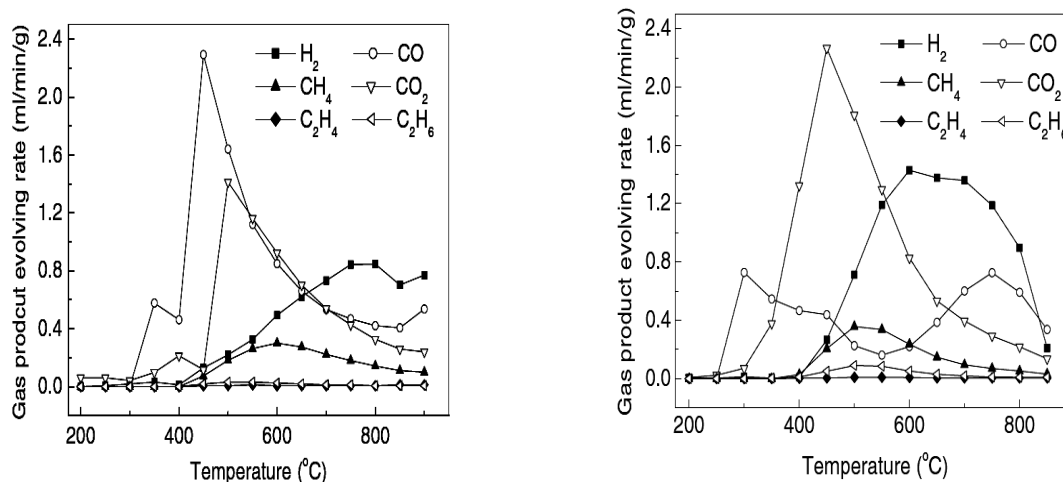


Figura 2.10. Liberación de gases de la celulosa y la hemicelulosa frente al aumento de temperatura

2.6.2. Hemicelulosa

Posee una energía de activación de 105 KJ/mol. Produce gran cantidad de CO₂, a causa del alto contenido de carboxilo. Compuesta por varios sacáridos (xilosa, glucosa, manosa, galactosa,...). Presenta una estructura aleatoria y amorfa. y es soluble en soluciones alcalinas.

2.6.3. Lignina

Posee una energía de activación: 26 KJ/mol y libera una alta producción de H₂ y CH₄. Es un polímero altamente ramificado y tridimensional, y contiene multitud de anillos aromáticos Se une a las fibras de celulosa formando un complejo lignocelulósico bastante resistente a la conversión por sistemas de microbios y a los agentes químicos. Debido al contenido aromático se degrada lentamente con aplicación de calor y contribuye a la principal fracción de la formación de carbón. El complejo lignocelulósico puede ser roto y la fracción de lignina separada, utilizando un tratamiento con ácido sulfúrico fuerte, en el cual la lignina es insoluble.

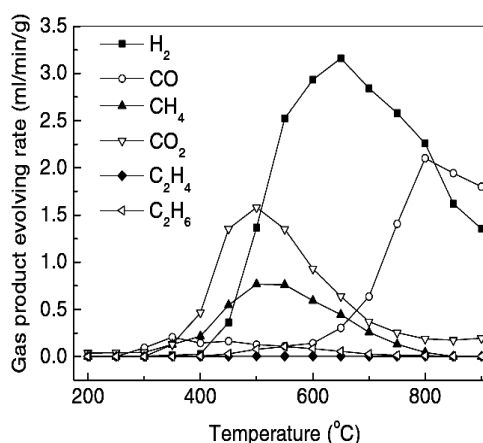


Figura 2.11. Liberación de gases de la lignina

3. Tecnologías de conversión de la biomasa.

3.1. Procesos bioquímicos.

3.1.1. Digestión anaerobia.

Es la descomposición de la biomasa a través de la acción de bacterias en ausencia de oxígeno. Produce una mezcla de gases de metano y dióxido de carbono, con pequeñas cantidades de otros gases, como sulfuro de hidrógeno. El producto generado por descomposición, en ausencia de aire, de las aguas residuales o de los desechos animales es conocido como biogás. Este gas contiene de un 20 a un 40% del poder calorífico inferior de la materia prima. La digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos enterrados en vertederos es conocido como gas de vertedero.

Biogás es más comúnmente producido usando abono animal mezclado con agua que es removida y calentada en un contenedor hermético, conocido como digestor. El rango de digestores va desde 1m³ para una pequeña unidad familiar hasta 2000 m³ para una gran instalación comercial. El biogás producido puede ser directamente quemado para cocinar o calentar, o usado como combustibles en motores de combustión para generar electricidad (la eficiencia oscila entre un 10 y un 16%).

El gas de los vertederos puede ser extraído insertando tuberías en el vertedero. De esta manera el gas se conducirá a través de las tuberías bajo presión natural para su uso como fuente de energía, mucho mejor que dejando que se escape a la atmósfera y contribuya a las emisiones de gases de efecto invernadero.

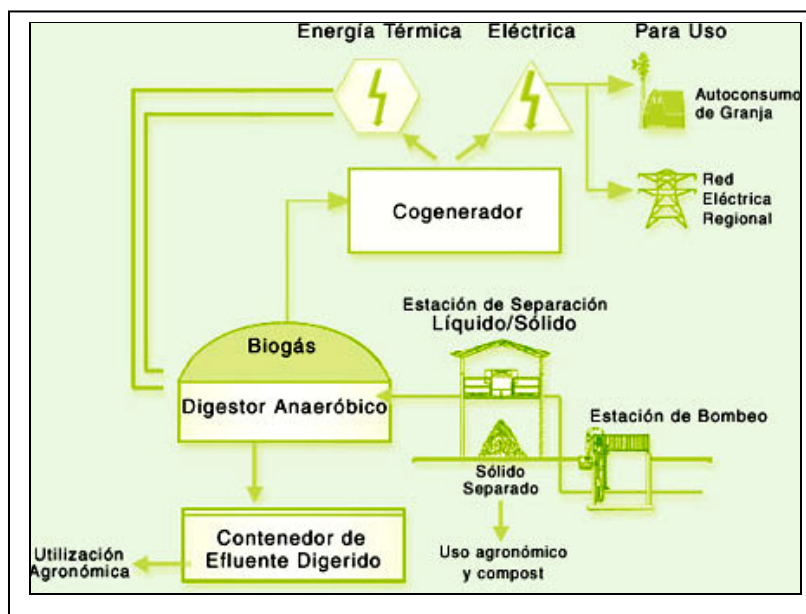


Figura 3.1. Digestión anaerobia

Como alternativa, nuevos vertederos pueden ser especialmente desarrollados en una configuración que mejora la digestión anaeróbica. En estos sitios, el sistema de tuberías de recolección de gases es instalado antes de que los residuos sean depositados, así optimizando la productividad de gas, la cual puede ser tan alta como 1000 m³/h. El

gas de vertedero es generalmente usado para generación de electricidad, con un gran uso en motores de combustión interna. Típicamente, los motores impulsan generadores de 500KW para alcanzar los ratios normales de suministro de gas de alrededor de 10 GJ/h.

3.1.2. Fermentación alcohólica.

El etanol puede ser producido de diferentes biomásas que contienen azúcares, almidón, o celulosa. La mayor fuente conocida de etanol es la caña de azúcar, pero otros materiales pueden ser usados, incluyendo trigo y otros cereales, remolacha azucarera, aguaturma, y madera. La elección de la biomasa es importante ya que la materia prima supone típicamente entre el 55 y el 80% del precio final de venta del alcohol. La biomasa procedente del almidón es normalmente más barata que el material con azúcares pero requiere procesados adicionales. Igualmente, los materiales celulósicos, como la madera y el trigo son ampliamente disponibles, pero requieren una cara preparación (debido a la presencia de grandes cadenas de moléculas de polisacáridos requiere ácidos) para llevar a cabo la hidrólisis enzimática.

Típicamente, el azúcar es extraído de la biomasa, machacándola, mezclándola con agua y levadura y manteniéndolo caliente en grandes tanques llamados fermentadores. La levadura descompone el azúcar y se convierte en metanol. Un proceso de destilación es necesario para eliminar el agua y otras impurezas del producto alcohólico diluido (10/15% etanol). El etanol concentrado (95% en volumen con un único paso de destilación) es extraído y condensado en forma líquida.

El etanol puede ser usado como suplemento o sustituto del petróleo en los vehículos. Brasil posee una exitosa industria a gran escala, la cual produce etanol de la caña de azúcar para mezclarlo con petróleo. Algunas adaptaciones de los vehículos son necesarias para la completa sustitución del petróleo.

Residuos agrícolas son a menudo usados para proveer el calor externo necesario al proceso. Hay una considerable pérdida de energía en la etapa de destilación, en especial en el proceso complejo de destilación secundaria necesario para alcanzar concentraciones de etanol superiores al 99 %. Se puede obtener 450 L de etanol de una tonelada de granos.

3.1.3. Procesos agro-mecánicos.

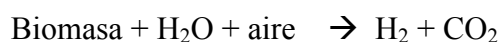
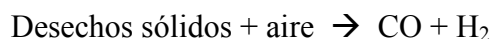
Las semillas de varios tipos de biomasa, en especial las materias oleaginosas, que contienen una alta proporción de aceite, se pueden machacar y extraer los aceites y usarlos directamente para remplazar al biodiésel o como calefacción por petróleo. El contenido energético de los aceites vegetales rondan aproximadamente los 40 MJ/Kg. Hay un amplio abanico de plantas que pueden ser usadas para la producción de biodiésel, pero la más común es aceite de colza. Otros materiales usados son el aceite de

palma, aceite de girasol, aceite del grano de soja, y aceites reciclados de freír. El coste de la materia prima es el más importante del coste global de la producción. Hay aproximadamente 85 plantas de biodiésel por todo el planeta con una capacidad combinada de 1,28 millones de toneladas. En Filipinas, el diesel es mezclado con aceite de coco y usado en tractores y camiones.

Hay varios beneficios asociados con el biodiésel, incluyendo la reducción de los gases de efecto invernadero en al menos 3,2 Kg. de CO₂ equivalente por kilogramo de biodiésel, un 99% de reducción de emisiones de óxido de sulfuro, una reducción del 39% de material particulado, y provee una alta biodegradabilidad y seguridad en el suministro energético.

3.1.4. Obtención de hidrógeno de la biomasa.

El hidrógeno es un combustible de combustión limpia. No es un combustible primario ya que se obtiene del agua a través de fuentes de energía fósiles y no fósiles. El hidrógeno es producido de los aceites piroleñosos producidos de la pirólisis de la biomasa lignocelulósica. La gasificación de los residuos sólidos y las aguas residuales es una reciente innovación. Los gases de síntesis formados con agua y oxígeno son reformados a hidrógeno. El concepto de desperdicio sólido resuelve dos problemas: eliminación de la basura urbana y de las aguas residuales y supone una fuente de combustible hidrógeno para los vehículos traccionados por hidrógeno. El hidrógeno de la biomasa se basa generalmente en las siguientes reacciones:



3.2. Procesos térmicos. Concepto de combustión, pirólisis y gasificación.

Los principales criterios para la adecuación de los procesos termoquímicos son el contenido en humedad, el contenido en cenizas, y las características. El principal criterio económico son los costes que incluyen producción, recolección, y transporte y cantidad la cual incluye eficacia.

3.2.1. Combustión.

3.2.1.1. Conceptos generales

La quema de biomasa con aire es usada en un amplio rango de casos para convertir la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica, o electricidad usando tipos de sistemas, por ejemplo hornos, calderas, turbinas de vapor, turbogeneradores. La combustión suele ser en lecho fijo ó móvil, o bien en lecho fluidizado.

No se puede quemar dentro de un motor por el contenido de cenizas que va desde un 1% hasta un 7%. Estas cenizas además de ser abrasivas, son álcalis por lo tanto corrosivos. La incineración puede producir su reblandecimiento, por fusión parcial, dificultando e incluso impidiendo, continuar la operación, al atascar el quemador.

Esta dificultad, si la juntamos a la distinta composición y grado de humedad de las distintas biomasa, hacen que actualmente se contemple como una viable la co-combustión en calderas de gas natural o de carbón pulverizado, es decir agregando a un combustible fósil hasta un 30 % en peso de biomasa. Esta opción ofrece la ventaja adicional de permitir la producción energética en ausencia de biomasa, lo cual puede presentarse por su estacionalidad. La adición de biomasa al carbón permite una combustión más limpia, al carecer la biomasa de azufre y de metales pesados, así como tener un contenido de cenizas mucho menor (aproximadamente un 13% para el carbón, aunque pueda ser incinerado incluso más). La co-combustión de biomasa en plantas impulsadas por la combustión de carbón es una opción especialmente atractiva gracias a su alta eficiencia de conversión.

La combustión de la biomasa produce gases calientes a una temperatura de 800/1000°C. Es posible quemar cualquier tipo de biomasa, pero en la práctica sólo es factible con biomasa con humedad menor del 50%, a menos que la biomasa este preseca. La escala de las plantas de combustión va desde un tamaño muy pequeño (por ejemplo calefacción doméstica) hasta plantas en el entorno de 100-3000MW. El tamaño de la planta está limitado por la disponibilidad de materia prima local y es generalmente menor de 25 MW. Sin embargo el uso de materias primas dedicadas exclusivamente a este fin, como las plantaciones de corta rotación y cultivos energéticos de hierba, se

puede llegar a entre 50 y 75 MW, con significantes ganancias de escala. Los grandes sistemas de generación de energía gracias a la biomasa pueden tener eficiencias comparables a aquellos de los combustibles fósiles, pero esto conlleva un alto coste debido al contenido de humedad de la biomasa.

Las eficiencias de conversión netas en bio-energía para las plantas de combustión impulsadas con biomasa van del 20% al 40%. Las eficiencias más altas son obtenidas con sistemas por encima de los 100MW o cuando la biomasa participa en procesos de co-combustión con carbón mineral. La eficiencia de la combustión directa en pequeños hogares es de tan solo el 10 %. No es adecuado debido al alto contenido de humedad para desarrollar una combustión estable.

1 Tn. de carbón vegetal, al quemar, genera energía equivalente a:	
Fuel oil	0,55 ton
Electricidad	7 ,260 Kwh.
Carbón bituminoso (duro)	0,83 ton
Madera seca (15% contenido de humedad)	1,65 ton
Madera verde (60% contenido de humedad)	2,50 ton

Tabla 3.1. Energía equivalente de la combustión de 1 Tn. de carbón vegetal.

La densidad y el poder calorífico de muchos tipos de biomasa es inferior al del carbón vegetal, lo que conlleva importantes limitaciones económicas en el transporte, tamaño específico de los equipos de conversión y almacenaje. Para tratar de evitar o minimizar los problemas derivados de la heterogeneidad y baja densidad energética de la biomasa, un proceso de pretratamiento de la misma consiste en una compactación de sus partículas, para dar lugar a unos biocombustibles sólidos derivados denominados pelets y briquetas. Están hechas con productos forestales, carbón vegetal, materia residual, como cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de pulpa de papel, papel o cartón, o mezclas de todos ellos. Los pelets y briquetas de biomasa tienen una densidad específica de 1 - 1.3 Kg. / m³. Además poseen una humedad no superior al 10 %, todo lo cual les convierte en unos biocombustibles de alto valor añadido.

A pesar de la indudable calidad de los productos considerados, su proceso de fabricación supone costos muy importantes por lo que su utilización sólo es, en general viable, en los sectores doméstico y residencial, donde el mayor precio de los combustibles fósiles permite una mayor competitividad de la biomasa.

Fuente bibliográfica	A	B	C	D	E	F
Secador	25					600
Gasificador	1300		250			1265
Pirolizador						949
Motor			500	1000		911
Ciclo combinado	1500					1324
Ciclo Rankine		875			1500	2265

Tabla 3.2. Costes de varios sistemas (US \$ / kWe).

A. Bridgwater AV.

B. Raveendran K.

C. Mukunda HS. "Byways to energy shortage mitigation in developing countries".

D. Diesel engines.

E. Roy C. "Electricity production from using the Integrated Pyrocycling Combined Cycle Process"

F. Toft A, Bridgwater T. An evaluation of the performance of Integrated Bioenergy Systems.

3.2.1.2.Hornos domésticos

En los países en desarrollo más de 2 millones de personas usan la biomasa para la mayoría de las necesidades energéticas familiares. Para aprovechar esta fuente de energía recurren a su forma más simple que es una hoguera utilizada para cocinar, calentar agua o en forma de calefacción. Asimismo la biomasa es ampliamente usada para aplicaciones no domésticas.

País	Consumo de energía de la biomasa (% del total de energía consumida)	Consumo doméstico de energía (% del total de energía de la biomasa)
Burundi	94	78.5
Etiopía	86	97
Kenya	70	93
Somalia	87	92
Sudán	84	90
Uganda	95	78.6

Tabla 3.3. Consumo energético de la biomasa en diferentes países africanos.

Muchos programas han intentado mejorar e introducir hornos con tecnologías más desarrolladas para reducir la carga en los transportes de la recolección de madera, casi siempre llevado a cabo por mujeres, así como reducir los riesgos para la salud asociados a los gases derivados de la quema de madera. El humo en las cocinas domésticas supone el cuarto factor de mortalidad y enfermedad en los países menos desarrollados y está relacionado con la muerte de 1,6 millones de muertes al año, algo que la comunidad internacional no tiene prácticamente en cuenta. Golpea de manera muy intensa en la mortalidad infantil.

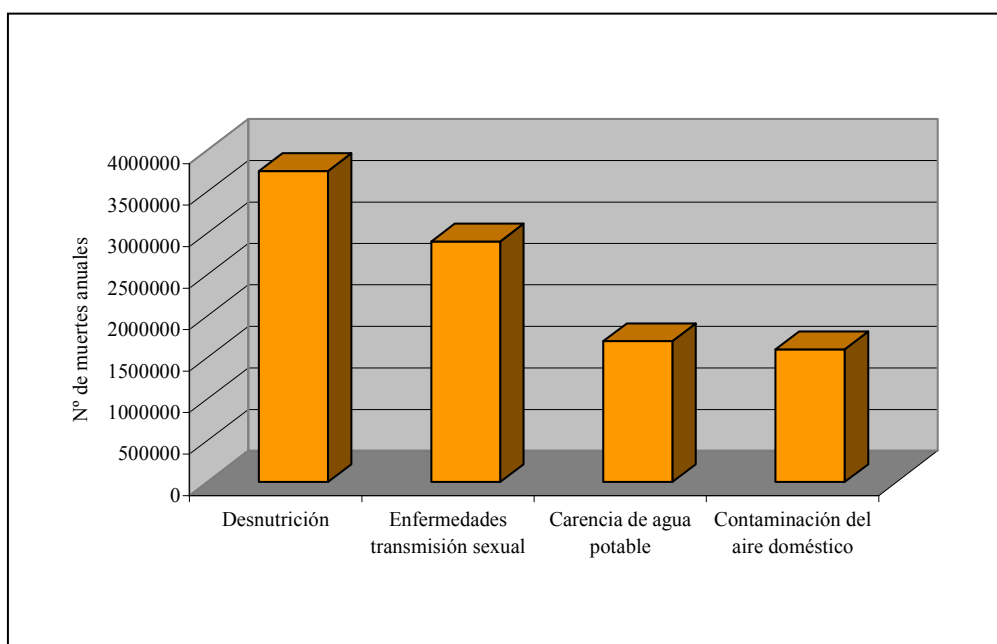
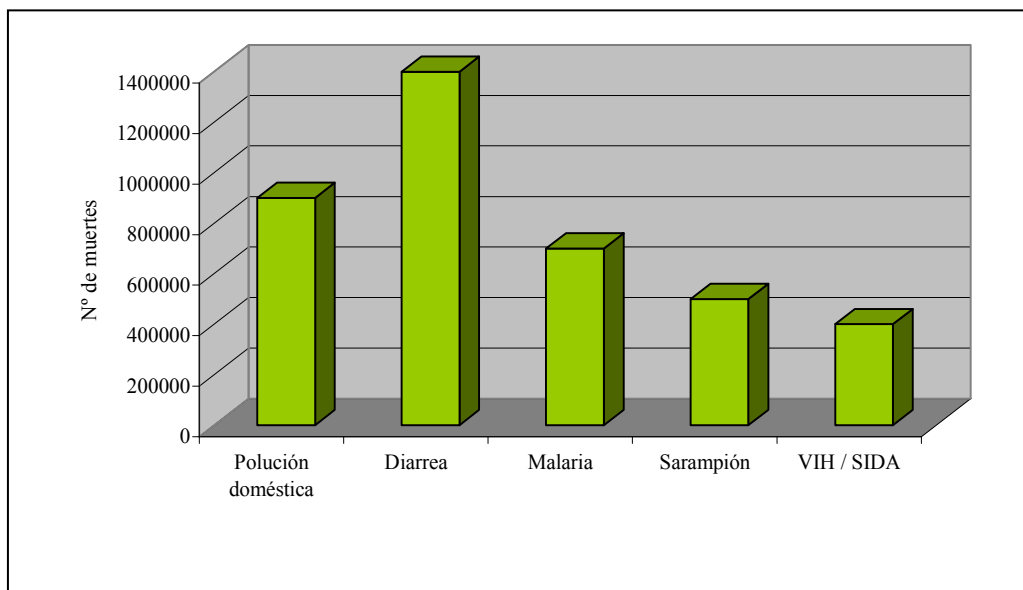


Figura 3.2. Mayores causas de mortalidad en el año 2000



Figura

3.3. Mortalidad en niños menores de 5 años.

El diseño de los hornos o del sistema de combustión afecta a la eficiencia global térmica de la siguiente forma:

Tipo de tecnología de combustión	% eficiencia
“Three stone fire” – Horno tradicional	10 – 15
Horno mejorado de quema de madera	20 – 25
Horno de carbón con funda cerámica	30 – 35
Horno sofisticado de quema de carbón	40
Horno a presión de queroseno	53
Cámara de combustión de Gas licuado de petróleo (LPG)	57
Máquina de vapor	10 - 20

Tabla 3.4. Eficiencias de algunos sistemas de conversión de biomasa.

3.2.1.3. Hornos mejorados en los países del tercer mundo

Una gran parte del trabajo de investigación llevado a cabo en tecnologías de la biomasa para las zonas rurales en los países en desarrollo ha sido basada en el desarrollo de los hornos tradicionales. Esto surgió inicialmente en respuesta a la amenaza de la deforestación, pero también centrado en la necesidad de las mujeres rurales de reducir la frecuencia en la recolección de madera y favorecer una atmósfera de las cocinas más limpia debido al menor escapes de gases. Los avances pueden ayudar a las mujeres emanciparse de los trabajos penosos. A continuación se muestra una variedad de tipos de hornos desarrollados con éxito, algunos pequeños y portátiles y otros diseñados para una ubicación permanente.

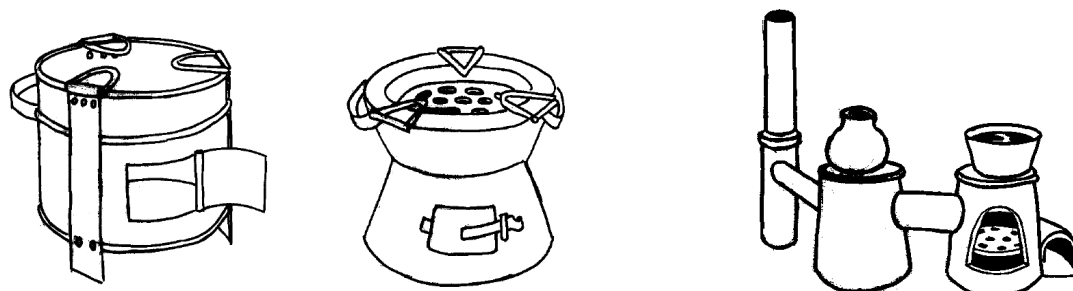


Figura 3.4. Algunos tipos de hornos mejorados en países en desarrollo

Algunas de las características de los hornos desarrollados incluyen:

- Chimenea para extraer los humos de la cocina
- Cámara cerrada para retener el calor
- Diseño cuidadoso del soporte del recipiente o cazuela para maximizar la transferencia de calor del fuego al recipiente.
- Deflectores para originar turbulencia y facilitar la transferencia de calor.
- Reguladores (dampers) para controlar y optimizar el flujo de aire
- Recubrimiento cerámico para minimizar el ratio de pérdidas de calor.
- Una rejilla que permita variar la cantidad de combustible y también para poder retirar las cenizas
- Cubierta metálica para dar consistencia y durabilidad
- Sistema multi-recipiente para maximizar el uso del calor y permitir que varios recipientes sean utilizados simultáneamente.

El horno no es simplemente un dispositivo para calentar comida, también tiene una **función social**, como lugar de reunión alumbrado y con calefacción. El alquitrán puede ayudar a proteger el tejado de paja, y el humo puede mantener alejados insectos y

otras plagas. Los hábitos de cocina deben ser considerados así como el estilo de vida de los usuarios.

El tipo de combustible puede variar, en algunos países los excrementos de vaca son usados como una fuente de combustible sobretodo cuando la madera escasea. Los costes son también es un factor muy importante entre los grupos con bajas rentas. Si no se tiene en cuenta las claves socio-económicas, un programa de implantación de hornos mejorados puede fracasar, su función no se debe limitar a ahorrar combustible.

El contenido calórico de 100 Kg. de carbón vegetal, desmenuzado, equivale aproximadamente a alrededor de 300 Kg. de madera seca al aire. Por los valores anteriores, es evidente que se justifica estimular el empleo de cocinas económicas de gran eficiencia, cuando se quema madera seca; sin embargo es mejor quemar carbón vegetal en lugar de madera, en los hornos y fogones de cocina de baja eficiencia. Los fogones y las cocinas mal diseñadas pueden tener una eficiencia térmica tan baja como el 3-5%. Con el carbón vegetal generalmente no se usan conductos, puesto que su combustión es relativamente inodora y sin humos, si se la compara con la de la madera o del carbón mineral. Quemando carbón vegetal, puede liberarse gas no quemado de monóxido de carbono, que es muy venenoso por lo que es esencial ventilar los cuartos donde se tiene carbón vegetal encendido.

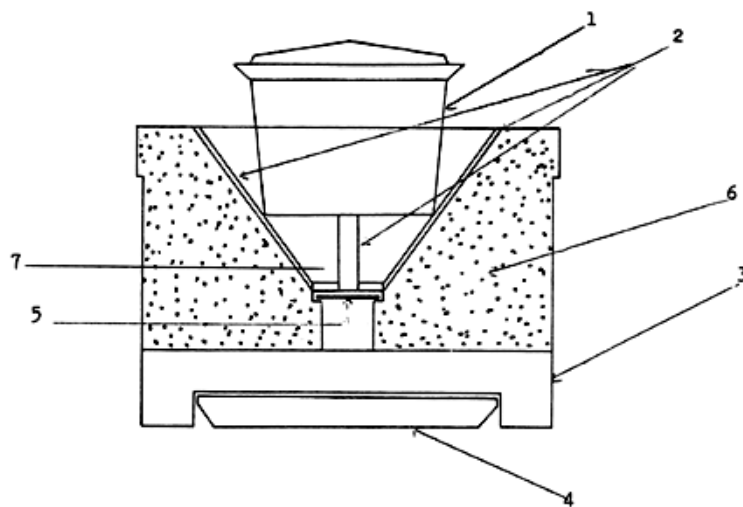


Figura. 3.5. Un buen diseño para hornillo de cocina a carbón vegetal

1. Olla redonda para cocinar
2. Canales en el cuerpo de la hornalla para el flujo de los gases
3. Carcasa de acero reciclado
4. Bandeja para cenizas de acero reciclado
5. Grilla o reja perforada de acero reciclado
6. Cuerpo de la hornalla de cerámica blanca quemada o mezcla de arcilla-arena-carbonilla fina
7. Carbón vegetal combustible

3.2.1.4. Ejemplos de combustión de biomasa en hornos industriales

Esquema de funcionamiento de la planta de Sangüesa

La paja es transportada hasta la planta en pacas, que se depositan en un almacén. Estas pacas se conducen hasta la caldera mediante una cinta transportadora. Un sistema de corte desmenuza la paja antes de caer a un extremo de la parrilla, ubicada en la caldera, donde es quemada. La combustión calienta el agua que circula por las paredes de la caldera, hasta convertirla en vapor. A partir de este momento se produce un triple proceso concatenado:

- El vapor, tras pasar por un sobrecalentador, mueve una turbina que, conectada a un generador, propicia la producción de electricidad.

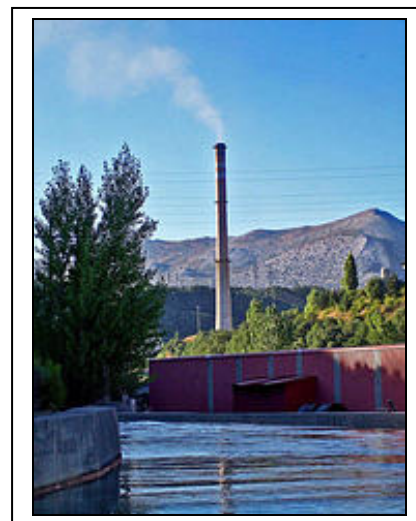
- El vapor de agua que ha pasado por la turbina, ya a menor presión y temperatura, se lleva hasta un condensador, refrigerado por el agua tomada de un canal que recorre el polígono industrial. Merced a ese descenso térmico, el vapor se convierte de nuevo en agua, y este líquido se trasladará en circuito cerrado hasta las paredes de la caldera iniciándose de nuevo el proceso.

- La combustión de la paja produce inquemados, que se depositan en el fondo de la caldera, y cenizas, resultado de filtrar y depurar los gases que finalmente se emiten por la chimenea de la planta. Los residuos son aprovechados para la producción de fertilizantes.

Proyecto Biovel

Se trata de un proyecto para determinar las posibilidades del uso de biomasa para la co-combustión en centrales térmicas de carbón. Por un lado, se realizarán pruebas en el Grupo 2 de la planta de Velilla del Río Carrión, que cuenta con una potencia instalada de 350 megavatios (MW) y consume sobre todo carbón nacional. La tecnología actual permite sustituir hasta un 10% de este combustible por biomasa, lo que ofrece un potencial de reducción de unas 200.000 toneladas de CO₂ al año.

El Ministerio de M. Ambiente elaborará un estudio para conocer la disponibilidad y coste de la biomasa en el entorno de las centrales eléctricas de carbón operativas en España. El objetivo último de este proyecto es determinar los costes reales de la utilización de biomasa para la co-combustión, para lo que se analizará todo el proceso de gestión de entre 3.000 y 7.000 toneladas de biomasa de origen forestal. Ha permitido identificar y caracterizar la biomasa existente en el entorno de la planta así como modelar su combustión en la caldera, originalmente diseñada para antracitas. El último paso de esta iniciativa es la realización de pruebas reales de co-combustión.



3.2.2. Pirolisis.

3.2.2.1. Definición.

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por la **acción del calor y en ausencia de oxígeno**. La propia concepción de la pirólisis implica un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, es lógico suponer que se lleve a cabo con el mismo material que se está tratando.

En general, se utiliza el término de pirólisis para los procesos en los cuales el objetivo es optimizar la producción de líquidos y con un ciclo de pirólisis corto, llamado flash pirólisis. Los biocombustibles obtenidos pueden ser utilizados en motores y turbinas, aunque presentan problemas de estabilidad térmica y corrosión. La devolatilización es un sinónimo de pirólisis, aunque literalmente se trata del desprendimiento de gases y vapores del residuo másico.

El término **carbonización** se reserva para procesos de pirólisis lentos, donde el objetivo consiste en obtener la mayor productividad y calidad de carbón vegetal. Este concepto se amplía en el siguiente capítulo.

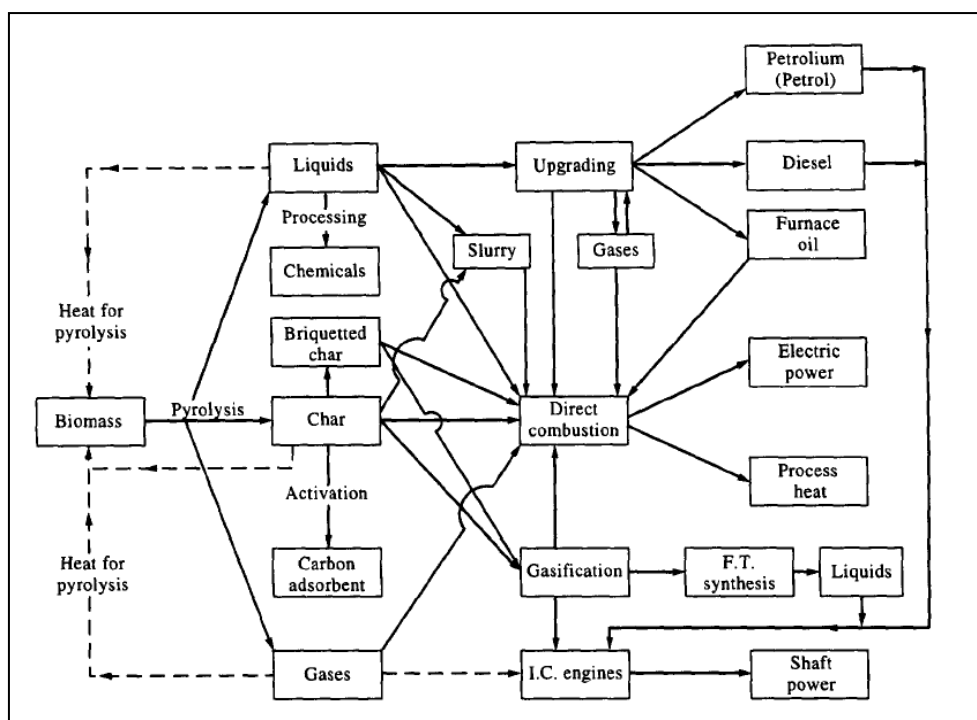


Figura 3.6. Usos finales de los productos de la pirolisis de biomasa

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

- **Hasta 200°C** se produce una pérdida de agua y otros productos volátiles
- **Entre 200 y 250°C** los constituyentes menos estables de la biomasa se descomponen con desprendimiento de agua y óxidos de carbono, formándose hidrocarburos líquidos oxigenados (alcoholes y ácidos).
- **Hacia 275°C** se genera la mayor parte de los hidrocarburos líquidos, reacción que, al ser exotérmica, recalienta la masa hasta 300-350°C.
- **Por encima de 300°C** comienza la formación de productos carbonosos de alto peso molecular (alquitranes y coque).

La primera descomposición de la biomasa (<400°C) es un proceso de **degradación** mientras que la termólisis secundaria (>400°C) incluye un proceso de **aromatización** en el que se produce la ruptura de moléculas de los productos formados.

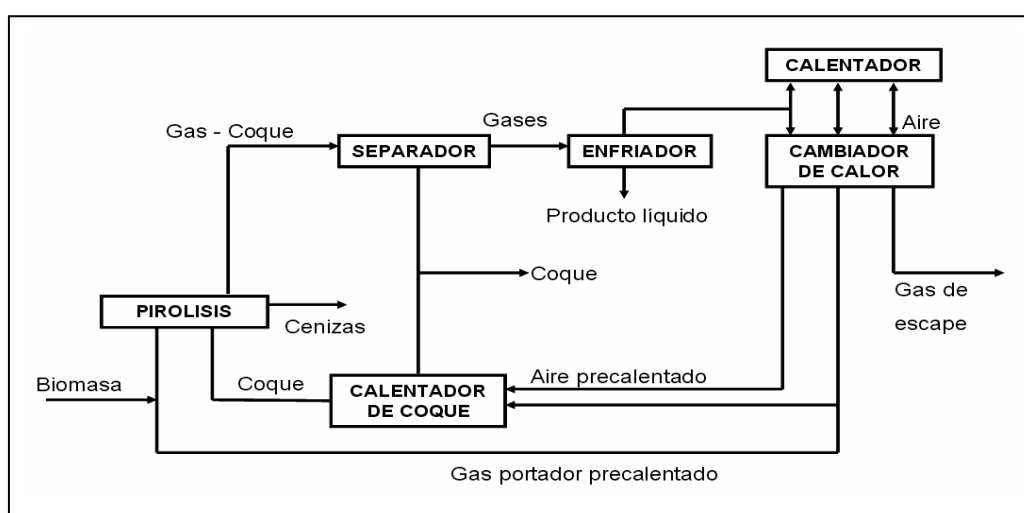


Figura 3.7. Esquema del proceso de pirólisis

En el caso de producción de combustibles líquidos y carbón, se requiere una alimentación con humedad baja y constante, para lo cual se realiza una desecación previa, utilizando los gases de la propia pirólisis, tal como muestra el esquema. En este caso el poder calorífico del combustible oscila entre alrededor de los 25,1 MJ/Kg. mientras que el del coque producido se encuentra sobre los 20,9 MJ/Kg. Se pueden llegar a obtener, por cada tonelada de biomasa seca, unos 225 Kg. de líquidos y 75 Kg. de coque.

3.2.3. Licuefacción

Es un proceso termoquímico que se lleva a cabo a baja temperatura (entre 525 y 600 °C) y a alta presión (de 5 a 20 MPa) usando un catalizador. Se produce un producto líquido comercializable.

3.2.4. Gasificación.

3.2.4.1. Descripción general

El proceso de gasificación es un proceso en el cual los combustibles de biomasa sólidos son descompuestos con el uso del calor y la acción de un agente gasificante (O_2 , aire, vapor de agua o H_2) para producir combustible gas.

La gasificación oxidativa es un proceso energéticamente neutro, en el que el calor de la combustión parcial se emplea en calentar y en menor proporción descomponer la biomasa. Por ser innecesario un aporte exterior de energía se dice que es un proceso autotérmico. Se trata de una oxidación parcial de la biomasa a altas temperaturas, típicamente en el rango entre $800^\circ C$ y $900^\circ C$ para alcanzar una descomposición completa y optimizar la producción de gas. La gasificación llega al máximo nivel de craqueo de la biomasa transformándola en un combustible gas antes de quemarlo.

Los combustibles principales para la gasificación incluyen materiales secos como la madera, carbón vegetal, cáscaras de arroz y de cacahuete. Estos procesos requieren biomasa con bajo contenido en humedad y alto contenido en celulosa-lignina.

Estos sistemas consisten principalmente de un reactor o contenedor en el cual el combustible es alimentado con un limitado suministro de aire. El calor de la gasificación es generado a través de la parcial combustión del material alimentado. La descomposición química resultante del combustible y las reacciones internas dan lugar a un gas combustible llamado gas pobre por su bajo poder calorífico, debido a la presencia de N_2 en el aire y de H_2O , ambos inertes y a una proporción importante de CO , que tiene un poder calorífico bajo. El poder calorífico de este gas varía entre 4 y 6 MJ/Nm^3 , o sobre un 10 o 15 % del poder calorífico del gas natural. Puede ser quemado directamente o usado como combustible para motores alternativos y turbinas de gas.

Un concepto prometedor son los ciclos combinados integrados con la gasificación de la biomasa (BIG/CC), donde las turbinas de gas convierten el combustible gaseoso a electricidad con una alta eficiencia global de conversión.

También puede ser usado como materia prima (syngas) en la producción de compuestos químicos, como metanol o hidrógeno que en un futuro podrían valer como combustibles para transporte. En este caso se suele gasificar con oxígeno puro, obtenido de la destilación fraccionada del aire líquido, proceso que consume un 30% del PCI.

La eficiencia energética depende mucho del proceso y de la calidad requerida para el combustible, siendo de un 85% en el mejor de los casos y de un 45% en plantas pequeñas.

Su composición puede variar mucho dependiendo de los diferentes combustibles y de los diferentes tipos de gasificadores, pero la mezcla siempre consta de gases combustibles como el H_2 , CO y CH_4 y de gases no combustibles como CO_2 y N_2 . Debido a la presencia de CO el gas pobre es tóxico. En su forma bruta, el gas tiende a ser extremadamente sucio, conteniendo cantidades significantes de alquitranes, hollín, cenizas y agua.

Algunas de las ventajas del proceso de gasificación son:

- Versatilidad en la valorización del residuo, ya que se puede aprovechar la energía que contiene en forma de calor, electricidad o como gas de síntesis para la obtención de productos químicos.
- Buen rendimiento eléctrico, en el caso de que esa sea la vía más adecuada para el aprovechamiento del residuo.
- Menor impacto ambiental.

3.2.4.2. Ejemplos tecnológicos de lecho fijo. Corriente ascendente (updraft).

Usando maderas y otra biomasa produce gases calientes ($300 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$) que contienen grandes cantidades de alquitranes pirolíticos y también cenizas y hollín. Los gases son adecuados para la combustión directa en un quemador. En las aplicaciones a motores, el gas debe ser enfriado, y también se tiene que eliminar el hollín y las cenizas y limpiar los alquitranes del gas por condensación u otros métodos. Como los alquitranes suponen una parte considerable del poder calorífico del combustible original, eliminarlos da al proceso una baja eficiencia.

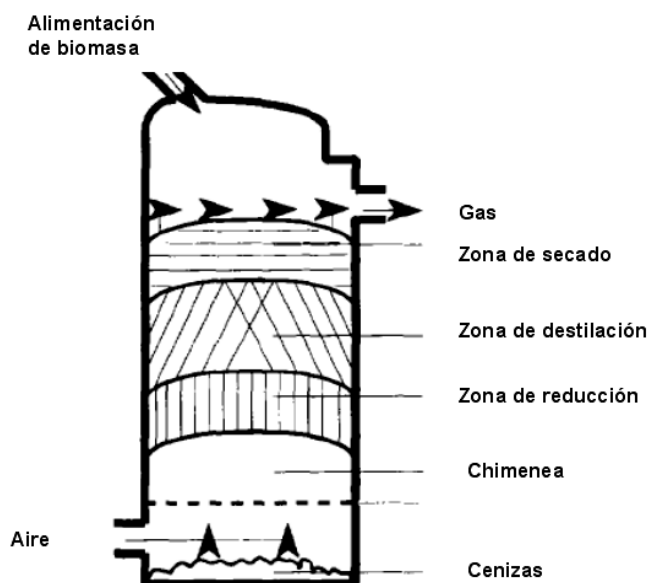


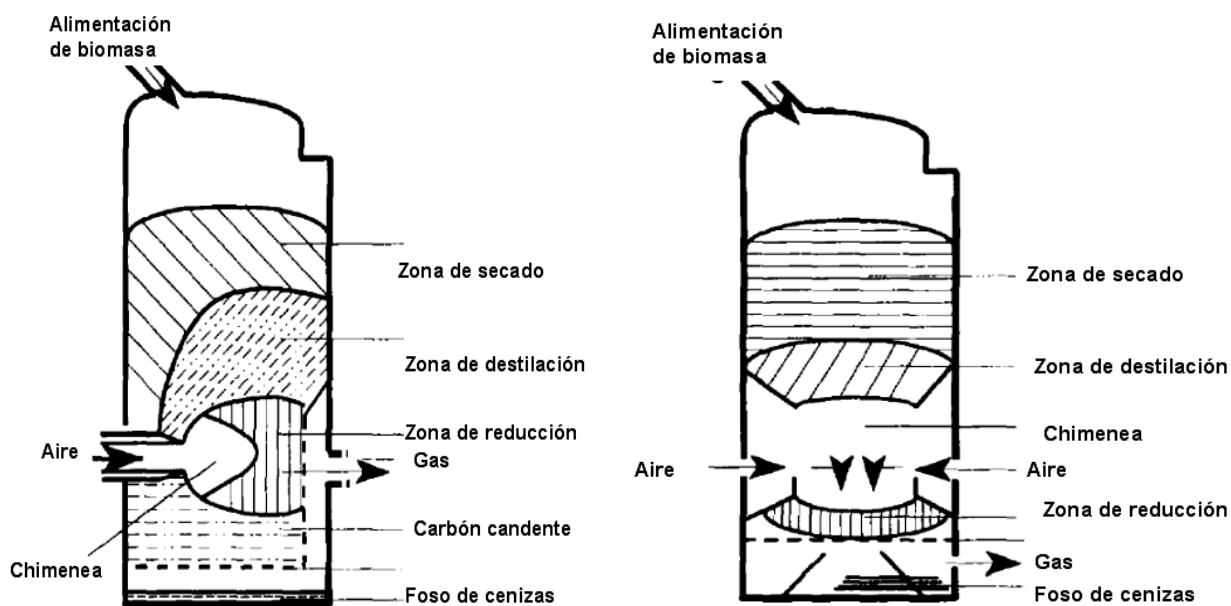
Figura 3.8. Gasificador updraft

3.2.4.3. Ejemplos tecnológicos de lecho fijo. Corriente descendente (downdraft).

Estos gasificadores producen gases calientes (700 – 750 °C) libres de alquitranes de la madera y otras biomásas. Después de enfriado y limpiado de hollín y cenizas, el gas está adaptado para el uso en motores de combustión interna.

En la práctica, los reactores descendentes no son capaces de alcanzar la producción de gases libres de alquitranes en todo el rango de condiciones posibles de operación. Cuanto más baja sea la producción de gas, más probable es producir cantidades de alquitrán que hacen el gas inaceptable para el uso en motores.

Este fenómeno es caracterizado por el valor del ratio (turn down) que indica el **flujo mínimo de gas con una producción de alquitrán aceptable** y que funciona sin problemas. Se suele expresar como parte del flujo máximo de gas para el cual está diseñado el reactor. Así, un ratio de 1:3 significa que el flujo de gas mínimo al cual los gases pueden ser aplicados directamente a un motor es igual a un tercio del flujo máximo. Si la producción de gas del reactor es menor que el valor mínimo para periodos largos, el motor usado en combinación con el reactor es probable que se dañe o que se gaste excesivamente por la contaminación de alquitranes.



Gasificador horizontal

Gasificador descendente.

Figura 3.9. Gasificador horizontal y gasificador descendente.

¿Por qué se adecuan bien los gasificadores de energía de pequeña escala alimentados por biomasa a los países en desarrollo?

La gasificación combinada con el uso del gas en motores de combustión interna es la forma más eficiente de convertir combustibles sólidos a energía mecánica y electricidad. Permiten el uso de biomasa en lugar de los derivados del petróleo, que es una fuente de energía renovable que suele estar disponible en casi todos los lugares de una forma u otra. Por tanto la gasificación de biomasa presenta un combustible local y alternativo para países que no tienen recursos fósiles. Siempre que la biomasa sea utilizada siguiendo una base sostenible, no aumentará la cantidad de CO₂ en la atmósfera y por lo tanto no aumentará el efecto invernadero. Esta tecnología puede aplicarse donde los costes de los motores impulsados con gas pobre sean más bajos que los que usan diesel o gasolina.

Nuevos reactores. Reactor de núcleo abierto para procesar cáscara de arroz desarrollado en China.

Reactores descendentes con un diseño muy específico, para la gasificación de cáscaras de arroz, han sido desarrollados en China. Cientos de sistemas empleando estos reactores de “núcleo abierto” han sido construidos en China desde mediados de los años 60. Después, plantas de este tipo fueron también instalados en países como Malí y Surinam.

- 1. Entrada de combustible y aire
- 2. Sobrecubierta de refrigeración de agua
- 3. Cajón de reducción
- 4. Salida de gases
- 5. Rejilla rotatoria
- 6. Salida de gases
- 7. Sedimento de cenizas
- 8. Tubo de extracción de cenizas
- 9. Toma de agua para refrigeración
- 10. Derrame de agua de refrigeración
- 11. Gas
- 12. Cenizas

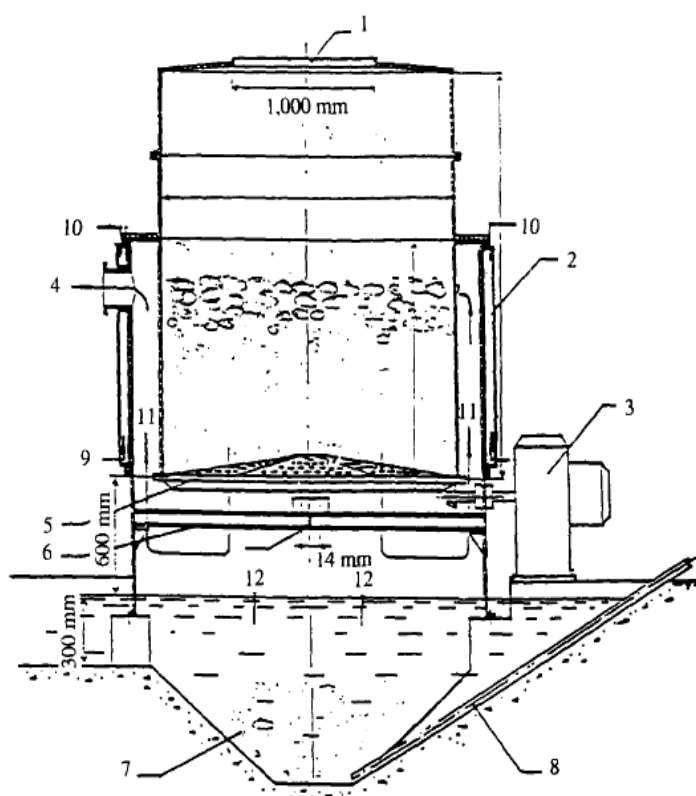


Figura 3.10. Reactor open core para procesar cáscara de arroz desarrollado en China

Nuevos reactores. Gasificador de ferrocemento desarrollado para procesar carbón vegetal desarrollado en el Instituto de tecnología asiático (AIT) de Bangkok

El instituto de tecnología asiático (AIT) ha desarrollado un reactor con un sistema de limpieza de los gases para la gasificación de carbón vegetal que está hecho enteramente de ferrocemento. Este diseño persigue la mejora de la competitividad financiera de la gasificación disminuyendo los costes del gasificador. En Tailandia y en Indonesia, gasificadores de este tipo han sido probados para periodos prolongados.

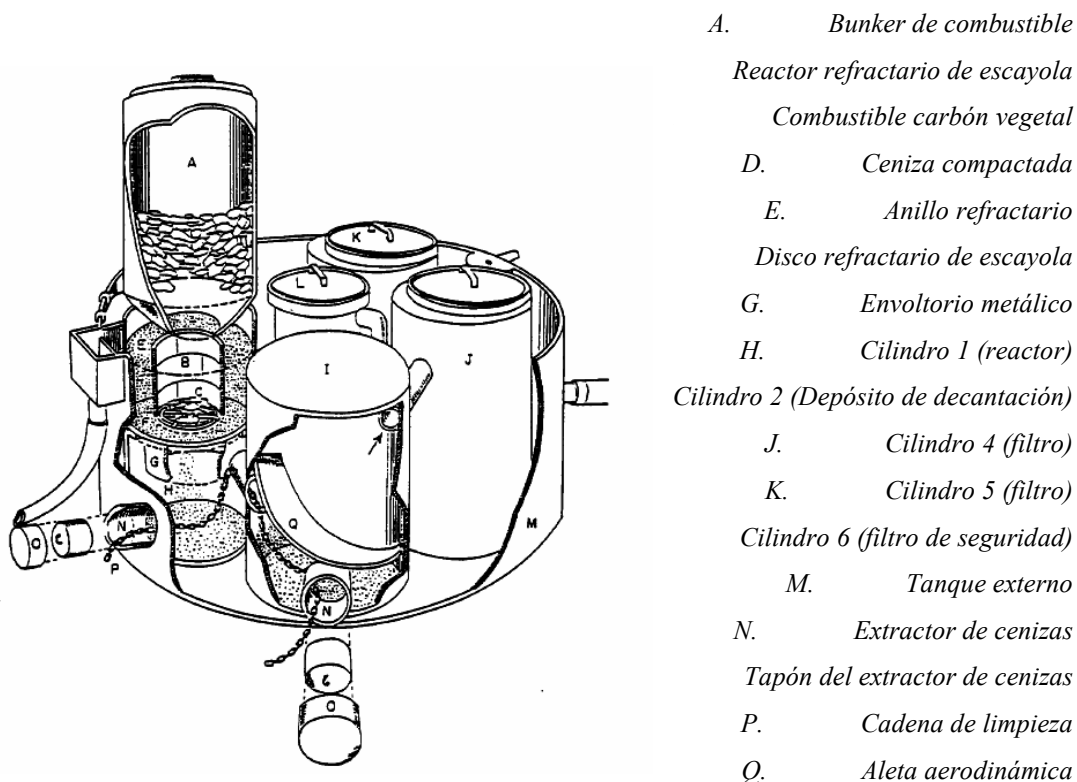


Figura 3.11. Gasificador de ferrocemento desarrollado para procesar carbón vegetal

3.2.4.4. Gasificadores de energía y gasificadores de calor

Aunque no es un combustible de alta calidad, el gas pobre puede ser usado eficazmente en varias aplicaciones. En primer lugar es combustible para motores de combustión interna para producir energía mecánica, para generar electricidad, bombear agua, moler grano, cortar madera,... En estas aplicaciones, los sistemas de gasificación son llamados gasificadores de energía. Su producción se indica en potencia eléctrica (KW) que se produce cuando está conectado al generador.

Por otro lado el gas pobre puede ser usado para quemadores para producir calor para calderas, secadores, hornos,... En estas aplicaciones nos referimos a gasificadores de calor. Su producción se indica en valores térmicos del gas producido máximo (KW).

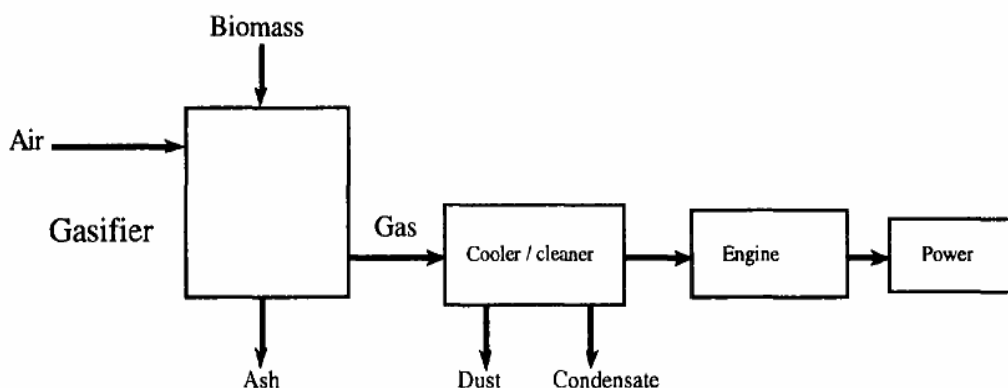


Figura 3.12. Gasificador de energía

Como tienen diferentes productos finales, los gasificadores de energía y calor son dedicados a mercados muy diferentes. Además usan diferentes tecnologías. Una de las más importantes es que los gasificadores de energía deben producir un gas muy limpio gracias al estricto control de calidad de los combustibles por parte de los motores de combustión interna. Así el gas pobre resultante debe ser primero filtrado, enfriado, y mezclado en un sistema complejo de condiciones gaseosas.

En contraste, el gas pobre quemado en quemadores externos proveniente de los gasificadores de calor no requiere ninguna característica especial y son menos costosos comparados que los gasificadores de calor.

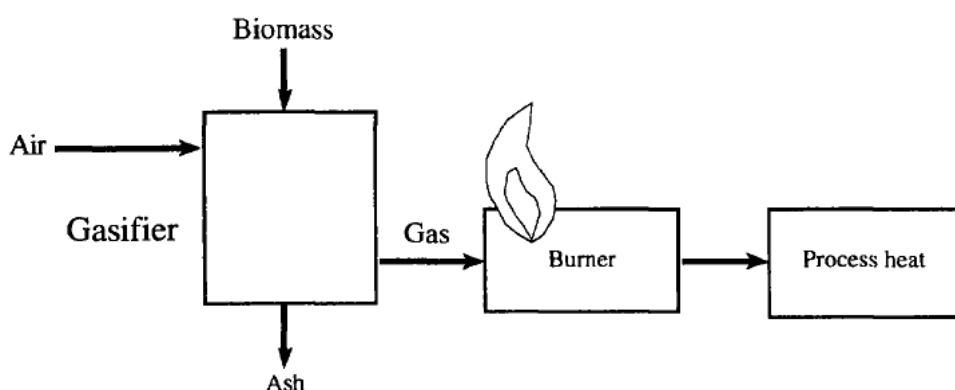


Figura 3.13. Gasificador de calor

3.2.4.5. Biomasa para gasificadores

Solo unas pocos tipos de biomasa se adecuan y son considerados aceptables. Entre ellos podemos encontrar carbón vegetal, bloques de madera seca, cáscaras de coco secas, y cáscaras de arroz.

Tipo de biomasa	Tipo de gasificador	Rango de capacidad	Aplicación
Gasificadores de energía			
Bloques de madera	- Lecho fijo / Descendente	< 500 KWel	-Electricidad / Energía mecánica
Carbón vegetal	- Lecho fijo / Descendente	< 50 KWel	-Electricidad / Energía mecánica
	- Lecho fijo / horizontal		
Cáscaras de arroz	- Lecho fijo / Descendente (open core)	< 200 KWel	-Electricidad / Energía mecánica
Cáscaras de coco	- Lecho fijo / Descendente	< 500 KWel	-Electricidad / Energía mecánica
Gasificadores de calor			
Madera / Carbón vegetal / Cáscaras de coco	-Lecho fijo / ascendente - Lecho fijo / horizontal	< 5 MW	Calor

Tabla 3.5. Sistemas y combustible de gasificación.

3.2.4.6. Status comercial de los sistemas de gasificación de biomasa de pequeña escala

La bajada de los precios de la gasolina a finales de los 80 dejó un pequeño número de gasificadores de pequeña escala estrictamente comercial operando a nivel mundial. La mayoría de los gasificadores alimentados con cáscara de arroz se encuentran en China. Un número en declive de gasificadores de energía alimentados con carbón vegetal continúan operando en América Latina, en especial en Brasil. Unos pocos gasificadores que funcionan con madera también están en activo, el más grande en colonia Mennonite en Paraguay. Sin embargo, un número creciente de gasificadores de calor de mediana y gran escala están siendo instalados en zonas industriales en países desarrollados y en países en desarrollo. El status comercial de los gasificadores debe ser resumido como sigue a continuación:

- Comercialmente testados que los gasificadores están disponibles, especialmente cuando los combustibles son carbón vegetal, madera, cáscara de coco y cáscara de arroz. Estos sistemas tienen una alta fiabilidad. Por lo cual, comparaciones directas de los gasificadores de calor frente a los sistemas convencionales son aceptables.

- El reciente historial de los exitosos gasificadores comerciales de energía es muy limitado y la fiabilidad de estos sistemas funcionando es baja comparada con las opciones convencionales como los sistemas de motores diesel. Subvenciones adicionales para el mantenimiento, repuestos, y salarios de los operarios debe ser incorporado como parte de los gasificadores de energía para compensar la baja fiabilidad y su desarrollo comparado con los sistemas convencionales.

3.2.4.7. Economía de los gasificadores de pequeña escala

Depende de los ahorros que se pueden obtener cambiando de los altos costes relativos del petróleo a los bajos costes de los combustibles de biomasa. Los costes de combustible son los más importantes para un sistema petrolífero. Estos potenciales ahorros deben ser medidos frente los costes adicionales de capital, mayores costos laborales y otros costes de mantenimiento y operación, y además eficiencias más bajas de los gasificadores. Una manera de evaluar el canje entre los costes de capital y los costes operativos es comparar los costes anualizados de la energía producida por cada sistema.

3.2.4.8. Contaminación ambiental

Emisiones gaseosas. No son significantes excepto posiblemente en los alrededores más cercanos a la planta, donde los escapes de CO podrían ser peligrosos para los trabajadores. Comparado con los sistemas de combustibles fósiles son relativamente benignos ya que no producen óxidos de azufre, tienen bajos niveles de partículas y no hay un aumento neto en los niveles de CO₂ mientras la biomasa se consume de forma sostenible.

Efluentes líquidos. La situación no es halagüeña cuando grandes cantidades de efluentes líquidos son producidos, como es el caso de los gasificadores ascendentes y de la gasificación de biomasa altamente volátil. La situación puede verse agravada si sistemas de limpieza con gas húmedo son usados, esto puede aumentar dramáticamente el volumen de líquidos contaminados con alquitrán. En todos los casos, los efluentes líquidos pueden ser altamente tóxicos, y su eliminación sin tratamientos puede contaminar el agua potable local, matar fauna fluvial,.. . Afortunadamente, la mayoría de los gasificadores de energía horizontales y descendentes son equipados con un sistema de limpieza con gas seco, los cuales reducen drásticamente la cantidad del efluente producido. En los gasificadores no se presenta el problema gracias a que estos sistemas normalmente queman el sucio gas pobre completamente, incluyendo los productos alquitranosos, los cuales son gaseosos a altas temperaturas.

Residuos sólidos. Son sobretodo cenizas. Su cantidad puede oscilar entre 1 (madera) y 20 % (cáscara de arroz) en peso del combustible inicial de biomasa. En la mayoría de los casos, la eliminación de las cenizas no es un problema y en algunos casos puede ser utilizada en la industria del acero o del cemento.

4. Carbonización

4.1. Proceso de pirolisis. Características.

4.1.1. Productos primarios de la pirolisis.

Los productos formados son los siguientes (en diferentes proporciones según el proceso empleado):

4.1.1.1. Gases

Compuestos principalmente de CO, CO₂, H₂, CH₄ (depende mucho del porcentaje de humedad inicial), C₂H₆ y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros. Su composición cualitativa varía de forma muy sustancial con la temperatura de operación. (Su poder calorífico oscila entre 3,8 y 15,9 MJ/m³, mediante la pirolisis flash puede aumentarse

hasta 16,7 y 20,9 MJ/m³, ya que se evita la formación de alquitranes)

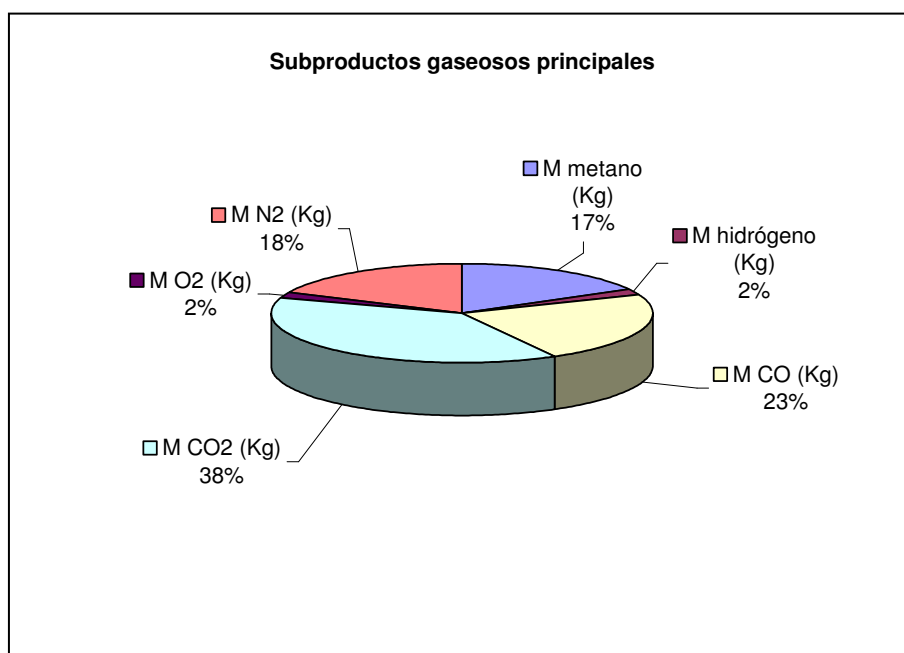


Figura 4.1. Subproductos gaseosos de la pirolisis de pino

Producción de CO₂

La liberación de CO₂ está principalmente causada por el craqueo y reformado de los grupos funcionales carboxilos (C=O) y COOH. El CO₂ proveniente de la **hemicelulosa** muestra tres picos (280°C, 451°C y 658°C). El primero y más grande se atribuye al craqueo de los enlaces C-C y C-O que conectan con la rama principal de la hemicelulosa. El lignina también tiene 2 picos (340 y 700°C). El CO₂ de la **celulosa** aparece a partir de 300° C. El bajo escape de CO₂ de la celulosa se debe al bajo contenido del grupo C=O encontrado. Se asume que el aporte de CO₂ se da a bajas temperaturas por la hemicelulosa y altas temperaturas por el lignina. (>500°C).

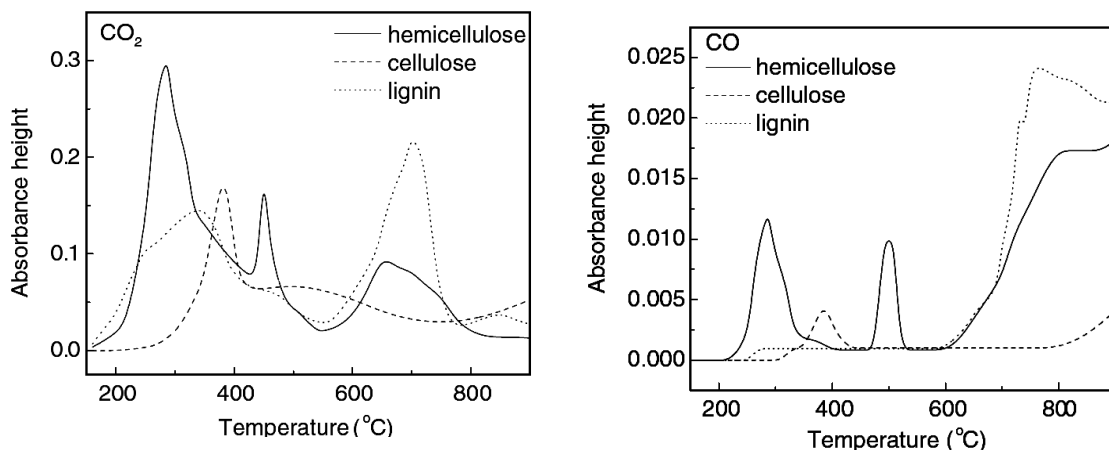


Figura 4.2. Concentraciones de CO₂ y CO frente a la temperatura

Producción de CO

El CO se produce principalmente por el craqueo del carbonilo (C-O-C) y carboxilos (C=O). La hemicelulosa muestra 2 picos (280 y 500°C) a < 600°C con un gran salto a altas temperaturas. Respecto a la celulosa se observa un pico a 380°C. Casi nada de CO se escapa a bajas temperaturas procedente de la lignina aunque aumenta con la temperatura y alcanza su punto más alto a 760°C (pirólisis secundaria, craqueo térmico de los residuos tar en la muestra sólida).

Producción de CH₄

La producción de CH₄ se produce por el craqueo del grupo metoxilo (-O-CH₃) y está principalmente enfocado a bajas tas <600°C.

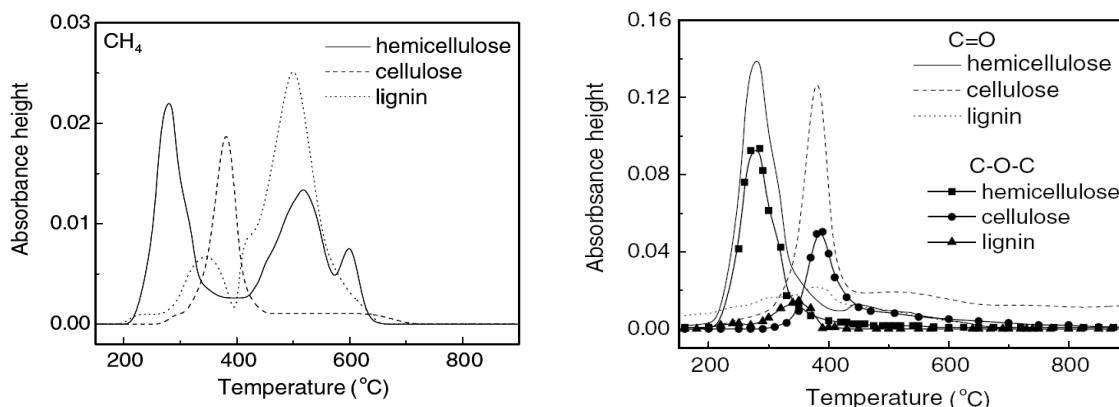


Figura 4.3. Concentraciones de CO₄ y CO

Producción de compuestos orgánicos

El escape de compuestos orgánicos ocurre principalmente a bajas temperaturas y procedente de la celulosa (<400°C) y hemicelulosa (<450°C)

4.1.1.2.Líquidos

Compuesto por una gran mezcla de distintos productos como pueden ser: cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas. Destacan los de carácter oxigenado (alcoholes). Su poder calorífico oscila alrededor de los 25,1 MJ/Kg. Se pueden obtener 225Kg de líquidos por cada Tm de biomasa seca

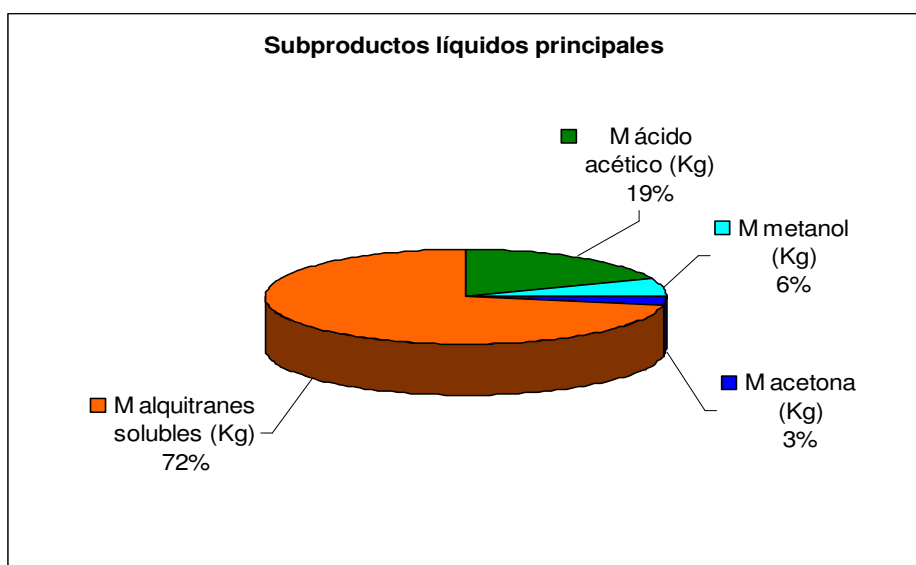


Figura 4.4. Subproductos líquidos de la pirolisis de pino.

Los líquidos de la pirolisis son una compleja mezcla de alifáticos oxigenados y compuestos aromáticos. Los tars contienen resinas, carbohidratos intermedios, fenoles, aromáticos, aldehídos, productos de condensación y otros derivados. Los ácidos piroleñoso pueden contener un 50% de CH_3OH , $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ (acetona), fenoles y agua.

Tienen un fuerte potencial como sustituto de los combustibles petrolíferos. Pueden arder en quemadores y motores estándar o con ligeras modificaciones. Sin embargo el alto contenido de humedad va en detrimento de la ignición. Además los ácidos orgánicos son muy corrosivos. Los restos sólidos en el líquidos pueden bloquear los inyectores o deteriorar los alabes de la turbina. Por otro lado la reactividad de algunos componentes lleva a la formación de grandes moléculas que dan como resultado una alta viscosidad y una lenta combustión

4.1.1.3.Sólidos

El residuo sólido de la pirólisis contiene carbones y alquitranes, así como cenizas. El producto sólido de la pirólisis es un residuo carbonoso que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

El poder calorífico del carbón vegetal obtenido de la pirólisis es comparable al lignito o al coque. El carbón vegetal suele tener una estructura porosa y una superficie que es apropiado para el uso como carbón activo.

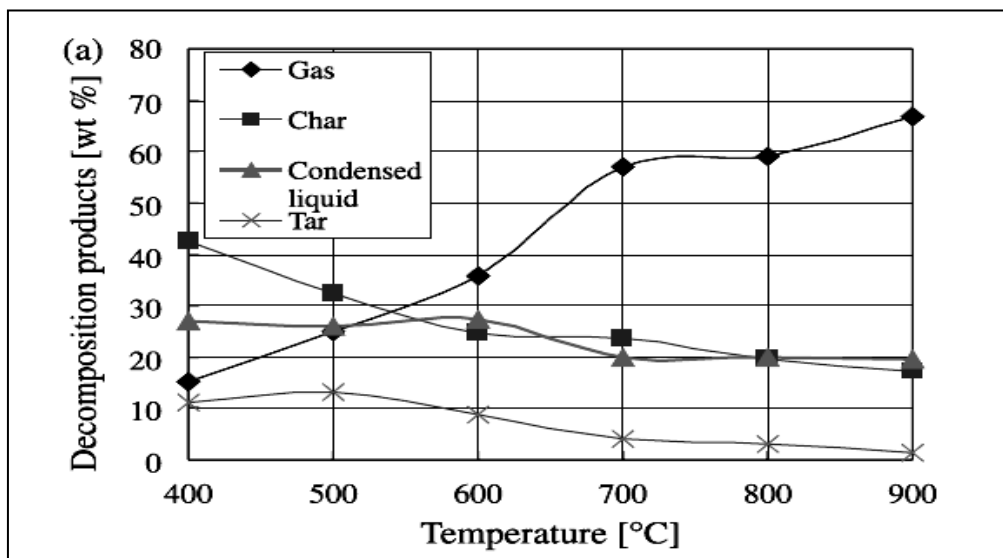


Figura 4.5. Evolución de los subproductos de la biomasa en % de masa

4.2. Caracterización del proceso de carbonización. (física, química y la fluidodinámica de la reacción)

4.2.1. Reacciones de descomposición que gobiernan la pirolisis de las partículas de biomasa

Primero el calor es transportado a la superficie de la partícula por conducción. Un elemento volumétrico calentado dentro de la partícula de biomasa es seguidamente descompuesto en fragmentos de carbón y vapor que consisten en gases condensables (bio-oil) y gases no condensables.

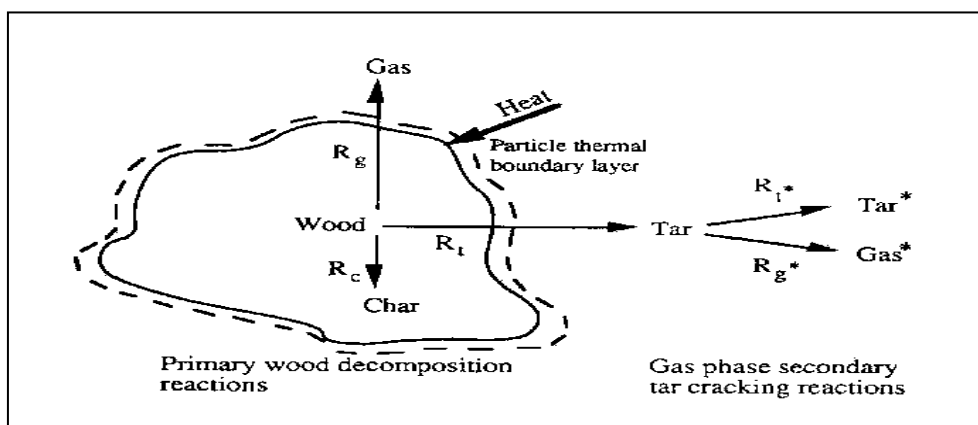


Figura 4.6. Pirolisis de una partícula de biomasa

Debido a la producción volumétrica de vapor, la presión aumenta dentro de los poros de la partícula que es máxima en el centro y disminuye hacia la superficie. Los vapores formados en el interior de los poros de la biomasa están sujetos a un mayor craqueo que lleva a la formación de carbón, gases y alquitranes térmicamente estables. Un largo tiempo de residencia de los vapores dentro de las partículas grandes a bajas temperaturas de pirolisis explica la formación de carbón vegetal en este caso. Sin embargo este mecanismo no se da si la talla de las partículas son menores a 1mm. Cuando los productos gaseosos dejan la partícula de biomasa, entran en la fase de gases circundantes, donde siguen descomponiéndose.

4.2.2. Análisis cinético de la pirolisis.

Modelo cinético

La evaluación cinética de la devolatilización se describe mediante una ecuación de primer grado. Es la aproximación más realista y aplicada para varias especies de biomasa. En concordancia con esto la degradación de la biomasa se determina a través de 3 reacciones paralelas e independientes, las cuales corresponden a la descomposición de sus componentes de constitución: celulosa, hemicelulosa y lignina. Las siguientes

ecuaciones describen el ratio global de conversión y la descomposición térmica de los componentes.

$$-dm / dt = \sum_{i=1}^N (c_i (da_i / dt)) \quad i = 1, 2, 3, \dots N$$

$$- da_i / dt = A_i \exp (-E_i / R * T^a) (1 - a_i)$$

dm / dt = Ratio de pérdida de masa.

A_i = Factor pre-exponencial.

E_i = Energía de activación.

a_i = Ratio de conversión.

c_i = Contribución del proceso parcial a la pérdida de masa global.

Componentes de la biomasa	Parámetros cinéticos	Muestra		
		Hueso de oliva	Residuo forestal	Residuo de algodón
Hemicelulosa	A (1/min)	2,45E+08	1,56E+07	4,19E+08
	E (KJ/mol)	92,9	89,5	95,1
	c (%)	18,2	35,7	13
Celulosa	A (1/min)	1,4E+18	9,43E+22	1,66E+12
	E (KJ/mol)	210,6	284,6	145,1
	c (%)	27,5	24,5	35,8
Lignina	A (1/min)	27,6	28,5	24,7
	E (KJ/mol)	30,6	30,9	30,8
	c (%)	28,5	24,5	25,2

Tabla 4.7. Parámetros cinéticos calculados para la pirolisis de biomasa.

En la figura se muestran las curvas TG y DTG. Como se puede apreciar en las curvas DTG se solapan dos picos que producen un único pico con un primer saliente más destacado en el lado izquierdo. Se corresponde a la descomposición de la hemicelulosa y el pico máximo a de la celulosa. La lignina se descompone lentamente sobre todo el rango de temperaturas, lo que provee un nivel mínimo. El residuo de algodón exhibe un saliente menos pronunciado lo cual indica que contiene menos hemicelulosa que otras muestras. En el extremo opuesto se encuentra el residuo forestal que es el que contiene más hemicelulosa. Finalmente el hueso de aceituna es el que mayor porcentaje de lignina posee.

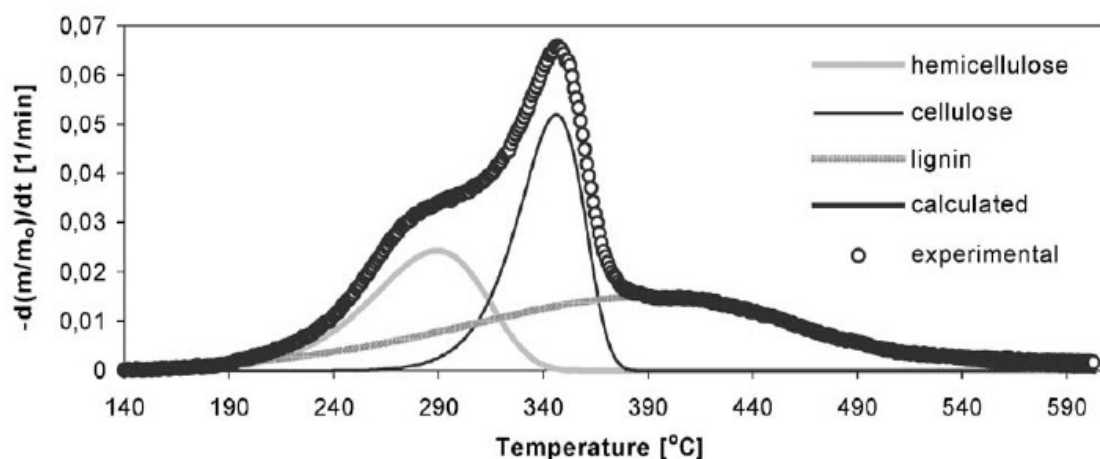


Figura 4. 8. Evaluación cinética del hueso de oliva.

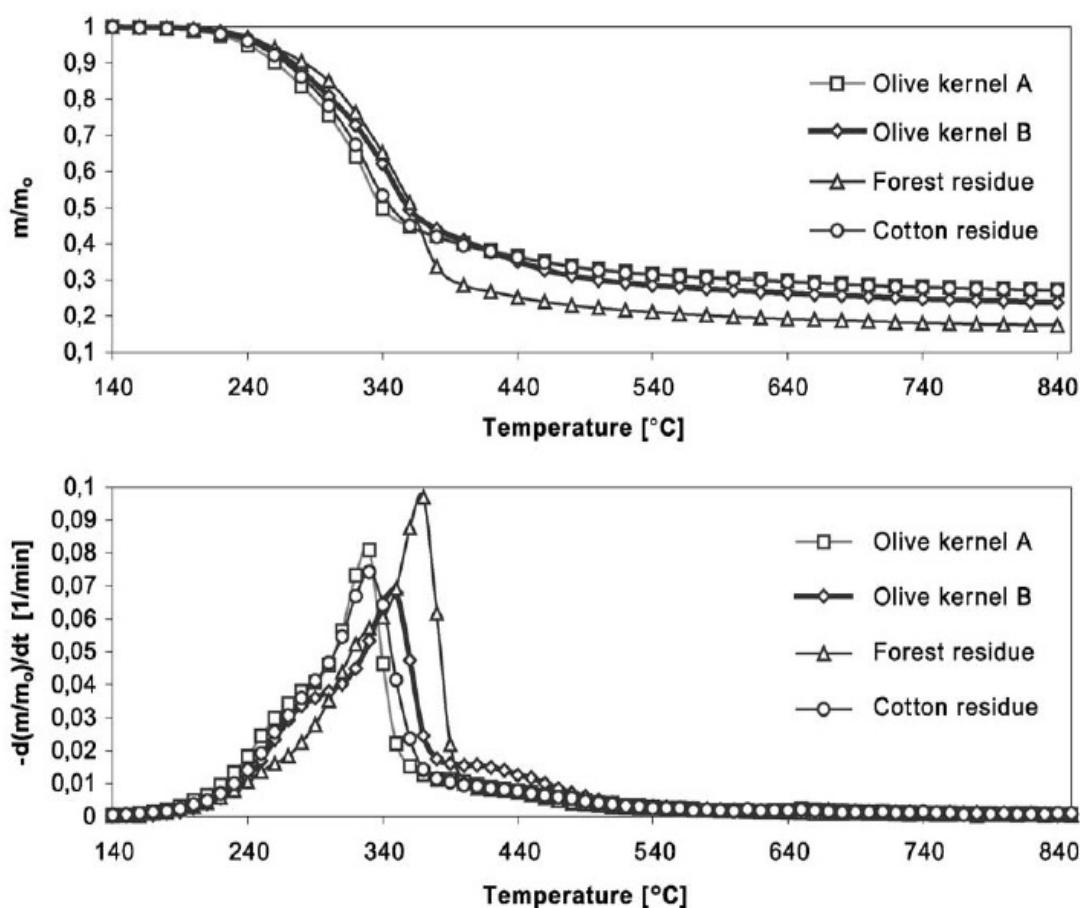


Figura 4.9. Curvas TG y DTG para hueso de oliva, residuo forestal y residuo de algodón.

Observaciones

A. Estudios termogravimétricos muestran que la biomasa tiene más alta reactividad termoquímica que el lignito y tiempos más cortos de devolatilización que aseguran su completa conversión con quemadores que funcionan con encendido de lignito. La principal diferencia entre los 2 combustibles está relacionada con el rendimiento de volátiles y el rango de temperatura en donde la devolatilización toma lugar. Los valores de la energía de activación varían entre 30 y 39 KJ/mol para la lignina, 90 y 125 KJ/mol para la hemicelulosa y 145 y 285 KJ/mol para la celulosa. Para el lignito estos valores oscilan entre 47 y 99 KJ/mol. El comportamiento de devolatilización de cada mezcla se puede predecir satisfactoriamente basándose sólo en los datos experimentales de los materiales de partida.

En todos los casos un aumento en el tamaño de las partículas (por ejemplo de 75 a 425 μm a 425 μm) o un aumento en el ratio de calentamiento (de 10 a 100 $^{\circ}\text{C}$ /minuto) causan un pequeño desplazamiento de los perfiles DTG a temperaturas más altas. Se produce un suave incremento en los valores de los parámetros cinéticos, debido a la menor facilidad que tienen los volátiles para liberarse a través de partículas más grandes y de efectos combinados de transferencia de calor y descomposición cinética, respectivamente.

Durante la conversión térmica de las mezclas de biomasa y lignito en la etapa de pirolisis no se observan interacciones en la fase sólida. Sin embargo las interacciones gas – sólido y las interacciones en la fase gas no son descartadas. [13]

B. Así mismo la reactividad de los combustibles en forma de carbón son importantes para el desarrollo y optimización de los sistemas de combustión y gasificación. Las reactividades de los siguientes carbones desciende en el siguiente orden: biomasa > lignito > antracita. Los carbones vegetales pertenecen a los materiales carbonosos más reactivos. El mayor motivo son los poros y una estructura altamente desordenada. La influencia de la biomasa en la combustión con lignito es mejor que la influencia de las mezclas de carbón mineral....

Está probado que los biocombustibles sólidos apoyan la combustión de carbones pobres, debido a sus mejores características. sin embargo, el uso de de biomasa con lignito puede causar serios problemas en otras partes de la instalación. Por ejemplo las altas cantidades de componentes volátiles a una temperatura mucho más baja (200 $^{\circ}\text{C}$), puede llevar a liberar volátiles a la atmósfera o a incendios accidentales en unidades de manipulación de combustible (pulverizadores,...).

4.2.3. Análisis de la degradación de los componentes de la biomasa sometidos a pirolisis.

La hemicelulosa se descompone fácilmente, entre **220°C y 315°C** se da su mayor pérdida de peso, con un máximo en **268°C**, y su residuo sólido a 900°C es del 20%. Es de carácter exotérmico. La pirólisis de la celulosa se da a temperaturas más altas, entre **315°C y 400°C** con una pérdida de peso máxima en **355°C**, pasando de 400°C quedan niveles muy bajos de celulosa (6,5%). Es una degradación endotérmica. La descomposición de la lignina es la más difícil (0,14%/°C), ocurre entre la 160° y los 900°C, quedando un resto del **45%. (exotérmica)**. Genera un residuo sólido muy alto.

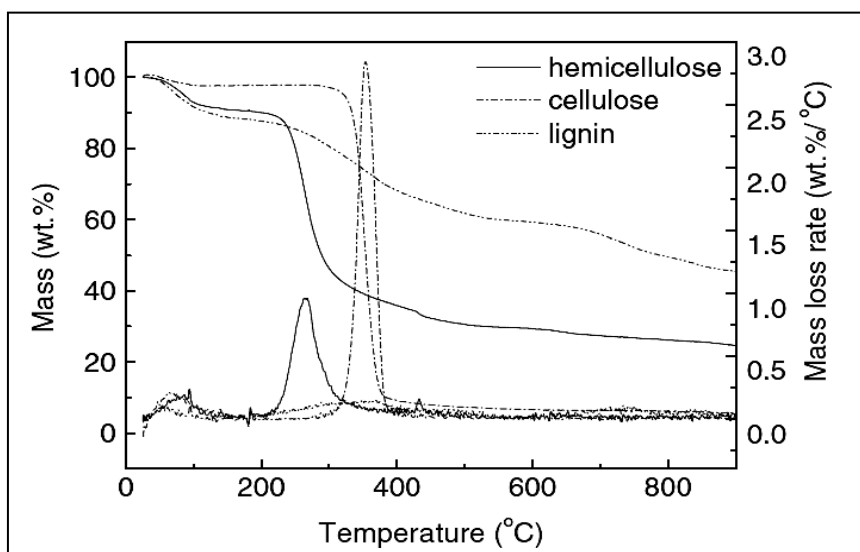


Figura 4.10. Degradación de los componentes de la biomasa frente al aumento de temperatura.

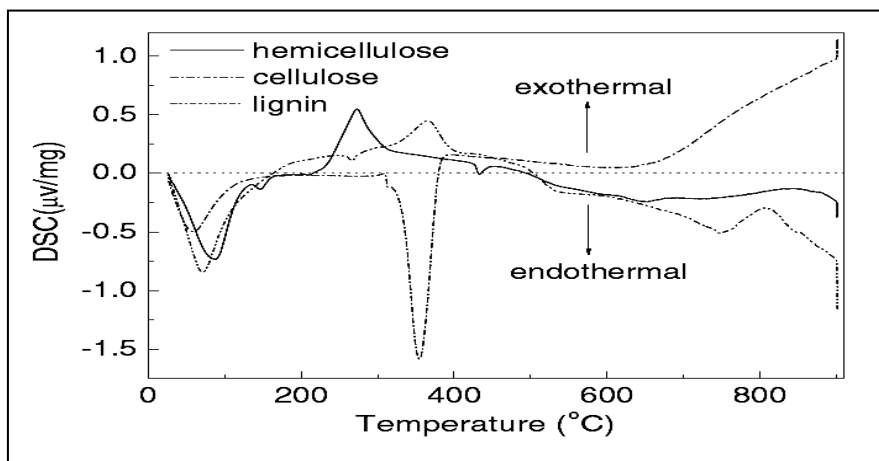


Figura 4.11. Comportamiento térmico de los componentes de la biomasa. Balance de entalpía.

El análisis de la entalpía muestra varias conclusiones. Las reacciones ocurridas a 100°C son endotérmicas debidas a la eliminación de la humedad. El proceso de carbonizado (lignina y hemicelulosa) es altamente exotérmico mientras que la volatilización (celulosa) es endotérmica. El escape de gases se produce principalmente entre 200° y 400°C, que corresponde bien con el gráfico de la diapositiva anterior, excepto para el CO y CO₂ que se liberan a más alta temperatura.

4.2.4. Estudio de parámetros físicos que influyen en la pirolisis

4.2.4.1. Ratio de calentamiento

A menudo se asume que el rendimiento de carbón continuará aumentando mientras el ratio de calentamiento continua reduciéndose. Esta afirmación no es cierta, casi siempre una asíntota es alcanzada por debajo de la cual un descenso en el ratio de calentamiento no mejora la producción de carbón.

Rendimientos de carbón vegetal de la pirolisis de bagazo en Nitrógeno con calentamiento lineal de 115 °C a 541 °C	
Ratio de calentamiento (°C/ minuto)	Rendimiento de carbón (% base seca)
0,5	34
1	36
2	35
5	32
10	32
20	30

Tabla 4.1. Influencia del ratio de calentamiento.

Por ejemplo precisos estudios termogravimétricos demuestran que no hay ninguna influencia en el rendimiento de carbón de bagazo al bajar el ratio de calentamiento de 80 a 10 °C / minuto. Un descenso en el ratio de calentamiento de 2 a 0,5 °C / minuto no produce ningún cambio significativo en el rendimiento a 541 °C, sin embargo un pequeño aumento en el rendimiento de carbón se aprecia al pasar de **20 °C a 2°C /minuto**, como se puede comprobar en la tabla 4.1. y la figura 4.12.

MacKay y Roberts relataron un incremento del 22% al 32% en el rendimiento de carbón de secuoya al reducir el ratio de calentamiento de 200 °C /minuto a 1° C / minuto.

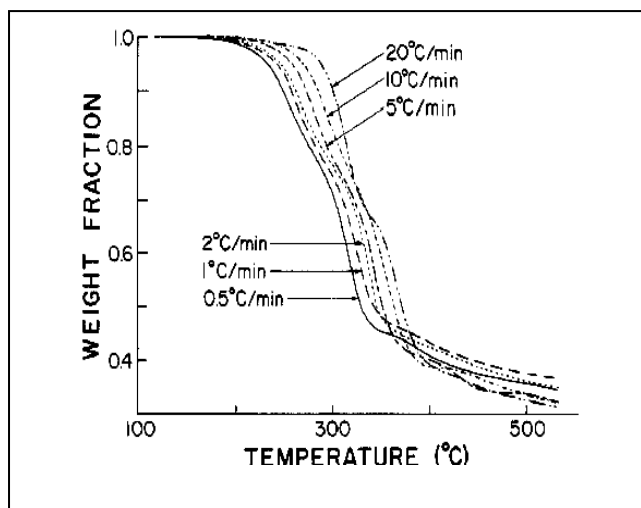


Figura 4.12. Curvas termogravimétricas de la pirolisis de bagazo para diferentes ratios de calentamiento

4.2.4.2.Pretatamientos térmicos

Influencia de varias historias de temperatura en los rendimientos de carbón vegetal de Bagazo	
Historia de temperatura	Rendimiento de carbón vegetal (% base seca)
5 °C / minuto a 541 °C manteniendo 20 h a 235°C	32
5 °C / minuto a 541 °C manteniendo 21 h a 260°C	35
25° C / minuto hasta 172 °C, 16 h a 172 °C, 25 °C / minuto hasta 248 °C, 32,5 h a 248 °C y 25 °C / minuto hasta 541 °C	32
20 °C / minuto hasta 196 °C, 20 h a 196 °C, 20 °C / minuto hasta 260 °C, 46 h a 260 °C y 20 °C/ minuto hasta 541 °C	31
ídem con 65 h a 260 °C	49

Tabla 4.2. Influencia de los pretratamientos térmicos

En 1975 Broido y Nelson publicaron un artículo a cerca de pretratamientos térmicos de celulosa **entre 230 °C y 275 °C** previo a una pirolisis isotérmica a 350 °C. Dependiendo de la temperatura y de la duración del pretratamiento el rendimiento podría oscilar entre un 11 y un 27,6%. Explicaban este resultado como un mecanismo de degradación consistente en una reacción de depolimeración que no formaba carbón y una reacción de deshidratación que formaba un 36 % de carbón vegetal. Este resultado podría concluir que el rendimiento de carbón podría estar influenciado por pretratamientos térmicos, pero **no es el caso demostrado por experimentos posteriores**.

Varhegyi mostró que un pretratamiento isotérmico de 2h a 260 °C previo a una elevación de 10°C / minuto hasta los 450°C no influye en el rendimiento de carbón.

4.2.4.3.Atmósfera

Se utilizan gases que provoquen una situación anaerobia y que eviten la oxidación de la biomasa. La emisión de N₂ es la más utilizada. Si se utiliza H₂ nos encontramos ante la hidropirolisis), Otras posibilidades son utilizar un gas inerte (Argón y He) o realizar la pirolisis en vacío.

4.2.4.4.Presión

Hay varios casos: 10MPa (reducción del contenido de O₂), atmosférica, por encima de la presión crítica del agua (22 Mpa), ...

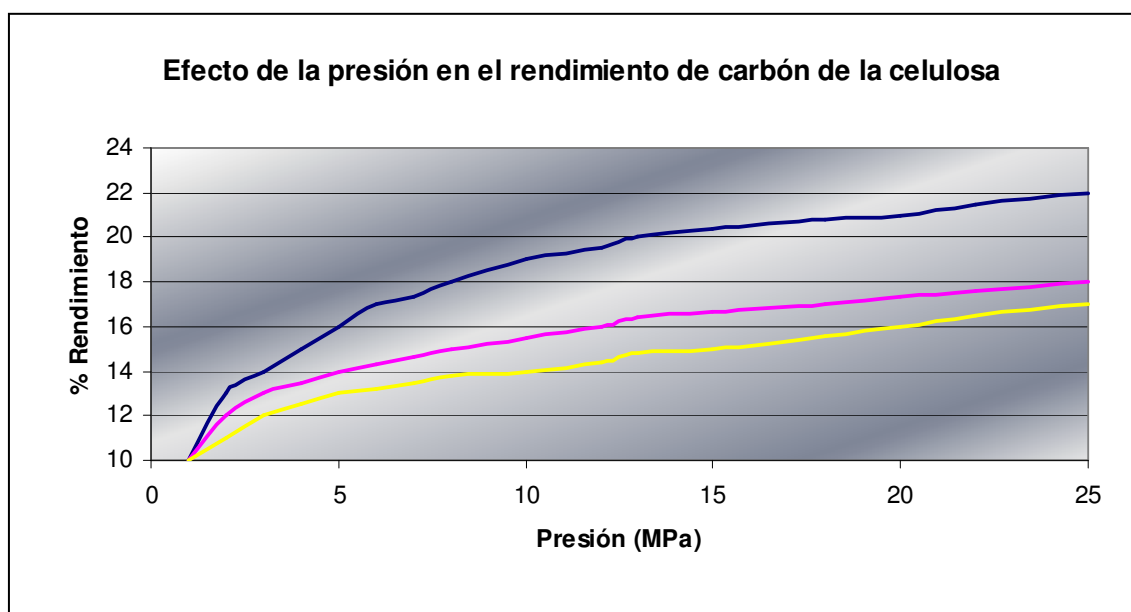


Figure 4.13. Efecto de la presión en el rendimiento de carbón de la celulosa para diferentes flujos (diferentes tiempos de retención en la fase vapor). El flujo más pequeño es el que obtiene mejores rendimientos para una misma presión (azul).

Importantes investigaciones han demostrado que un aumento de la presión hasta 1 Mpa mejoran los rendimientos a presión ambiente y que condiciones más rigurosas producen menores mejoras. Largos tiempos de retención en la fase-vapor (flujo bajo) mejora significativamente el rendimiento de carbón. Con temperaturas por encima de 400 °C, preferiblemente sobre 535 °C y presiones por encima de 6,8 Mpa, la biomasa se convierte rápidamente en coque. El rendimiento de coque es del 25 al 35 % con un contenido en carbono fijo del 62 al 86 % y un contenido de materia volátil del 8 al 17 %. El coque tiene un poder calorífico entre 26700 y 35000 KJ /Kg. Cuando el coque es producido en una retorta sellada y calentada exteriormente, la presión se autogenera por el proceso de pirolisis y solo los gases acompañan la formación de coque. Este producto gaseoso se compone de dióxido de carbono y metano principalmente y tiene un poder calorífico de 11000 a 18000 KJ / m³.

4.2.4.5. Catalizadores

Tanto los ácidos Bronsted y Lewis son conocidos por influenciar favorablemente el rendimiento de carbón de materiales celulósicos. Se ha encontrado que mezclando con el substrato un 0,01 % nominal por mol de catalizadores, como ZnCl₂, el rendimiento aumenta del 21% al 29%. Un incremento en la carga de ZnCl₂ del 0,01 al 0,03 % aumenta el rendimiento hasta un 35 % . Similares efectos han sido observados al utilizar ácidos como H₂SO₄ y bases como KOH y NaOH.

Sin embargo los rendimientos indicados en la tabla 4.3. son corregidos por el peso de los catalizadores inorgánicos absorbidos. El rendimiento de carbón con la adición de catalizadores no es mucho más grande que el rendimiento sin catalizadores. Se muestra que el ratio de formación de carbón mejora significativamente añadiendo ácido sulfúrico. No obstante también lleva asociado unos aumentos de coste y dificultades asociadas al manejo de ácidos.

Tratamiento	% Catalizador	Rendimiento de carbón a 260 °C	Tiempo (horas)	Rendimiento de carbón a 550 °C	Observación física
<i>Experimentos patrón</i>					
Ninguno	0	53	30	35	Carbón limpio
<i>Experimentos con ácidos</i>					
1 M H ₂ SO ₄	2	58	4	37	
5 M H ₂ SO ₄		59	4	42	Carbón limpio
<i>Experimentos con bases</i>					
1 M KOH	3	49	6	37	Pérdida total de la integridad estructural para todos los experimentos con hidróxidos.
10 M KOH	28	68	5	50	
5 M KOH	2	52	16	36	
5 M NaOH	12	74	4	47	
<i>Experimentos con sales</i>					
NaCl	2	55	20	39	Carbón limpio
KCO ₃	1	52	28	36	Parte de carbón formada por condensación en la fase vapor

Tabla 4.3. Resultados de la pirolisis de bagazo tratada con catalizadores inorgánicos

4.2.4.6. Tipo de biomasa

Especies	Nº de ensayos	Rendimiento %
<i>Maderas duras livianas</i>	3	30,9
<i>Roble rojo sureño</i>	16	29,6
<i>Mezcla de roble y nogal americano</i>	11	29,2
<i>Nogal americano</i>	1	27,9

Tabla 4.4. Análisis de los diferentes componentes de diferentes tipos de biomasa. Basado en 31 ensayos en un horno de ladrillo "seven cord"

La biomasa lignocelulósica es la más adecuada para los procesos de pirólisis.

Varios residuos agrícolas (cáscara de kukui, nuez de macadamia, cáscara de pacana,...) y especies tropicales ofrecen rendimientos más altos que las maderas tradicionalmente empleadas por la industria en EEUU y Europa. Además los rendimientos de la cáscara de avena y arroz y de las cáscaras de las pipas de girasol se acercan mucho a aquellos de las maderas duras.

Existe una correlación entre la producción de carbón vegetal y el contenido de lignina insoluble en ácido. Especies con alto contenido de lignina ofrecen altos rendimientos. Las briquetas de carbón vegetal hechas de residuos agrícolas y carbón procedente de especies tropicales son una fuente prometedora de carbón renovable para su uso en las fundiciones de minerales metálicos.

	Glucosa	Xylosa	Galactosa	Arabinosa	Manosa	Celulosa	Hemicelulosos
Residuos de ajo	26,9	4,6	3,2		0	24,2	6,9
Cáscara de avena	53,8	17		1,3		48,4	16,1
Mazorca de maíz	29,2	23,6	1,7		0	26,3	25,2
Madera de abedul	39,7	27,7			0	35,7	25,1
Madera de aliso	35,9	25,2	1,5		0	32,3	23,5
Madera de pino	46,8	6,6	2,5		10,8	42,1	17,7
Bambú	43,9	20		0,9	0	39,5	17,6
Madera de eucalipto	47,8	10,5	4,4		0	43	13,2
Madera de leucaena	45,3	15,2	1,7		0	40,8	15
Cáscara de pipa de girasol	29,7	19,4	1,6			26,7	18,4
Cáscara de almendro	27,5	28,7	2		0	24,7	27
Madera de roble	38,3	19,2	1,9			34,5	18,6
Madera de abeto	45,7	5,9	3		14,4	41,1	20,9
Cáscara de nuez de Castilla	23,3	18,9	2,4			21	18,8
Cáscara de coco	26,9	28		3,2	0	24,2	24,7
Cáscara de arroz	34,3	15,8	1,2	2,1		30,9	16,8
Cáscara de nuez de Macadamia	29,9	20,2			0	26,9	17,8
Cáscara de nuez de kukui	16,2	14			0	14,6	12,3
Cáscara de pacana	6,2	3,1	1,2			5,6	3,8

Tabla 4.5. Análisis de diferentes tipos de biomasa

$$\% \text{ Celulosa} = (\% \text{ Glucosa}) * 0,9$$

$$\% \text{ Hemicelulosa} = ((\% \text{ Galactosa}) + (\% \text{ Manosa})) * 0,9 + ((\% \text{ Xylosa}) + (\% \text{ arabinosa})) * 0,88$$

Lignina medida en ácido insoluble

Un estudio sobre diferentes especies mostró un rango en los rendimientos de carbón del 25,9 al 35,2 % que se relaciona con los contenidos de lignina, holocelulosa y extractivos de la materia prima.

La composición del sustrato también afecta a la producción de cenizas y contenidos de azufre, así como a la producción de valiosos productos químicos como ácido fórmico, ácido acético, acetato de sodio, etc. La densidad de la biomasa también influye en el rendimiento y la densidad del carbón. Así las maderas duras ligeras ofrecen un 30,9 % mientras que nogal americano solo un 27,9 %. El motivo de esta

relación inversa no es claro. Históricamente la industria de hierro prefería maderas densas como el nogal, abedul, arce, roble,...

4.2.4.7. Temperatura final

Tanto el rendimiento de carbón como su calidad están fuertemente influenciados por el pico de temperatura del proceso de pirolisis. Así mismo los porcentajes del calor de la biomasa inicial contenido en el gas aumenta con el aumento del pico de temperatura final.

Cuando el pico de temperatura supera los 200°C, el residuo sólido pirolítico cambia de madera “tostada” a madera “torrefactada” a “pyrochar” a carbón convencional y a coque.

Por supuesto el tiempo de residencia también afecta al rendimiento y a la calidad del carbón, pero normalmente este tiempo es seleccionado después de determinar el pico de temperatura. Así el tiempo de residencia pasa a ser una variable dependiente cuyo valor es seleccionado después del tamaño de la carga y de la temperatura pico.

Torrefacción

Este proceso consiste en calentar la biomasa hasta un pico de temperatura entre 240 y 260 °C. Para substratos con un volumen de 1 cm³, el tiempo de residencia para la torrefacción requerido es de 2 horas a 230°C, 1 hora a 250°C y 0,5 horas a 280° C. En estas regiones de tiempo-temperatura la hemicelulosa es térmicamente degradada pero no destruida. Los grupos acetilos son partidos y el ácido acético pasa a ser un producto gaseoso.

La madera en este estado posee una poder calorífico de 20900 KJ / Kg. y un contenido de carbono fijo entre 35 y 40 %. No es ni fermentable ni higroscópico. Investigaciones muestran que cuando el tiempo de residencia a 260°C se lleva a las 65 horas, un carbón de buena calidad es obtenido con un alto rendimiento (49 % ver tabla) y un contenido de materia volátil de alrededor del 30 % .

Pyrochar

Cuando la biomasa es calentada a temperaturas un poco más altas, sin exceder los 350 ° C, el pyrochar es producido. Está formado de un 50 % y carece del carácter fibroso de la biomasa inicial. Alcanza los 26 MJ / Kg. y un contenido de materia volátil del 35 % o más. El comienzo de los procesos exotérmicos, donde ocurre el 50 % de pérdida de peso, define el pico de temperatura de la formación del pyrochar. Las reacciones de pirolisis se convierten en exotérmicas cuando el porcentaje de materia volátil contenido en el pyrochar ronda entre un 35 y un 45 %.

No obstante, la demanda de calor de las reacciones de pirolisis depende también de presión ambiente y del tamaño de las partículas. Por ejemplo, pequeñas partículas de celulosa exhiben un fuerte comportamiento endotérmico durante todas las etapas de la pirolisis en vacío.

Carbón convencional

Por encima de los 320 °C, el carbón vegetal convencional tiene un contenido de materia volátil de menos del 35 %. Es difícil controlar el pico de temperatura en este régimen debido al carácter exotérmico de las reacciones de pirolisis en los reactores de escala industrial. Por lo cual el rango del pico de temperatura empleado para producir carbón convencional normalmente no se encuentra entre límites estrechos.

En EEUU los hornos Missouri son usados para producir un carbón con un rendimiento del 25% en un ciclo de operación entre 7 y 12 días. Sin embargo, en otros países el tiempo ciclo puede durar de 1 a 2 meses. El promedio de temperatura en el interior de un horno Missouri puede oscilar entre 450 y 510 °C y varía significativamente a lo largo del horno, lo que produce variaciones en la calidad del carbón a lo largo del horno. Cerca del núcleo el carbón contiene un 85 % de carbono fijo mientras que en el suelo ronda entre un 75 y un 79 %.

Los hornos colmena desarrollados en Brasil han alcanzado producciones del 31-35 % con un contenido de carbono fijo del 70 % en un ciclo de operación de 8 días. Los brasileños han desarrollado maneras de rescatar los productos condensables de la pirolisis asociados a la producción de carbón. El coste de esta etapa de recuperación es alto y puede no resultar económico.

4.2.4.8. Ejemplos de ensayos reportados en [27]

1. La **pirolisis rápida** (100 min.) a **0,1 MPa** de 5 variedades de astillas de madera en una retorta calentada dentro de un horno eléctrico produce carbones con rendimientos de carbono fijo oscilando entre el 20,2 y el 22,9 % en peso.
2. La **pirolisis lenta** (300 minutos) en las mismas instalaciones aumenta los valores de carbono fijo entre 22,3 y 24,1 %. Cuando el tiempo de calentamiento se extiende a **480 minutos** el rendimiento de carbono fijo pasa a estar entre 24 y 25 % para madera de pino.
3. Para las 5 mismas especies, la **pirolisis rápida (70 minutos)** a **1MPa** en recipientes de presión calentados herméticamente produce carbón con rendimientos de carbono fijo entre 25,4 y 29,9 % .
4. En el caso de la **madera de roble** usada para fabricar carbón en los **hornos Missouri**, la pirolisis a **1 MPa** aumenta el rendimiento de carbono fijo de menos del 24 % en los **hornos Missouri** al 29,9 % en los **recipientes de presión**. El tiempo requerido baja de 10000 minutos para el horno Missouri a cerca de 70 minutos en el recipiente presurizado
5. Altos rendimientos se producen a **1MPa** de una amplia variedad de residuos agrícolas. Por ejemplo las **cáscaras de arroz y de avena** ofrecen un 27,6 y un 26,3 % respectivamente. **Especies tropicales como el bambú, eucalipto, y leucaena** presenta rendimientos a **1 MPa** de 32,1, 32,8 y 32,3 % respectivamente. Son más altos que los obtenidos de madera de roble en similares condiciones y mucho más altos que los obtenidos con las maderas duras tradicionalmente utilizadas en los hornos Missouri.
6. Las **cáscaras de nuez** son especialmente buena materia prima para la producción de carbón a presiones elevadas. Los rendimientos de carbono fijo para las **cáscaras de kukui, macadamia, pecana, y nogal** son respectivamente 41.4, 35.9, 34.9 y 29.1 %.
7. Hay una correlación entre los rendimientos de carbono fijo medido a 1MPa y el **contenido de lignina insoluble en ácido** de la biomasa.

La industria debe dedicar más atención a la producción de carbón de los residuos agrícolas. Por ejemplo en Noruega, las briquetas fabricadas del carbón de cáscara de arroz podrían satisfacer la demanda actual y futura de carbón renovable de la industria ferrosilíceo. La sustitución de carbón mineral por carbón vegetal en la industria metalúrgica y en otros lugares puede reducir las emisiones de efecto invernadero mientras que crearía nuevos puestos de trabajo en los países en vías de desarrollo y realzaría la rentabilidad del negocio agrícola.

4.3. Estudio de las tecnologías disponibles para producción de carbón vegetal.

4.3.1. Hornos tradicionales de carbonización.

La producción de carbón, la pirólisis lenta de la madera a temperaturas no superiores a 500°C es un proceso que se ha explotado durante miles de años. Es importante señalar que la conversión de madera en carbón no aumenta el contenido energético del combustible, de hecho disminuye., lo que plantea la incertidumbre entre el uso de la combustión de o la carbonización de la misma y posterior combustión en forma de carbón vegetal.

Los pasos en el proceso de fabricación de carbón vegetal son los siguientes: cultivo de la leña, cosecha de la madera, secado y preparación de la madera para la carbonización, carbonización de la madera para obtener el carbón vegetal, tamizado, almacenamiento y transporte a depósito o puntos de distribución.

Este tipo de hornos tienen una vital importancia en los países del tercer mundo, principalmente en África donde se encuentra la mitad del consumo de carbón. Usando un 23% de eficiencia en base seca, resulta que 100 M Tn de madera son cortadas anualmente para la producción de carbón. Las cifras de producción y consumo son difíciles de estimar en los países en vías de desarrollo. Los cambios en el consumo se supone que solo cambian debido al aumento de la población. Dentro de la energía de las urbes de Kenya el 66% lo provee el carbón vegetal y el 18% la madera. En el medio rural sólo el 5% usa carbón vegetal frente a un 90% que usa madera. En los 90 el crecimiento de la población en África fue de un 2,9% frente a un 4,6% de ratio de urbanización.

Horno de parvas	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Movilidad	Demanding as far as the skill of the operator is concerned
Inversiones nulas	Intensiva en mano de obra
Materias primas locales	Carbón de calidad variable, ensuciado por la cobertura
Carbonización de grandes troncos sin trocear	Sensible a las condiciones climáticas
Capacidad ajustable	Bajos rendimientos
No hay descarga	Contaminación importante
Uso de residuos de biomasa	

Tabla 4.7. Características del horno de parvas

Figura 4.14. Parva de tierra durante su construcción. Observar las maderas de gran diámetro colocadas en la base de las pilas. Ghana.



Horno de fosa de tierra	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Materia prima local	Requiere un firme apropiado y con buenas características
Inversiones muy pequeñas	Importante mano de obra
Fácil de operar	Carbonero experimentado y hábil
Carbonización de grandes troncos sin trocear	Sensible a las condiciones climáticas
Capacidad ajustable	Bajos rendimientos
Descarga en un perímetro pequeño	Contaminación importante
Carbón relativamente limpio	

Tabla 4.8. Características del horno de fosa de tierra

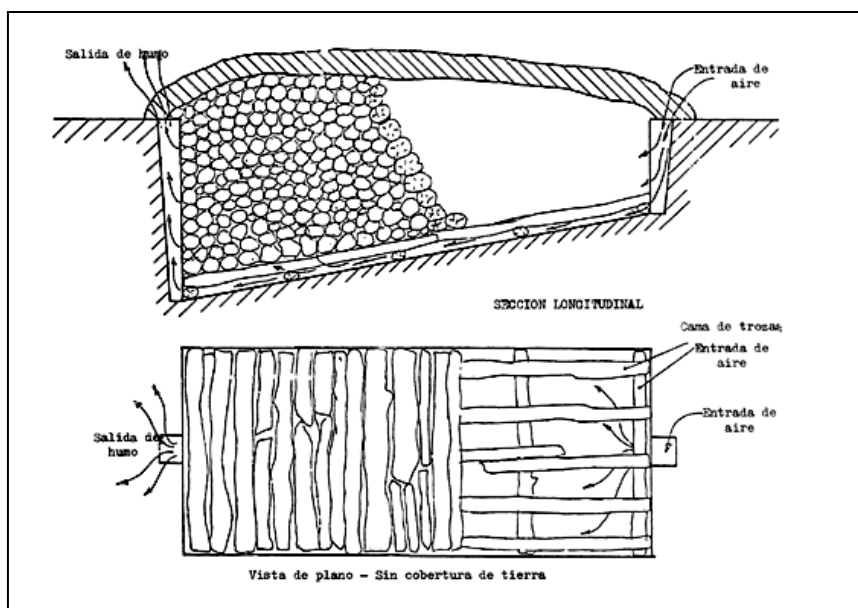


Figura 4.15. Esquema de un horno de fosa de tierra.

Horno de ladrillo	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Materia prima local	Su construcción necesita un constructor habilidoso
Buen aislamiento térmico	Instalación fija
Fácil de operar	Costes de descarga
Carbón limpio y homogéneo	Capacidad determinada
Largo tiempo operativo	Enfriamiento lento
No es sensible a las condiciones climáticas	Contaminación importante
	Troceado de grandes troncos

Tabla 4.9. Características del horno de ladrillos

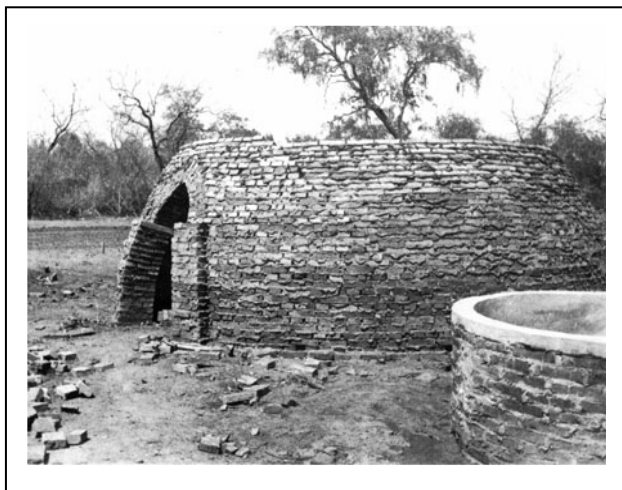


Figura 4.16. Horno media naranja parcialmente completado y tanque de depósito de agua completado

Horno de acero	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Movilidad	Alta inversión
Ciclo corto debido a su rápido enfriamiento	Tiempo de vida (corto), depende del operario y de la calidad de los materiales
Fácil de operar	Capacidad determinada
Carbón limpio y homogéneo	Troceado de grandes troncos
Descarga en un perímetro pequeño	Contaminación importante
No es sensible a las condiciones climáticas	

Tabla 4.10. Características del horno de acero

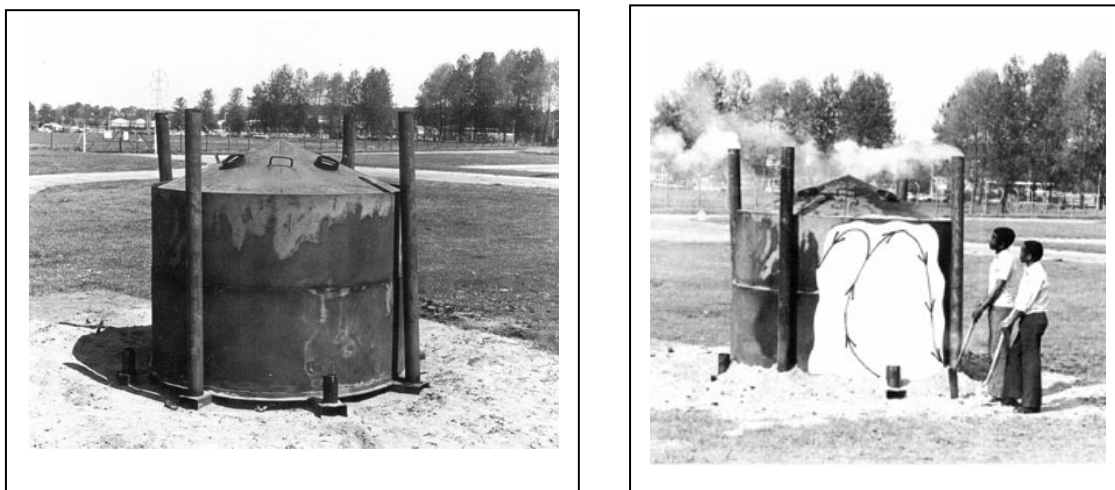


Figura 4.17. Horno metálico transportable. Corrientes de aire y de los gases de descarga en el horno.

A continuación se incluye una tabla resumen con hornos utilizados de diferentes características, épocas y lugares.

Tipo de horno	Rendimiento másico en base seca (%)	Características	País
Tradicional	15,5 – 26,2		India
Pequeño circular	23	Colocación horizontal	India
Tradicional	31,4	Colocación vertical	Francia
Mozambique largo	10 – 15		Mozambique
Grande Suriname	20 – 25		Mozambique
Tradicional	2 -17	Diversos contenidos de humedad, condiciones climáticas y de T ^a	Tanzania
Tradicional	39 – 42	Colocación vertical, cubierta con una chapa metálica, se utilizan troncos de Acacia Bussei de >15 cm diametro	Somalia
Casamance	25 - 30	Colocación horizontal, chimenea construida con bidones, rápido	Mozambique, Senegal

Tabla 4.11. Estudios de de hornos de carbón vegetal de parvas en el pasado

Tipo de horno	Rendimiento másico en base seca (%)	Características	País
Chino	16 – 21	Especies diversas, 1Mg madera	India
Chino	28	Rápido, madera verde	India
Chino	20 – 28	Bajo rendimiento para pino	India
Chino	13,7	Pequeño	Sri Lanka
Comercial ladrillo	30	Cáscaras de coco	Sri Lanka
Filipinas	20 -25		Filipinas
Mejorado	25 – 30		Liberia
Mejorado	12,5 - 20		Sudáfrica

Tabla 4.12. Estudios de de hornos de fosas de tierras en el pasado

Tipo de horno	Rendimiento másico en base seca (%)	Características	País
Siamés	30	Madera de Mangle	Malasia
Nilgiri	21		India
Standard Beehive	33	Rendimiento del 36 % con cámara exterior	Brasil
Sudafricano	12,5 – 23,5		Sudáfrica
Media – naranja comercial	26,6		Argentina

Tabla 4.13. Estudios de de hornos de carbón vegetal de ladrillo en el pasado

Tipo de horno	Rendimiento másico en base seca (%)	Características	País
Trihan	21,2 – 37		India
La Bastia	11,8 – 33,6		India
Magnien (Mark V)	20 – 20,4	Bajos rendimientos sin chimenea y altos con chimenea	Francia
Mark V	20 – 35	Bajos rendimientos para hornos pequeños y altos para hornos grandes	Costa de Marfil
Mark V	10 – 18	Poco control	Tanzania
Mark V	25		Liberia
TPI	18,9 – 31,4		7 países
TPI	21 – 24,4	Bajos rendimientos para roble y altos. Para cáscaras de coco	

Tabla 4.14. Estudios de de hornos de carbón vegetal de metálico portátiles en el pasado

Tipo de horno	Rendimiento másico en base seca (%)	Características	País
Hormigón			
Missouri	33		Estados Unidos
Arcilla refractaria			
Japonés	14-20		Japón
Bidón de aceite			
Tongan	22,7	Excluyendo los finos e incluyendo la madera inquemada	Fiji
MINI - CUSAB	23,4		Fiji
MINI - CUSAB	33 – 34		Montserrat

Tabla 4.15. Estudios de hornos de carbón vegetal en el pasado y sus características

4.3.2. Medidas técnicas para aumentar la eficiencia

4.3.2.1. Secado de la biomasa

Una biomasa húmeda puede contener un 50/60 % de humedad. Durante un secado pasivo en un almacenamiento de verano se puede reducir hasta un 30 %. Un silo de secado activo puede reducir el contenido de humedad hasta un 12 %. El secado se puede llevar a cabo por medio de secado solar, o a través de flujo de calor sobrante o por secadores especialmente diseñados para la operación

La fase exotérmica no empieza hasta que todo el agua se ha evaporado. Esto coge energía de la quema de madera, por lo cual hay menos disponible para convertirla en carbón vegetal durante la fase de carbonización.

El efecto es lineal, para una reducción del 10 % de humedad provoca un aumento de la eficiencia en un 3,8%. Por ejemplo una madera verde con un 40% de humedad (base húmeda) se quedará en un 20 % pasados entre 30 y 45 días en la estación seca. Por lo que la eficiencia aumentaría de un 15% a un 22,5% respectivamente.

Sin embargo, será necesario demostrar las conclusiones anteriores, ya que existe la creencia extendida de que la madera verde produce un carbón más denso y más comercializable.

Además esta operación supone una considerable inversión en capital circulante para los carboneros, muchos de los cuales sobreviven de manera precaria. En Ruanda para superar este obstáculo se trabaja con los granjeros, antes que con los cultivadores de árboles o los propietarios de los recursos madereros. También existe el riesgo de robo y de los ataques de las termitas.

4.3.2.2. Mejora del proceso

Observaciones hechas en los hornos de parvas han puesto de manifiesto características operacionales y de diseño que **no** favorecen la eficiencia del horno:

- Colocación y distribución aleatoria de la madera
- Como el proceso de carbonización es un proceso anaeróbico, un alto poder calorífico de los gases de pirólisis y de combustión son despedidos y mal conducidos en el horno.
- Debido a la pobre cubierta del horno y a una vigilancia irregular, los hornos tradicionales a menudo arden repentinamente, destruyendo parte de la carga de madera.

Comúnmente, la solución recomendada para estos problemas la da el horno Casamance que emplea:

- Un método lógico de colocación de la madera a través del cual las grandes piezas son colocadas en el centro del horno donde hay mayor calor ya que tarda más su carbonización.
- Una plataforma radial, una cámara de aire circunferencial y una chimenea de corriente ascendentes que promueve la circulación de los gases y propulsa un movimiento down-draft de aire/gas
- La colocación de madera fina y una adecuada cubierta de tierra o de vegetación para minimizar los colapsos del horno y los agujeros de aire. Además, la rápida velocidad de carbonización de los hornos Casamance hasta 4 veces superior favorece una supervisión más estrecha.

Todo lo anterior da como resultado una mejora en la eficiencia de conversión así como un carbón de mayor calidad, con mayor contenido de carbono fijo y un mayor poder calorífico. Es necesario un compromiso de las autoridades para formar a los carboneros en los nuevos métodos que ayude a superar sus costumbres tradicionales.

La chimenea puede provocar problemas debido a su costo por pequeño que sea y a su transporte. Otra restricción para la adopción de los hornos Casamance es la venta o eliminación de los subproductos de la carbonización, principalmente alquitranes y aceites pirolíticos. Son nocivos medioambientalmente. Estos condensados pueden tener salida como sustituto para la creosota, aunque esto se debe testar.

4.3.2.3. Aumento del tamaño del horno

El calor se escapará al aire por convección y conducción a través de la superficie superior y por conducción a través de la superficie circular inferior. Las pérdidas serán proporcionales al área de superficie del horno, que varían con el cuadrado del diámetro. La cantidad de madera es proporcional al volumen del horno que es función del cubo del diámetro. El ratio de pérdidas de calor indica una cierta economía de escala termodinámica.

4.3.3. Hornos industriales pirolíticos. Desarrollo de la industria de carbonización brasileña.

Brasil es el mayor consumidor y productor mundial, todavía una gran parte de sus hornos de carbón vegetales funcionan mediante métodos tradicionales con una muy baja recuperación de los derivados que tienen un impacto social y medioambiental muy negativo.

Horno industrial continuo	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Calidad homogénea y ajustable	Inversión considerable
Alto rendimiento	Alta sofisticación tecnológica
Automatización	Colocación de la madera aprovisionada
Alto rendimiento energético	Transporte de madera
Niveles de polución bajo	Cortado y preparación de la madera

Tabla 4.16. Estudios de de hornos de carbón vegetal industrial continuo

En 2004 fueron usadas 39,7 MTn de madera de las cuales sólo 10,09 fueron convertidas en carbón vegetal. Esto significa que la conversión fue de aproximadamente un 25% masa solamente. Esta madera proviene de bosques nativos, o en su mayoría de plantaciones de eucaliptos reforestadas.

Según [26] para desarrollar una economía global de la biomasa se requiere el desarrollo de centros de transformación inicial de biomasa cerca de los recursos de biomasa, centros de densificación, y grandes unidades centralizadas de conversión o biorefinerías que permitan la producción de electricidad, biocombustibles, fertilizantes, productos químicos a costes competitivos frente a los obtenidos por la economía del petróleo.

Una ventaja importante del carbón vegetal frente al carbón mineral es que no contiene plomo, azufre o mercurio y tiene un bajo contenido de cenizas. Esto hace que el carbón vegetal sea la mejor opción en el proceso de reducción de hierro. Esto es muy apreciado en Brasil, país que cuenta con una importante industria metalúrgica.

4.3.3.1. Tipos de hornos de carbonización brasileño

- **Calentador interno con combustión controlada de la materia prima**

Se inicia la operación introduciendo aire de manera controlada para quemar parte de la biomasa y calentar el horno. Hasta un 20% de madera es sacrificada para generar

energía para mantener el proceso. Alrededor del 60% de la madera es convertida a gases y vapores. Ejemplos: hornos de parvas, hornos de ladrillos, hornos metálicos,...

- **Calentador externo con combustión de madera, gasóleo o gas natural**

Tienen una cámara de combustión externa donde quemar algún tipo de combustible. Los gases calientes de combustión son usados para la producción de carbón. Permiten un mejor control del proceso y el carbón obtenido es de mayor calidad. Es caro. Se usa mayoritariamente en grandes plantas de hierro y acero.

- **Calentador con recirculación de gases (retorta o convertidor de gases).**

Son continuos y usan una fuente subcontratada de calor. En estos la recuperación de los gases es posible. El carbón producido es de mejor calidad, se obtienen grandes rendimientos pero con altos costes en instalaciones.

4.3.3.2. Uso de las unidades de carbonización como parte de la conversión primaria

Alternativa 1: Producción de carbón y combustión de los vapores de pirolisis in situ

La combustión de gases y vapores de pirolisis puede ser llevada a cabo con la recuperación de calor para producir vapor para generar electricidad en turbinas de vapor.

El acoplamiento de reactores de pirólisis con quemadores permite el uso de biomasa en quemadores diseñados para trabajar con gas natural u otros combustibles líquidos sin importantes modificaciones en la cámara de combustión. Podría ser usado en tamaños pequeños y medianos.

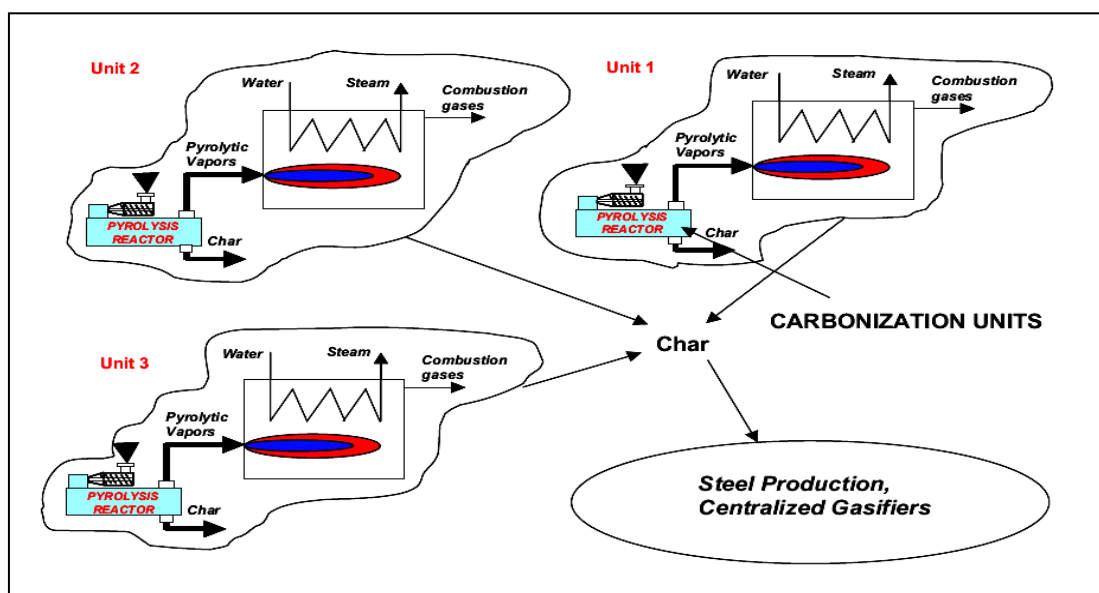


Figura 4.18. Integración de la producción de carbón vegetal con unidades de gasificación

Alternativa 2: Producción de carbón y bio-combustibles. Uso de los bio-combustibles como combustible en ciclos avanzados.

Se trata de condensar los vapores pirolíticos para ser usados en ciclos avanzados como por ejemplo los ciclos combinados de gasificación integrada, así como en turbinas de gas o en motores diesel con grandes obstáculos. Los bio-combustibles pueden ser gasificados en gasificadores a alta presión.

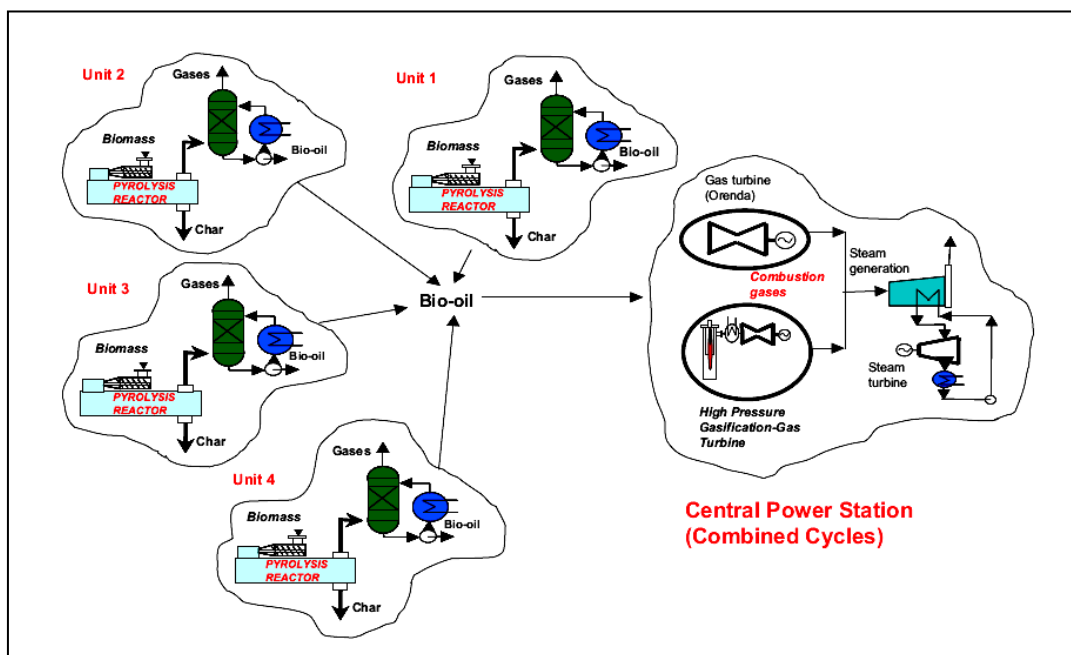


Figura 4.19. Integración de la producción de carbón vegetal con la generación de energía eléctrica en ciclos combinados

4.3.3.3. Uso de los reactores de pirolisis como parte de las biorefinerías

Una bio-refinería es un sistema que integra varios procesos de conversión de biomasa con la estructura necesaria para producir combustibles, productos químicos y energía de la biomasa. Este concepto es similar a una moderna refinería de petróleo, pero modificado para aceptar una amplia variedad de tipos de biomasa. Aunque esta idea no es nueva, el reconocimiento de su potencial estratégico y económico si que es reciente.

Alternativa 1: Separación de bio-oil en bio-refinerías para obtener sus fracciones

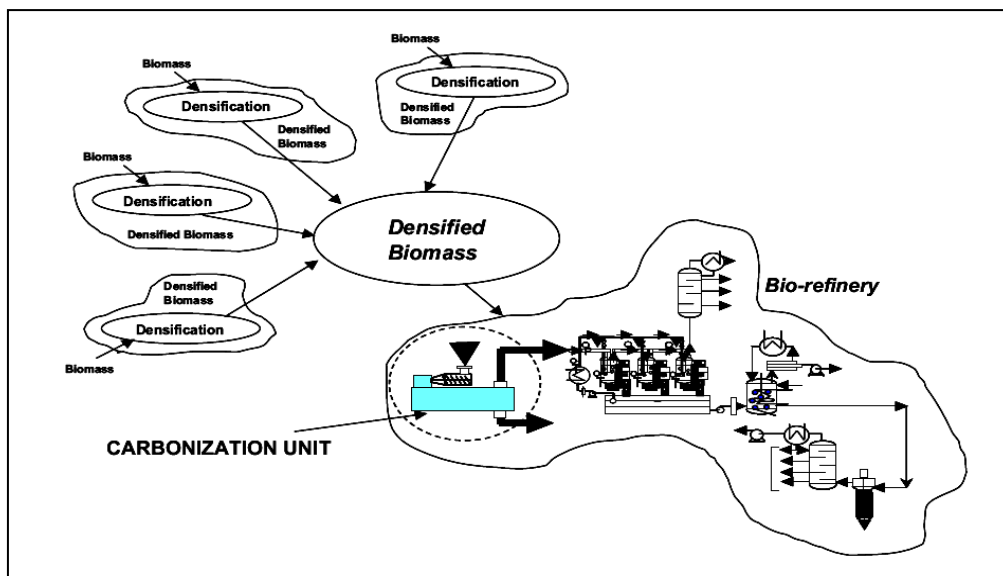


Figura 4.20. Integración de unidades de densificación con una bio-refinería centralizada

Productos de mejor calidad, con mejor aprovechamiento y reproducibilidad pueden ser obtenidos si los bio-combustibles son refinados y separados en fracciones. Existen diferentes estrategias para la separación de los bio-combustible. Se basan en la extracción de disolventes o en la destilación para llevar a cabo la separación deseada. Los existentes métodos de separación por disolventes se basan en las diferencias de polaridad y acidez como motor de la separación. En la figura 4.21. se muestra una de las posibles alternativas.

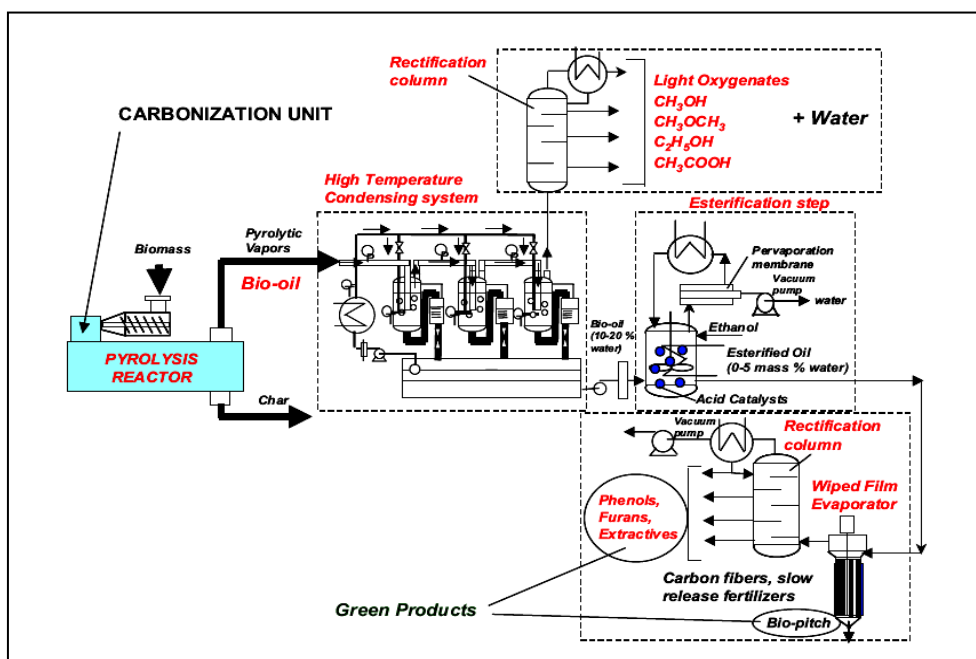


Figura 4.21. Concepto experimental para una refinería basada en bio-oil

La tecnología presentada en la figura 4.21 propone la pirolisis de la biomasa en una refinería central y la separación de los vapores de pirolisis para obtener metanol, etanol, ácido acético, acetona, fenoles, furanos. Esta opción parte de la hipótesis que la máxima cantidad de productos destilados será obtenido si:

1. Los compuestos oligoméricos y los carbones vegetales presentes en los vapores de pirolisis son apartados antes de condensar los bio-combustibles. El contenido de carbón en los bio-combustibles en este punto son determinados por la eficiencia de los ciclones, que eliminan partículas a partir de 410 μm .
2. Los sistemas de condensación de bio-combustibles son diseñados para reducir la polimerización de los bio-combustibles y así reducir el contenido de oligoméricos en los bio combustibles condensados. Esto puede ser alcanzado usando condensadores con líquidos auxiliares inmiscibles o parcialmente miscibles.
3. Los bio-combustibles son inmediatamente estabilizados después de ser condensados. Esta estabilización es llevada a cabo a través de un proceso de esterificación con etanol o metanol. El añadido de alcohol mejora la homogeneidad y un almacenamiento más estable del líquido y disminuye su viscosidad.
4. El agua presente en bio-combustibles limita el equilibrio de esterificación por lo que debe ser retirado de los combustibles si se desea que el proceso de esterificación alcance altos niveles de conversión.
5. La destilación de combustibles es llevada a cabo lo más rápido posible para reducir el impacto de las reacciones de policondensación que provocan la formación de bio alquitranes.

Alternativa 2: Producción de carbón e hidrógeno

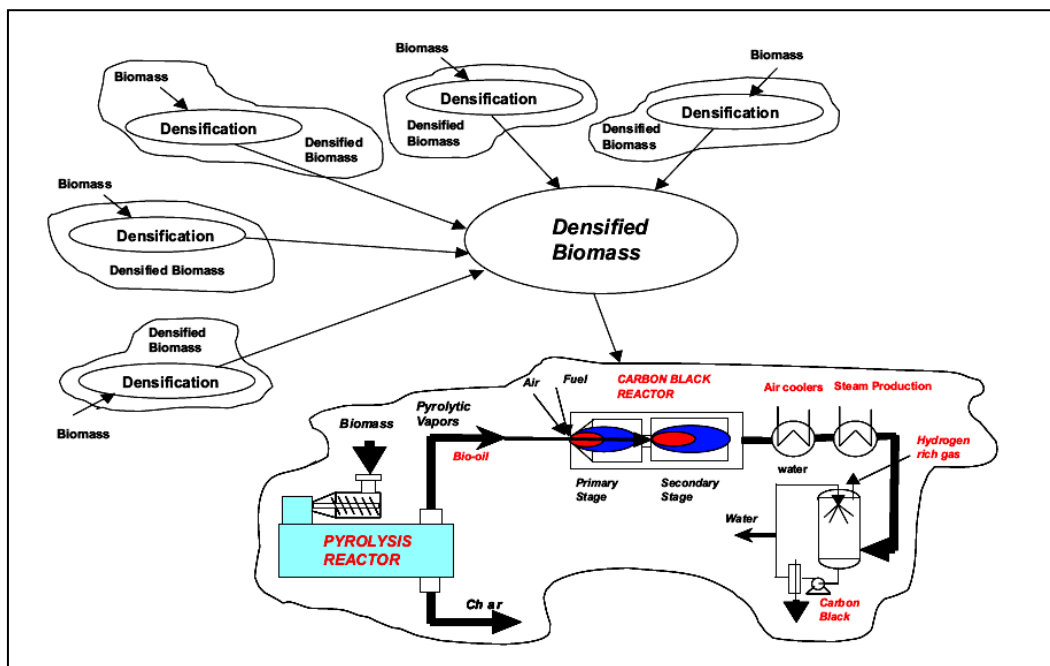


Figura 4.22. Producción de carbón vegetal, negro de carbón e hidrógeno

En esta opción, la pirolisis de la biomasa es seguida por una alta temperatura (hasta 1200°C) de policondensación de los vapores de pirolisis en una atmósfera reductora para producir hollín y gases ricos en CO₂, CO, metano e hidrógeno. Negro de carbón es el nombre genérico de la forma elemental del carbón producido en la fase vapor de la pirolisis por combustión de hidrocarburos en una atmósfera limitada de aire. Uno de los problemas que se plantean en la producción de negro de carbón que es excesivamente contaminante, es debido a que se usa carbón mineral como materia prima.

Alternativa 3: Producción de carbón vegetal y/o gases de síntesis por medio de la gasificación de biomasa.

La producción de gases de síntesis procedente de biomasa debe ser considerada como una manera de diversificar la industria brasileña de biomasa de eucalipto. La producción de combustibles de transporte es una alternativa al uso de carbón en la industria del hierro y acero.

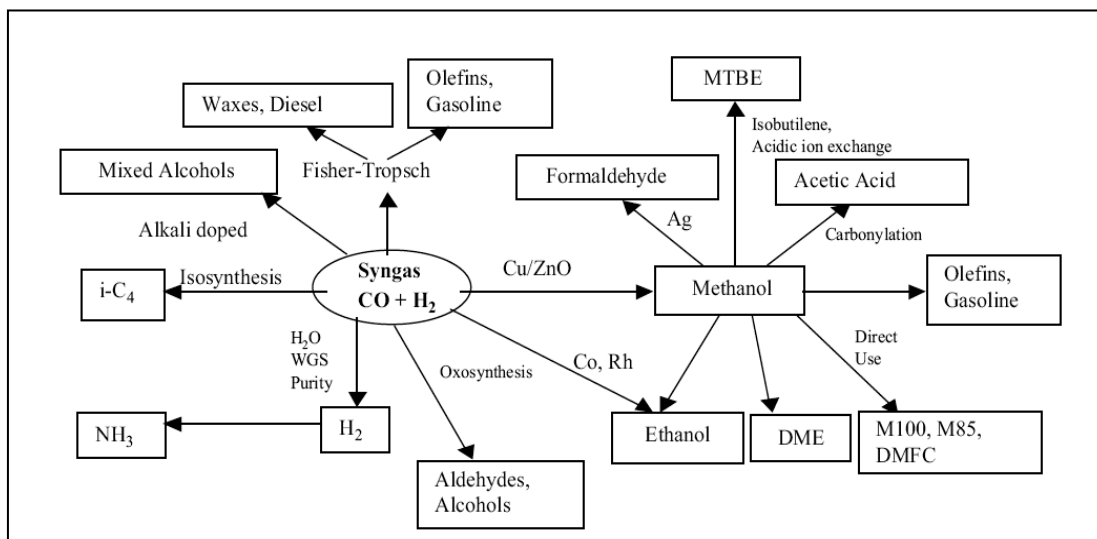


Figura 4.23. Productos obtenidos de la conversión del syngas.

Syngas es el nombre otorgado a los gases generados en el proceso de gasificación de carbón mineral, biomasa, gas natural,... Está compuesto principalmente por CO e Hidrógeno. Los combustibles de transporte pueden ser obtenidos de syngas usando la síntesis de Fischer-Tropsch.

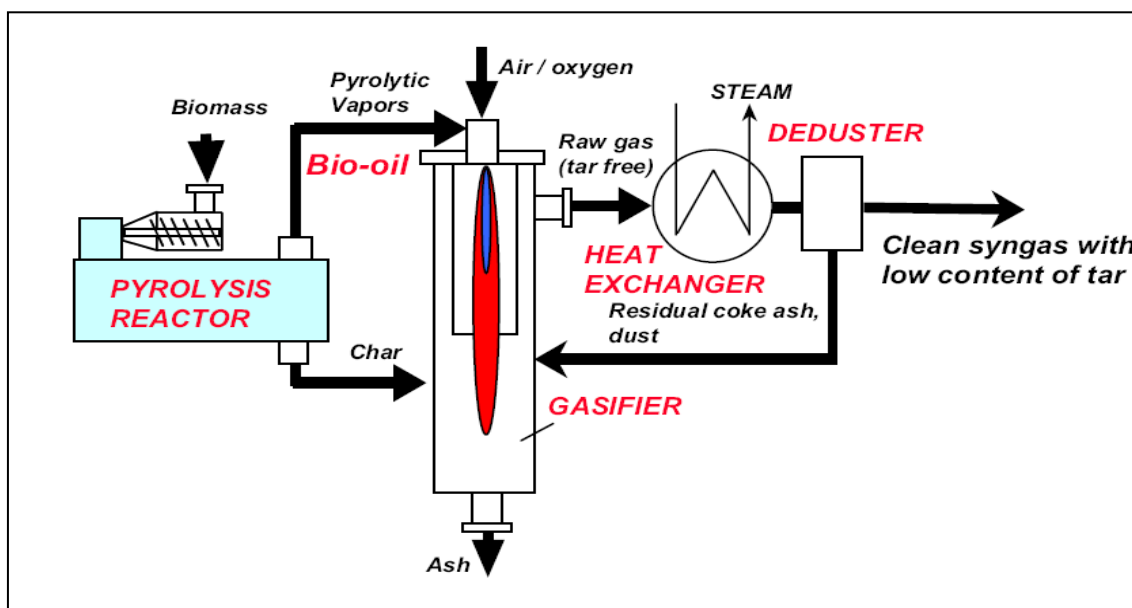


Figura 4.24. Proceso de Choren

El desarrollo de gasificadores de dos etapas parece haber resuelto el problema de la producción de gases de síntesis con altos contenidos de alquitranes. Los procesos propuestos por la empresa alemana Choren y por la Universidad Técnica de Dinamarca son ejemplos de este tipo.

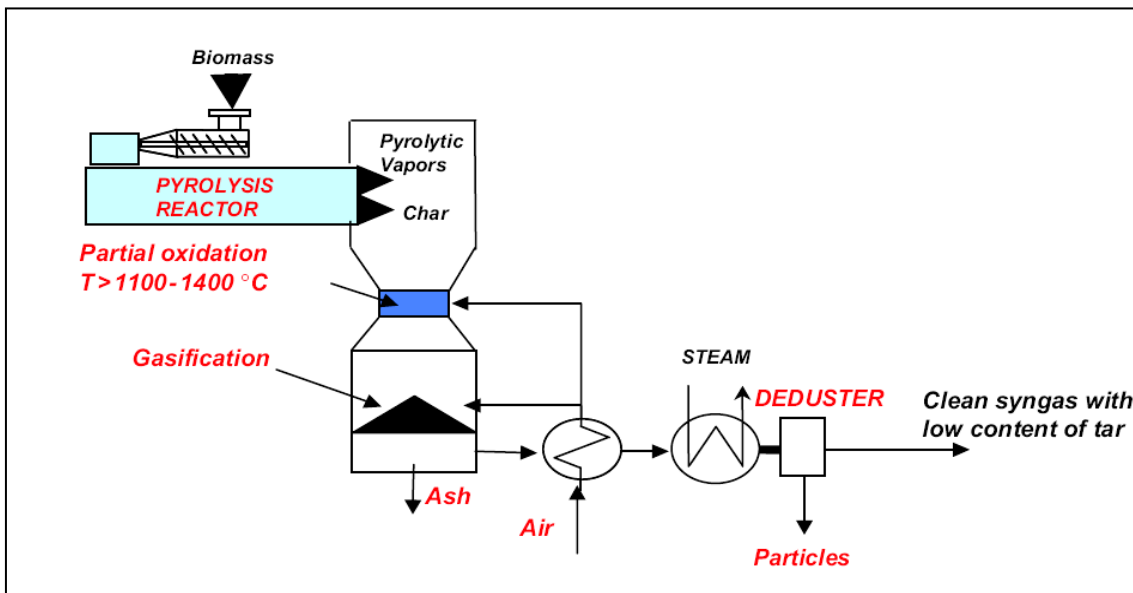


Figura 4.25. Proceso de la Universidad Técnica de Dinamarca

4.3.4. Recomendaciones para un estudio práctico en una comunidad rural.

Los impactos sociales y medioambientales de la producción de carbón vegetal y su consumo son extensivos y están entrelazados. Para cada país o región, hay que obtener las respuestas a las siguientes cuestiones:

- ¿Dónde se encuentran los recursos de biomasa?. ¿Su crecimiento es sostenible?.
- ¿El carbón es producido por campesinos pobres fuera de temporada o por grupos grandes y bien organizados?
- ¿El uso de cultivos con fines energéticos forzaría a elegir a los campesinos entre la producción de combustible o de comida?
- ¿Hasta dónde llega el transporte del carbón vegetal y cuáles son las aportaciones de energía y de dinero? ¿Quién consume el carbón vegetal? ¿ la producción de carbón vegetal es escasa cerca de los núcleos urbanos?
- ¿Cuáles son los impactos medioambientales locales de la producción de carbón vegetal? ¿Hay conversión de especies autóctonas a especies de rápido crecimiento y plantaciones de monocultivo?
- ¿Cuál es el coste real del carbón vegetal? ¿Como puede el precio de mercado reflejar estos costes reales sin afectar a los consumidores?
- ¿Se debe estimular políticamente el uso del carbón, el cual es un producto indígena y estimular una industria doméstica, sabiendo que podría producirse de manera insostenible y llevar a la destrucción de recursos madereros? ¿ o por el contrario se debe animar sus substitución por combustibles petrolíferos, de los cuales se depende a escala global, pero que puede ser importado y cuyas fuentes de suministro son inseguras?

Estos datos son necesarios debido a que hay datos insuficientes en el consumo de carbón vegetal en la mayoría de los países en vías de desarrollo.

5. Modelización

La siguiente modelización se ha introducido en MatLab ®, se puede considerar en la actualidad uno de los lenguajes de programación más completos. Dispone de un entorno informático fácil de usar donde los problemas y soluciones son expresados en notación matemática y de una aplicación multidisciplinar.

El código está organizado siguiendo la misma estructura que este capítulo. Se crean dos matrices, A y B. A incluirá todos los datos organizados por filas para cada combinación de Temperatura final y grado de humedad. B incluye los nombres de los parámetros de salida que serán las cabeceras de las columnas de la tabla Excel. El programa se va a ejecutar para rango de temperatura final de 400 a 500°C y para humedad de 0 a 25 %. Además de la masa y el factor de recirculación introducidos en el comando.

El primer gran bloque consta de todas las constantes con que se alimenta el modelo. Después está el bucle que se crea para llegar a un punto de convergencia entre las pérdidas del horno y su tamaño. Se detalla en consumo de biomasa necesario, el consumo de volátiles, los rendimientos de los subproductos, las dimensiones del horno, el cálculo de pérdidas, estequiometría, ...

En el siguiente bloque se muestra el código que crea las gráficas comparativas de energía necesaria del proceso para el caso basado en resultados experimentales y los modelos matemáticos.

A continuación sigue la programación del estudio económico.

Para finalizar se obtienen los datos de salida. Además a continuación fuera de la función principal se encuentra funciones auxiliares no menos importantes utilizadas en el código principal.

5.1. Parámetros de entrada

5.1.1. Humedad.

5.1.1.1. Conceptos generales

La humedad se estudia para el intervalo de 0 a 30 % de humedad. En un árbol recién cortado, su madera contiene una importante cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie forestal de que

se trate. Las maderas livianas por ser más porosas, contienen una mayor cantidad de agua que las pesadas.

De igual manera, la albura, por estar conformada por células cuya función principal es la conducción de agua, presenta un mayor contenido de humedad que el duramen. Esto indica que el porcentaje de agua contenido en los espacios huecos y en las paredes celulares de la madera es muy variable en el árbol vivo. El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas, tal como se describe a continuación:

A. Agua libre

Es la que da a la madera su condición de “verde” y es la que ocupa las cavidades celulares. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros.

Al comenzar el proceso de secado, el agua libre se va perdiendo por evaporación. Este proceso se produce fácilmente, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el momento en que ya no contiene más agua de este tipo. Al llegar a este punto, la madera estará en lo que se denomina “punto de saturación de las fibras”, que corresponde a un contenido de humedad variable entre el 21 y 32%. Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes celulares están completamente saturadas de agua y sus cavidades vacías.

Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Por tal razón, el punto de saturación de las fibras es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico.

B. Agua de saturación

Es el agua que se encuentra en las paredes celulares. Durante el secado de la madera, cuando ésta ha perdido su agua libre por evaporación y continúa secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera. Para la mayoría de las especies, el equilibrio higroscópico se encuentra entre el 12 y 18% de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado. Es por ello que la madera secada al aire libre solo puede alcanzar estos valores de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, debe acudir al secado artificial para eliminar el resto del agua de saturación.

C. Agua de constitución

Es el agua que forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implicaría la destrucción parcial de la madera.

5.1.1.2. Determinación del contenido de humedad en la madera

La determinación del contenido de humedad en la madera se hace considerando sólo los valores del agua libre y de saturación. En la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando al secarla en estufa alcanza un peso constante. El contenido de humedad se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado en función del peso de esa pieza en condición seca o anhidra. Su valor numérico se expresa en porcentaje y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad }_s = ((P_h - P_s) / P_s) \times 100 \%$$

% Humedad _s = % humedad en base seca.

P_h = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial.

P_s = Peso de la madera en estado anhidro, peso final o constante.

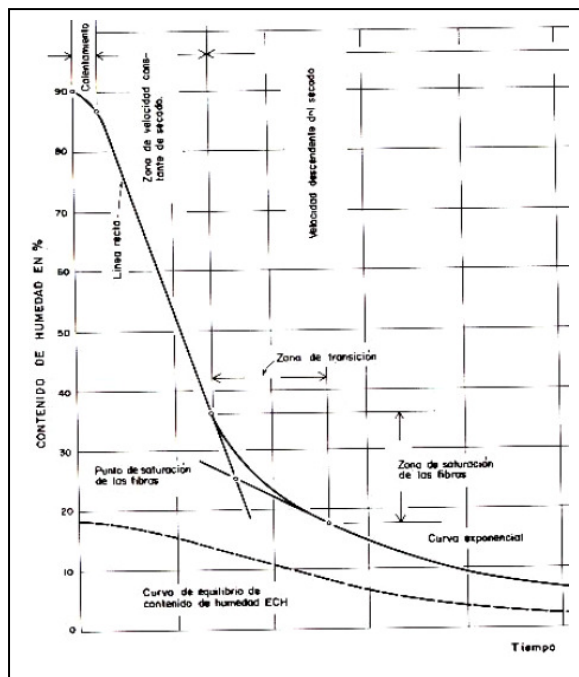


Figura 5.1. Curva teórica de secado

5.1.1.3. Bases físicas del secado de la madera

Temperatura

La velocidad de evaporación depende de la energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del aire en circulación para absorber la humedad liberada por la madera. La temperatura es un factor de aceleración del proceso de evaporación ya que, cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente, más intensa será la evaporación debido a que el aire podrá absorber mayor humedad.

Hacia el interior de la tabla de madera, la temperatura condiciona también la velocidad del movimiento del agua, aumentando el coeficiente de circulación con un incremento de la temperatura. Así, a 80 ° C la velocidad del movimiento del agua al interior de la madera es aproximadamente cinco veces mayor que a 20° C. En el secado artificial convencional, el calor se transmite a la madera por convección. El efecto que

podría producir una diferencia significativa entre la temperatura del aire en circulación y la de la superficie de la madera, prácticamente se anula durante el secado en cámaras, al no existir la radiación directa.

En el secado al aire, cuando la madera está expuesta a la radiación directa del sol, la temperatura superficial de las piezas de madera puede llegar a ser muy superior a la temperatura del aire en circulación. Esta situación generalmente propicia condiciones de secado muy severas, que se manifiestan en defectos en la madera como torceduras, grietas, rajaduras en los extremos, etc.

El control de la temperatura constituye, para muchas especies, el factor de mayor peso durante el desarrollo del proceso de secado. Así por ejemplo, para maderas livianas, la temperatura máxima admisible alcanza los 70 a 90° C para una calidad de secado excelente. Para maderas semipesadas a pesadas, el rango de temperatura máxima es de 60 a 80° C. Para madera verde y recién aserrada, con un contenido de humedad mayor que 30%, debe secarse a temperaturas más bajas para evitar defectos como colapso de células, grietas internas, rajaduras, endurecimiento superficial, etc.

Velocidad del aire

La circulación de aire fresco a través de una pila de madera y la expulsión de la humedad son condiciones necesarias para asegurar la remoción del exceso de humedad dentro de un secadero y así mantener las condiciones de humedad relativa deseadas. La velocidad del aire dentro de una pila tiene como funciones principales, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y transportar la humedad saliente de la madera.

La capa límite que siempre existe entre la madera y el aire juega un papel importante en el secado de la madera. Cuanto menor sea el espesor de esta capa límite, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad del secado. Una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una corriente laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite entre la madera y el aire.

La velocidad del aire desempeña un papel muy importante durante las primeras etapas del secado, sea natural o artificial, sobre todo cuando la madera está muy húmeda (grado de humedad >30%).

Contenido de humedad de equilibrio

La madera es un material higroscópico que reacciona siguiendo las leyes que rigen para los cuerpos porosos. Cuando una pieza de madera se deja suficiente tiempo en un ambiente cuyas características de temperatura y humedad relativa permanecen

constantes, se establece un equilibrio entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la que existe en el interior de la pieza de madera. Cuando este equilibrio es alcanzado, la humedad de la madera no varía más y se dice que ha llegado al contenido de humedad límite. Este contenido de humedad permanecerá constante mientras las características del aire que rodean a la madera no cambien. Es importante anotar que este equilibrio no se alcanza instantáneamente y el tiempo empleado depende de varios factores, tales como la densidad de la madera, el espesor, la cantidad y calidad de sustancias extractivas presentes, la humedad inicial, etc.

Gradiente de humedad de la madera

Tan pronto se inicia el secado, sea natural o artificial, la distribución del contenido de humedad en el interior de la pieza se modifica. En forma simple, puede explicarse el secado de la madera como el resultado del movimiento de la humedad desde el interior hasta la superficie, donde se evapora y escapa a la atmósfera circundante.

Al colocar una pieza de madera húmeda en contacto con un ambiente seco, las diferencias entre las presiones parciales de vapor de la atmósfera y del agua contenida en la madera da lugar a la evaporación del agua presente en las capas superficiales, mientras que las capas internas permanecen aún húmedas. La diferencia que se establece entre el contenido de humedad de la madera en el centro y en la superficie, denominada gradiente de humedad, da origen a la circulación interna del agua del centro de la periferia y es la causa del secado.

Mientras más elevado sea el gradiente de humedad, es decir, mientras mayor sea la diferencia entre el contenido de humedad en el centro y en la superficie, más rápido secará la madera.

5.1.2. Masa de biomasa (se excluye la masa quemada para proporcionar calor al proceso).

Los hornos de parvas son sistemas de carbonización con combustión parcial de la carga para aportar la energía necesaria para el secado y carbonización de la madera. Esta carga se obtendrá de los requerimientos caloríficos de cada situación.

El problema de obtener y mantener, durante todo el período de quema, un sellado efectivo contra el aire, y una buena circulación, son los principales factores que limitan las dimensiones de los sistemas de fosa y parvas. Es difícil ubicar las infiltraciones sobre la cobertura y es difícil de repararlas en las fosas con parvas muy grandes. Se trata de ver como afecta el tamaño en la optimización de los hornos, aunque generalmente los hornos suelen tener un volumen de apilado entre 5 y 8 m³. Un horno familiar para 5 personas ronda los 10 m³ de madera que se traduce en 6 Tm.

Por el contrario encontramos hornos más grandes, por ejemplo el volumen de la parva sueca varía de 100 a 250 m³ de madera (60 a 150 Tm). El uso de hornos de tierra para operaciones comerciales en gran escala, en la producción de carbón vegetal metalúrgico, ya no se la considera factible por los siguientes motivos: el horno tiene que ser completamente reconstruido al final de cada ciclo; el ciclo de producción de 24 días es demasiado largo; el funcionamiento de la carbonera, si bien fundamentalmente sencillo, requiere considerable capacidad, experiencia y aún un cierto grado de arte. Considerando lo anterior el intervalo de estudio se va a situar entre 5 y 50 Tm.

5.1.3. Mejora del proceso. Recirculación de los gases (f).

La recirculación se va a alimentar a través de un factor f (en tanto por uno). Además se calcula el porcentaje de volátiles necesarios (combustión) para la aportación de calor al proceso (xv). El factor f si es muy pequeño se comporta como un limitante a la quema de volátiles (es decir no se recirculan la suficiente cantidad de volátiles). En la mayoría de los casos los resultados iniciales muestran que quemando una pequeña parte de los volátiles se consigue este calor, por lo tanto se puede considerar un f máximo entre 0,1 y 0,2.

Horno tradicional ($f = 0$)

- COLOCACIÓN VERTICAL DE LOS TRONCOS

Requiere un conocimiento y experiencia importante y una supervisión constante. La duración de la carbonización está alrededor de 50 h para los hornos pequeños (10 m³). El enfriamiento puede durar varios días. El flujo de calor es vertical y descendiente.

- COLOCACIÓN HORIZONTAL DE LOS TRONCOS

En el caso de grandes hornos, el área ya carbonizada se puede retirar antes de que el proceso se encuentre acabado. El volumen de estos hornos puede alcanzar 100 m³ y el ciclo completo de carbonización puede durar más de 3 semanas. El flujo de calor es horizontal y centrífugo.

Horno Casamance ($f > 0$)

Requiere un sistema de circulación que abarque todo el horno. Esto se concreta en la colocación de un enrejado radial de troncos de madera en el suelo y la ubicación de orificios en la base del horno. También se precisa la colocación de los troncos más grandes en el centro y de los pequeños en la periferia.

El principal desarrollo es la construcción de una chimenea con barriles viejos que aceleran y facilitan la operación. La eficiencia aumenta gracias al aumento de la

corriente descendente de aire/gas. Según [20] un horno de 100 m³ necesita 3 días para la carbonización y 4 días para el enfriamiento.

Según [16], El ciclo total de la parva sueca (entre 100 y 250 m³) toma 24 días; cuatro días para la carga, seis días para la carbonización, diez días para el enfriamiento y cuatro días para la descarga. Estos datos divergen, pese a que no es lo mismo una parva sueca que un horno Casamance. Se va a tomar el primer dato como válido para hornos Casamance de gran tamaño.

Las experiencias llevadas a cabo con este sistema modificado, han dado buenos resultados en Senegal. La chimenea mejora la circulación del gas, reduciendo la cantidad de tizones y acelera la carbonización. Menos tizones significan mejores rendimientos de carbón vegetal.

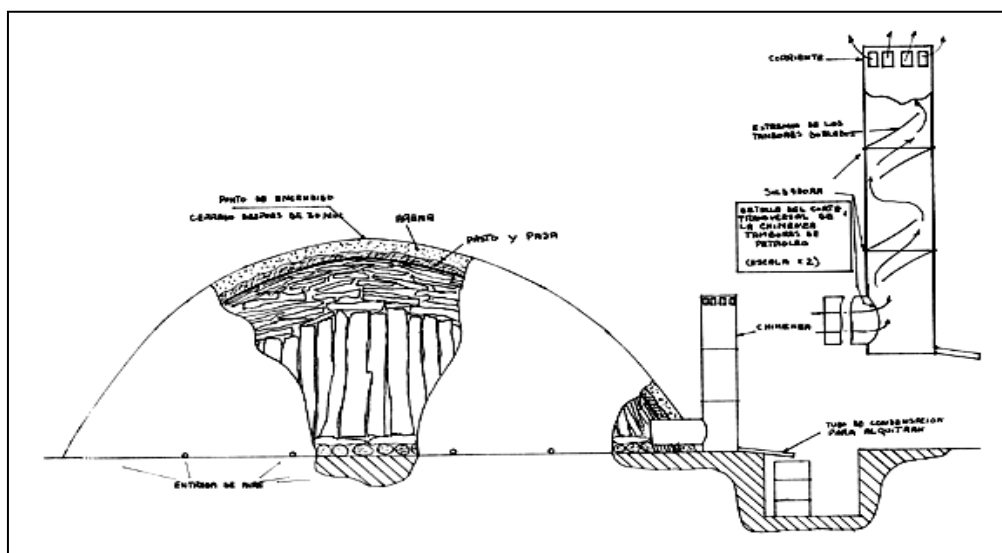


Figura 5.2. Horno Casamance

5.1.4. Tiempo de carbonización (d)

Se relaciona con el punto anterior, dependiendo del tipo de horno, su tamaño y su circulación de gases el proceso adquiere una velocidad determinada. El ciclo total se compone del tiempo de secado, del tiempo de carbonización y del tiempo de enfriamiento. En los cálculos se ha interpolado este tiempo de manera proporcional a la masa de madera del horno, con las referencias experimentales. Así mismo se ha corregido la duración con el grado de humedad, aumentando en cada 5 % de aumento de humedad un 3 % en la duración del ciclo de carbonización.

Para un horno tradicional de 10 m³ el tiempo de carbonización es 60 h (2 días) y para 100 m³ se ha estimado 300h (2 semanas) . Para uno Casamance los 10 m³ se encuentran en 45 h y los 100 m³ en 80 h (3 días). Además se ha ponderado con el grado de recirculación de gases f para caracterizar los dos casos.

$$d_{\text{Tradicional}} = (0,240 * M) + 1800 / 54 \quad \text{h}$$

$$d_{\text{Casamance}} = (0,035 * M + 2220) / 54 \quad \text{h}$$

$$d = d_{\text{Tradicional}} - ((f / f_{\text{máximo}}) * (d_{\text{Tradicional}} - d_{\text{Casamance}}))$$

Tiempo de carbonización	6 Tm biomasa (10 m3)	60 Tm biomasa (100 m3)
Horno Tradicional	60 h	300 h
Horno Casamance	45 h	80 h

5.1.5. Temperatura de carbonización máxima (pico o final)

Tanto el rendimiento de carbón como su calidad están fuertemente influenciados por el pico de temperatura del proceso de pirólisis. Por supuesto el tiempo de residencia también afecta al rendimiento y a la calidad del carbón, pero normalmente este tiempo es seleccionado después de determinar el pico de temperatura. Así el tiempo de residencia pasa a ser una variable dependiente cuyo valor es seleccionado después del tamaño de la carga y de la temperatura pico.

En este caso nos vamos a centrar en el rango de la carbonización de 400 °C a 500 °C sin ampliar el estudio al intervalo completo para todo tipo de pirólisis que alcanzaría los 1000 °C.

PIRÓLISIS	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	PRESIÓN (BAR)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	PRODUCTO MAYORITARIO
<i>Carbonización</i>	Horas – días	Muy baja	1	400	Sólido
<i>Convencional</i>	5 / 30 minutos	Baja	1	600	Gas líq. y sólido
<i>Fast</i>	0,5 / 5 segundos	Muy alta	1	650	Líquido
<i>Flash-líquido</i>	< 1 segundo	Alta	1	< 650	Líquido
<i>Flash-gas</i>	< 1 segundo	Alta	1	> 650	Gas
<i>Ultra</i>	< 0,5 segundos	Muy alta	1	1000	Gas P.químico
<i>Vacío</i>	2 / 30 segundos	Media	< 0,1	400	Líquido

Tabla 5.1. Tipos de pirólisis y sus características.

Bajas temperaturas de carbonización dan un mayor rendimiento en carbón vegetal, pero que es de baja calidad, que es corrosivo, por contener alquitranes ácidos, y que no quema con una llama limpia sin humo.

Una temperatura de 450 - 500°C ofrece un equilibrio óptimo entre friabilidad y el deseo de un elevado contenido de carbono fijo. Una temperatura de 500°C da un contenido típico de carbono fijo de alrededor del 85% y un contenido de materia volátil de cerca del 10%. A esta temperatura, el rendimiento del carbón es de aproximadamente el 33% del peso de la madera secada al horno carbonizada, sin contar la madera que ha sido quemada para carbonizar la remanente.

5.1.6. Tipos de biomasa utilizada

Además de la madera, se emplean a veces para producir carbón vegetal otros materiales leñosos, como cáscaras de nueces y cortezas. Muchos residuos agrícolas pueden también producir carbón vegetal, pero el carbón que resulta es un polvo fino que debe ser aglomerado en briquetas, a un costo adicional, para la mayoría de los usos del carbón.

Se plantea la necesidad de estimular un uso más amplia de los residuos de las cosechas para la producción de carbón vegetal o para combustible, ya que no es generalmente una práctica agrícola, si bien se ha realizado, como parte de una política agrícola racional, la quema de bagazo de caña de azúcar para proporcionar calor en la producción de azúcar, así como la quema en algunas regiones de los tallos de maíz y de pastos bastos para combustible casero, para suplir un beneficio general. La madera sigue siendo la materia prima preferida y más empleada, desde el punto de vista de la disponibilidad y de las propiedades del carbón vegetal final.

Las tres biomásas utilizadas en la modelización coinciden con los siguientes estudios que están extraídos del artículo [21]. Se han obtenido a través de una calorimetría diferencial de barrido (DSC) y termogravimetría diferencial (DTG). El comportamiento pirolítico de la biomasa bajo las condiciones de carbonización son estudiadas a través del comportamiento térmico de 3 muestras.

La pérdida de masa durante la pirolisis difiere bastante entre los diferentes tipos de biomasa. En la figura 5.3. se muestra como los porcentajes de subproductos de cada biomasa difieren, dándose un mayor porcentaje de carbón vegetal para el trigo y el algodón.

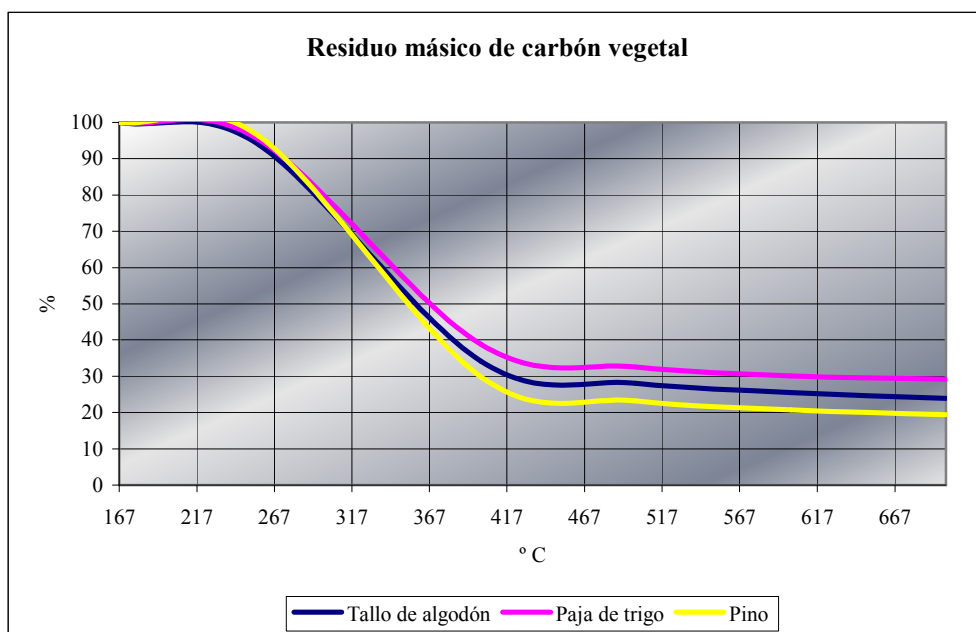


Figura 5.3. Residuo másico de carbón vegetal frente al aumento de temperatura para 3 tipos de biomasa

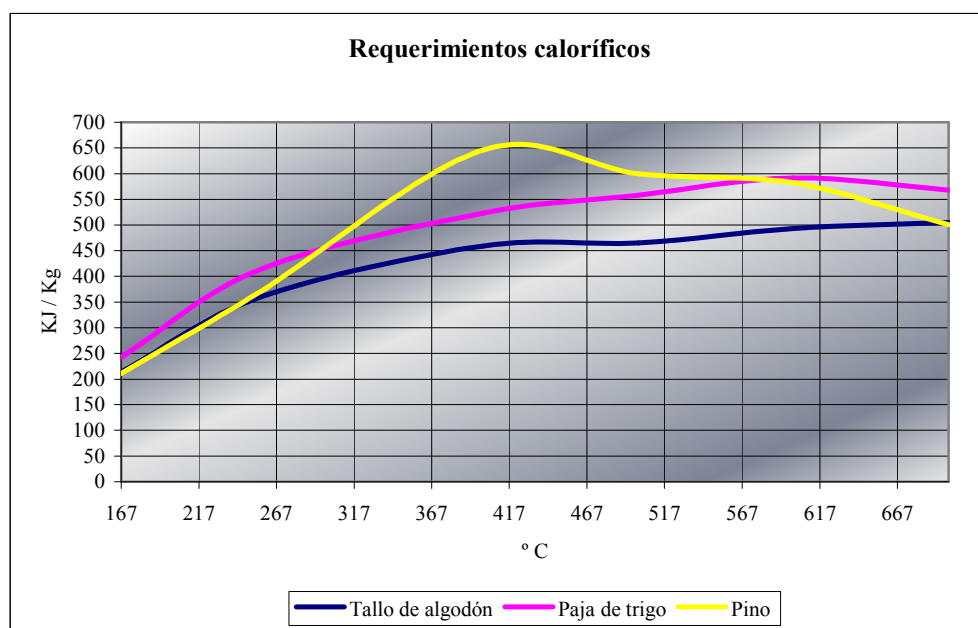


Figura 5.4. Relación del requerimiento calorífico y temperatura para 3 tipos de biomásas.

Como se puede apreciar en las figuras 5.3 y 5.4. las tendencias y las curvas de las diferentes curvas son similares con pequeñas variaciones en los valores de energía específica. Destaca el pico endotérmico de la madera de pino en la etapa de degradación de la biomasa y una tendencia muy clara en la etapa de agregación del carbón vegetal.

Los requerimientos caloríficos tienen una importante influencia en el curso de una conversión térmica. Los resultados muestran que para aumentar la temperatura de 1 Kg de 30 °C a 400 °C de paja de trigo, tallo de algodón y madera de pino hacen falta 523 KJ, 459 KJ y 646 KJ respectivamente.

5.1.6.1. Características y ventajas de cada tipo de biomasa

Pino

La producción de energía del pino es responsable. Si su silvicultura y su producción de madera son sostenibles produce poca o ninguna erosión en el terreno y pérdidas en la capa superficial. Esta especie puede crecer en terrenos no utilizables para la agricultura y así no elimina fuentes de alimento.



Figura 5.5. Fardos de paja de trigo

Paja de trigo

El trigo es una tipo de planta que se cosecha anualmente para obtener su grano para la obtención de alimento. El resto de la planta es paja consistente en tallos y hojas. Después de que el grano es cosechado la siguiente cosecha es preparada. La paja es un residuo celulósico que es quemado, retirado, destinado a alimentación animal o depositado en el campo. La elección hecha por el agricultor depende de varios factores incluyendo la cantidad de material, la siguiente cosecha, las condiciones climáticas, la erosión del suelo, la necesidad de nutrientes, la pendiente del terreno y los mercados que pudieran estar disponibles para el trigo.

Tallo de algodón

La utilización de residuos agrícolas, como por ejemplo el tallo de algodón, juegan un importante papel en mejorar la situación de países africanos como Sudán. Habitualmente, los tallos de algodón son desaprovechados, excepto para cantidades pequeñas usadas como combustible para tareas de cocina. Unas 800.000 Toneladas son quemadas en el campo como medida sanitaria para prevenir la propagación de enfermedades del algodón a la siguiente cosecha.

Carbonización, briquetas de tallos carbonizados, briquetas de tallos sin carbonizar y generación de energía usando los tallos son las diferentes opciones que se presentan. De entre estas, la más extendida en la etapa comercial ha sido las briquetas de tallos carbonizados. En este país las briquetas de carbón de tallos de algodón podrían replazar el 11 % de mercado de carbón proveniente de madera.

Durante dos experimentos en Sudán sobre el terreno gente local fue entrenada en la carbonización y formación de briquetas de tallos. Esto es especialmente importante debido a que se reduce la amenaza de enfermedades y los tallos carbonizados pueden ser mantenidos durante más tiempo. Las briquetas producidas fueron repartidas entre 200 familias y se hizo un estudio comparativo con el carbón vegetal de madera. La

Residuos	PC (MJ/Kg)
Piel de cítricos	4,5
Desperdicios de cocina	4,5
Corteza	13,2
Cáscara de arroz	15,6
Algas	17,7
Cartulina	18,0
Papel de embalar	19,1
Algodón	20,0
Papel de periódicos	20,5
Mazorca de maíz	21,1
Almidón	22,5
Cáscara de algodón	22,7
Aceite de cárter	27,2
Lubricantes utilizados	31,6
Neumáticos	39,5
Betún	43,7
Aceites vegetales	44,6
Parafina	46,5

gente prefirió las briquetas ya que se encienden más rápido, duran más tiempo y no producen humos ni olores. También producen una gruesa capa de cenizas que he visto como una ventaja en forma de capa aislante. [41]

En proyectos de energía doméstica en Malí aparece la compresión y carbonización de tallos de algodón como alternativa al carbón de leña, como solución parcial a la deforestación y a la emisión de gases contaminantes.

Tabla 5.2 Poder calorífico para varios residuos.

5.1.7. Datos y constantes de entrada.

Calor específico	Código	J / (Kg*K)
Agua	Ceh2o	4187
Biomasa - Pino	Cepino	1464
Biomasa - Paja de trigo	Cetrigo	1590
Biomasa- Tallo de algodón	Cealgodon	1355
Carbón vegetal - Pino	Cechar	1000
Carbón vegetal – Paja de trigo	Cechar	1081
Carbón vegetal – Tallo de algodón	Cechar	921
Tierra	Cetierra	1840
Aire	Ceaire	1012
Metano	CeCH4	3000
Dióxido de carbono	CeCO2	1000
Monóxido de Carbono	CeCO	1050

Densidad	Código	Kg / m³
Tierra	denstierra	2050
Biomasa - Pino	denspino	600
Biomasa – Paja de trigo	denstrigo	561
Biomasa – Tallo de algodón	densalgodon	200
Carbón vegetal	denschar	300
Aire	densaire	1,29
Humos	denshumos	1,34

Características del horno	Código	
Radio de la chimenea (Casamance)	Rchim	0,3 m
Altura de la chimenea (Casamance)	Lchim	2 m
Coefficiente descarga de la chimenea (Casamance)	Cdesc	0,65
Espesor de la cubierta	espesor	0,2 m
Factor de llenado	fllenado	0,85

Otros datos	Código	
Conductividad térmica tierra (λ tierra)	ktierra	0,52 W/(m*K)
Conductividad térmica biomasa (λ biomasa)	kbiom	0,12 W/(m*K)
Exceso de O ₂ en la combustión	Excesoaire	20 %
Temperatura ambiente	Ta	25 °C
Calor de vaporización del agua	L	
Volumen de madera	RendS	16,7 m ³ / ha
Capacidad bolsa carbón	Ccharbolsa	29 Kg

Poder Calorífico Superior	Código	MJ/Kg
Pino	PCb	18
Paja de trigo	PCb	12,5
Tallo de algodón	PCb	15,3

Poder Calorífico líquidos pirolisis	Código	MJ/Kg
Pino	PCliquido	24,9
Paja de trigo	PCliquido	23
Tallo de algodón	PCliquido	22,5

Poder Calorífico gases pirolisis	Código	MJ/Kg
Pino	PCgas	16,6
Paja de trigo	PCgas	16,5
Tallo de algodón	PCgas	7,4

Poder calorífico del carbón vegetal

Este dato varía con el porcentaje de carbono fijo en pequeña medida. Se ha digitalizado la siguiente gráfica.

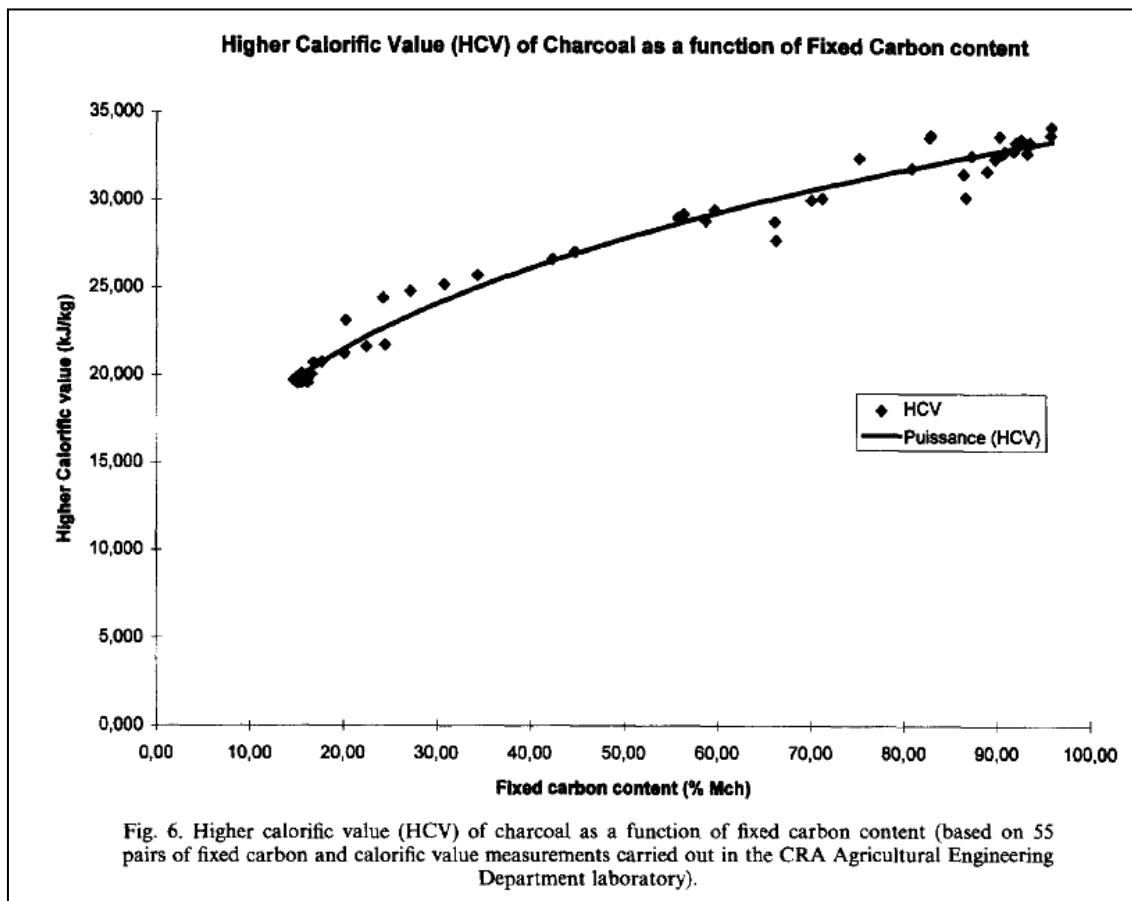


Figura 5.6. Poder Calorífico Superior como función del contenido de carbono fijo.

A su vez el porcentaje de carbono fijo varía con la temperatura de carbonización alcanzada de la siguiente manera:

Temperatura de carbonización (°C)	Análisis químico del carbón		Rendimiento de carbón sobre masa seca al horno (0% de humedad)
	% carbono fijo	% material volátil	
300	68	31	42
500	86	13	33
700	92	7	30

Tabla 5.3. Efecto de la temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal

A bajas temperaturas (300°C) es posible un rendimiento en carbón de casi el 50%, Con temperaturas de carbonización de 500-600 °C los volátiles son escasos y son típicos los rendimientos del 30% en la carbonera. Con temperaturas muy altas (alrededor de 1.000 °C) el contenido volátil es casi cero y el rendimiento cae a alrededor del 2%. ...

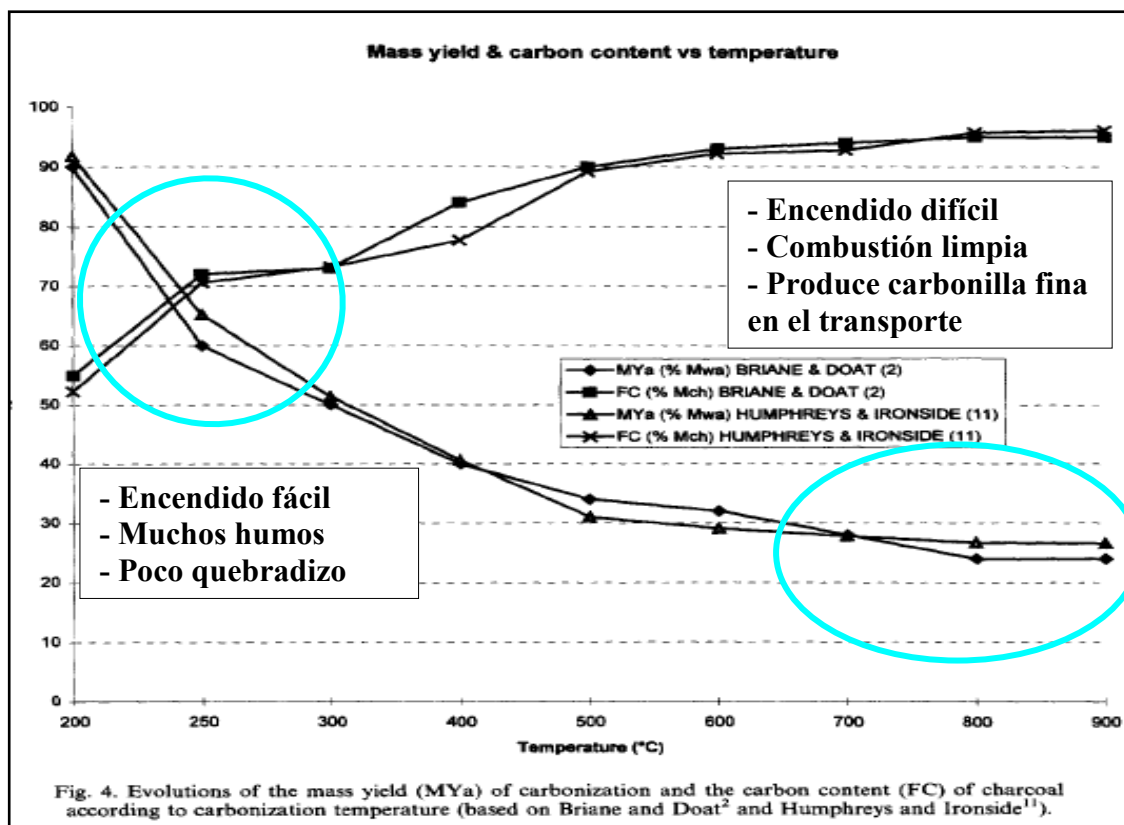


Figura 5.7. Evolución de los rendimientos máxicos de la carbonización y del contenido de carbón frente a la temperatura de carbonización.

El carbón vegetal con mucha materia volátil se enciende fácilmente pero al quemar produce humo. El carbón de pocos volátiles tiene dificultades al encenderse y su combustión es muy limpia. Un buen carbón vegetal comercial puede tener un contenido de sustancia volátil neta (libre de humedad) del 30% aproximadamente. El carbón con mucha sustancia volátil es menos quebradizo que el carbón común de fuerte combustión con poco volátil por lo que produce menos carbonilla fina durante el transporte y los manipuleos. Es también más higroscópico y tiene por lo tanto un mayor contenido de humedad natural.

El contenido de carbono fijo en el carbón vegetal varía desde un 50% hasta un 95%, en cuyo caso consiste principalmente en carbono. El contenido de carbono fijo es el componente más importante en metalurgia, puesto que el carbono fijo es el responsable de la reducción de los óxidos de hierro en el hierro fundido durante su producción. Pero el usuario industrial, para obtener una operación óptima de fundición, debe encontrar un balance entre el carácter quebradizo de un carbón vegetal con elevado contenido de carbono fijo y la mayor fuerza de un carbón vegetal con un contenido inferior en carbono fijo, y superior en materia volátil.

5.2. Energía necesaria para el proceso.

5.2.1. Cálculo de los requerimientos caloríficos del proceso de pirólisis de la biomasa.

5.2.1.1. Cálculos basados en los resultados experimentales obtenidos de [21]

El proceso de pirólisis se ha dividido en 2 etapas: una primera hasta 440 K (167 °C) donde se procede principalmente a la eliminación de la humedad y una segunda desde 440 K hasta la temperatura de carbonización donde se lleva a cabo la volatilización de la celulosa y el carbonizado de la lignina y la hemicelulosa.

5.2.1.1.1. Aportación de calor hasta 167 (°C). Proceso de secado.

$$\text{Biomasa seca } (M_s) = \text{Biomasa total (sin biomasa quemada)} (M) / (1 + \text{humedad})$$

La energía para aumentar la temperatura de la biomasa seca hasta 167 °C es la siguiente:

$$Q_{\text{biomasa}} = M_{\text{biomasa seca}} * C_{e \text{ biomasa}} * \Delta T \quad J$$

La energía para aumentar la temperatura de la humedad hasta 100 °C es:

$$Q_{\text{agua}} = (M - M_s) * C_{e \text{ agua}} * (100 \text{ K})$$

El calor de evaporación del agua es:

$$Q_{\text{evaporación humedad}} = L * (M - M_s)$$

$$Q_{\text{eliminación humedad}} = Q_{\text{agua}} + Q_{\text{evaporación humedad}}$$

$$Q_1 (\text{hasta } 167 \text{ °C}) = Q_{\text{biomasa}} + Q_{\text{eliminación humedad}}$$

5.2.1.1.2. Aportación de calor de 168 (°C) hasta la temperatura de carbonización. Proceso de volatilización y carbonizado.

Se ha digitalizado la gráfica obtenido de [21] de la potencia necesaria para llevar a cabo el proceso en función de la temperatura alcanzada de diferentes tipos de biomasa. Se ha obtenido con un equipo de barrido diferencial de calor (DSC) que tiene mayor precisión que los experimentos llevados a cabo con el analizador térmico diferencial (DTA).

Para este proyecto sólo se ha estudiado el intervalo superior a 440 K (167 °C) para evitar el efecto de diferentes humedades. Se estudian 4 tipos de biomasa pino, cáscara de cacahuete, tallo de algodón y paja de trigo. La integral de esta da la energía necesaria para llevar el proceso desde 168 ° C hasta la temperatura final, a través de la velocidad de calentamiento, que en este experimento fue de 10°C/minuto.

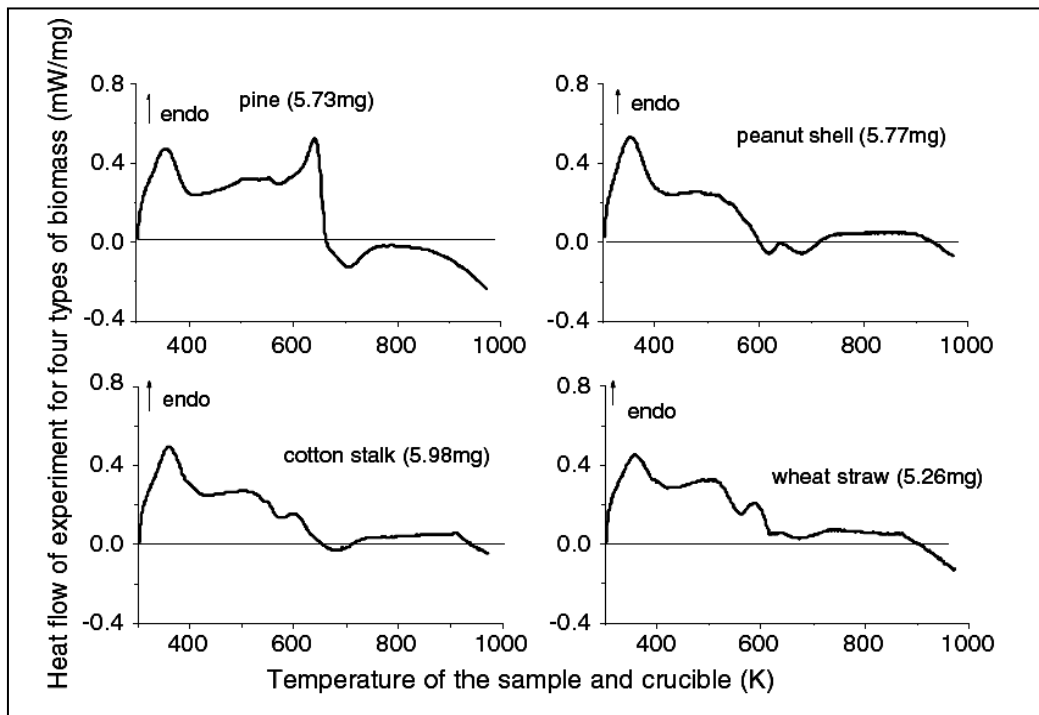


Figura 5.8. Resultados de calorimetría de barrido diferencial para la pirolisis de 4 tipos de biomásas (pino, cáscara de cacahuete, tallo de algodón y paja de trigo) usando Netsch STA449 C.

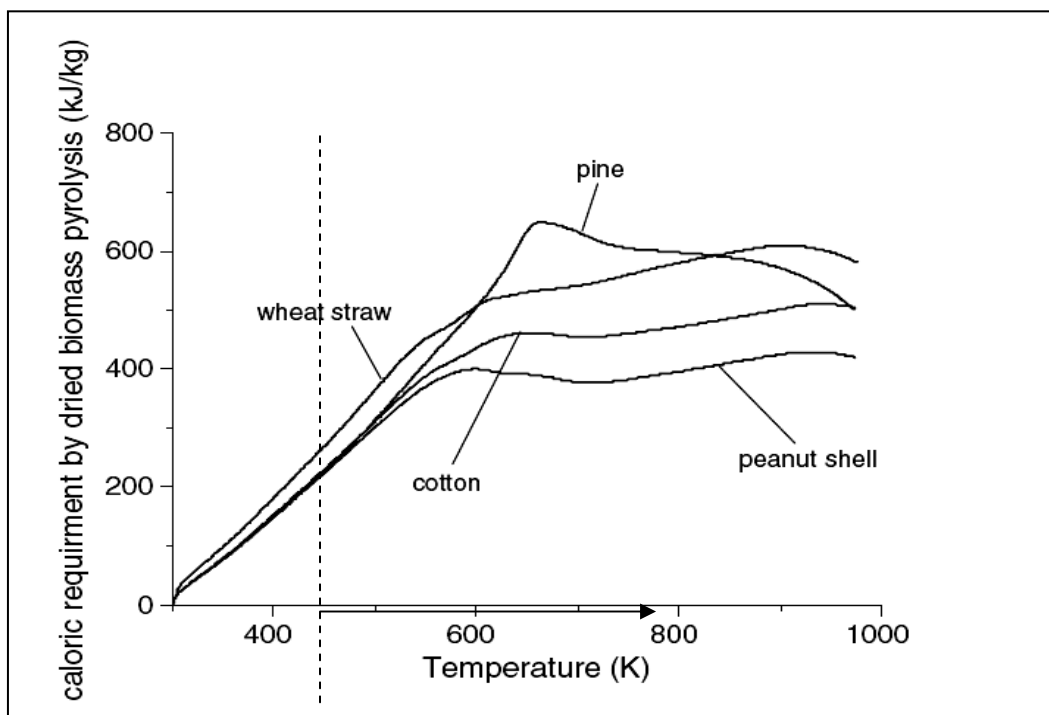


Figura 5.9. Relación entre el calor requerido y la temperatura para cuatro tipos de biomásas.

$$Q_2 \text{ (desde } 167^\circ \text{ hasta la temperatura final)} = \int (\text{Flujo de calor}) dT^a$$

Este concepto incluye dos componentes: el calor necesario para calentar la biomasa y el calor necesario para completar las reacciones de pirolisis.

$$\frac{Q}{m_{s,0}} = \int_0^t \frac{((m_s * C_{p,s} * (dT^a/dt)) + (m_s * H_p))}{m_{s,0}} dt$$

Esto es clave para el diseño del horno, la especificación de los parámetros de las operaciones, y el análisis del balance de energía.

$$Q_{TOTAL} = Q_1 + Q_2$$

Esta es la energía ideal para llevar a cabo la carbonización de la biomasa. A continuación se considerarán las pérdidas del horno y del proceso.

5.2.1.2. Comparación de resultados experimentales y modelos matemáticos.

El calor necesario en el proceso de pirolisis de una muestra de biomasa consta de la suma de 2 componentes: el calor necesario para calentar la biomasa y el calor necesario para llevar a cabo las reacciones de desvolatilización. Este dato es fundamental a la hora de diseñar el horno y realizar un balance de energía. Sin embargo, la precisión en los resultados es difícil de alcanzar por métodos de cálculo o por experimentos debido a la complejidad de los tipos de biomasa, la complejidad del proceso, la falta de valores exactos y la dificultad en determinar las pérdidas de calor del equipo.

En resumen, la precisión de los resultados no se alcanza motivo de 2 razones:

- Durante la pirolisis, la temperatura de la biomasa varía ampliamente, y el estado y componentes de la biomasa cambia continuamente. Los cambios en los valores de las propiedades no deben ser despreciados. Estos cambios no permiten alcanzar una alta fiabilidad.
- La interacción del calor específico y el calor de reacción es inevitable a altas temperaturas y es imposible detectarlos por separado.

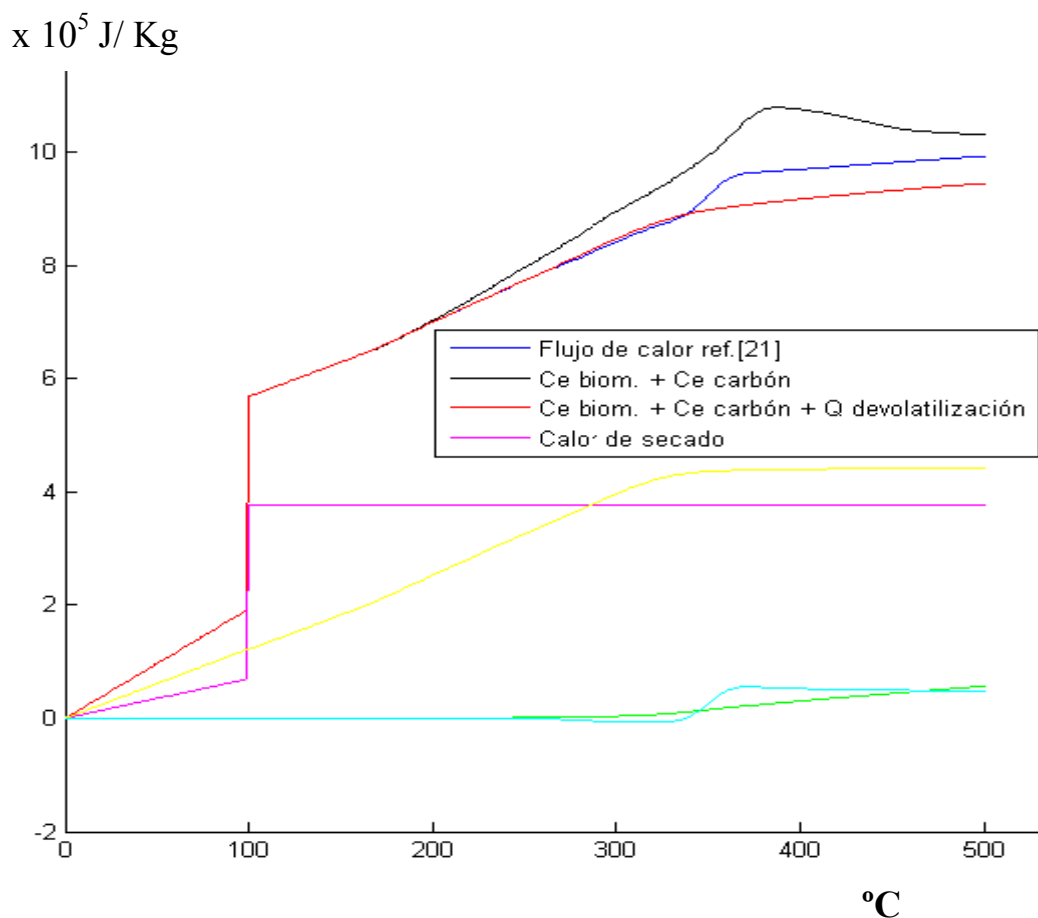
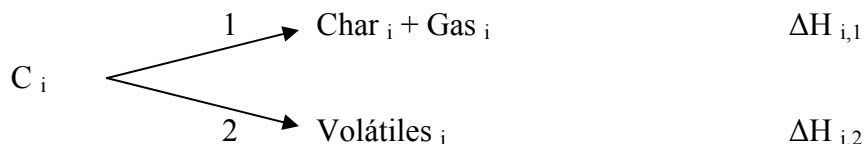


Figura 5.10. Evolución de los componentes caloríficos (J/Kg) en función de la temperatura para madera de pino con un 20 % de humedad.

5.2.1.2.1. Modelo matemático 1. Calor de las reacciones de pirolisis de la celulosa, hemicelulosa y lignina.

Varios autores han propuesto describir la pirolisis de la madera como la suma de reacciones independientes de los principales macrocomponentes de la madera (hemicelulosa, celulosa y lignina) [19]. Para cada componente, se propone un esquema cinético agregado de 2 reacciones paralelas:



donde i indica cada macrocomponente. $\Delta H_{i,1}$ y $\Delta H_{i,2}$ denotan la reacción aparente de los dos posibles modos de degradación. Así para la pirolisis de la madera se podría presentar el siguiente esquema:

$$\text{Madera} = \sum_{i=1}^3 C_i = \sum_{i=1}^3 \alpha_i * \text{madera}$$

donde α_i es la fracción en peso de cada macrocomponente y consecuentemente:

$$\begin{array}{l}
 \Delta H_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i * \Delta H_{i,1} \\
 \Delta H_2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i * \Delta H_{i,2}
 \end{array}$$

El valor del calor de las reacciones es cuestionable. La línea **turquesa** representa el último término de la ecuación (C), el calor de la pirolisis que se obtiene del análisis de la entalpía de los componentes de la biomasa: celulosa, hemicelulosa y lignina, partiendo de los porcentajes relativos de cada componente para cada tipo de biomasa. En primer lugar (después de digitalizar la gráfica) se convierten los datos a Voltios multiplicando por la masa de la muestra que en el caso de este [21] son 2 mg.

Partiendo de la siguiente fórmula, se obtiene la potencia aplicada elevando al cuadrado el voltaje y multiplicando por k (Ω^{-1}), que tras estudiar el caso del pino se establece en $5 \cdot 10^7$.

$$W_i = k * V_i^2$$

A continuación, se integra, se multiplica por el inverso del ratio de calentamiento (en este caso son 10°C / minuto) , por el porcentaje de cada componente en la biomasa (para el caso del pino 42% celulosa, 17% hemicelulosa , y 25% lignina, ver tabla 5.4.) y se divide por la muestra de 2mg. Es decir, siendo r el ratio de calentamiento (°C / segundo).

$$dT^a (°C) = dt (s) * r (°C/s) \rightarrow dt (s) = dT^a (°C) / r (°C/s)$$

$$W = (W_{celulosa} * 0.42) + (W_{hemicelulosa} * 0.17) + (W_{lignina} * 0.25)$$

$$E = W * dt = W * dT^a / r = Q_{pirólisis}$$

$$E_{específica} = E / Masa\ muestra$$

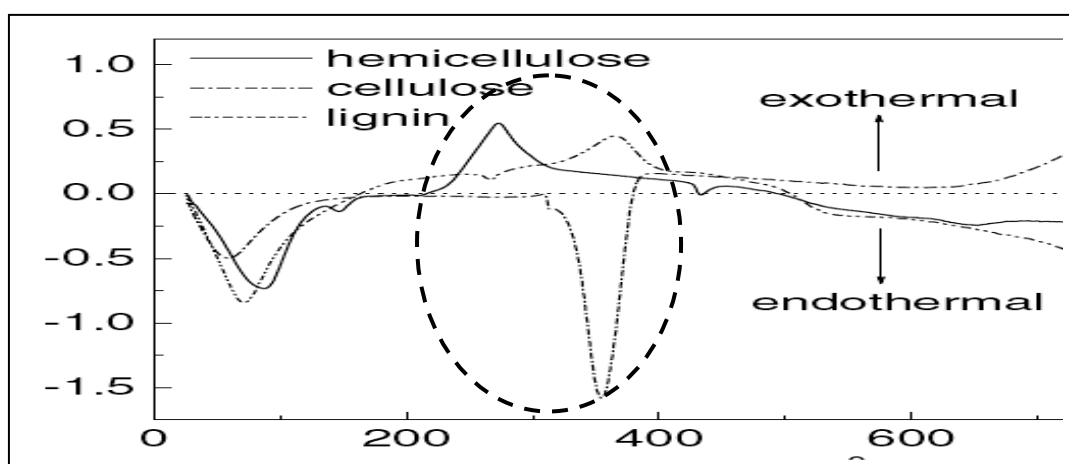


Figura 5.11. Comportamiento térmico (Calorimetría de barrido diferencial) de la pirólisis de celulosa, hemicelulosa y lignina (μV/mg frente a grados Kelvin).

	Glucosa	Xylosa	Galactosa	Arabinosa	Manosa	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Residuos de ajo	26,9	4,6	3,2		0	24,2	6,9	8,5
Cáscara de avena	53,8	17		1,3		48,4	16,1	16,2
Mazorca de maíz	29,2	23,6	1,7		0	26,3	25,2	16,3
Madera de abedul	39,7	27,7			0	35,7	25,1	19,3
Madera de aliso	35,9	25,2	1,5		0	32,3	23,5	24,8
Madera de pino	46,8	6,6	2,5		10,8	42,1	17,7	25
Bambú	43,9	20		0,9	0	39,5	17,6	25,2
Madera de eucalipto	47,8	10,5	4,4		0	43	13,2	25,3
Madera de leucaena	45,3	15,2	1,7		0	40,8	15	26,9
Cáscara de pipa de girasol	29,7	19,4	1,6			26,7	18,4	27
Cáscara de almendra	27,5	28,7	2		0	24,7	27	27,2
Madera de roble	38,3	19,2	1,9			34,5	18,6	28
Madera de abeto	45,7	5,9	3		14,4	41,1	20,9	28
Cáscara de nuez de Castilla	23,3	18,9	2,4			21	18,8	32,7
Cáscara de coco	26,9	28		3,2	0	24,2	24,7	34,9
Cáscara de arroz	34,3	15,8	1,2	2,1		30,9	16,8	35,9
Cáscara de nuez de Macadamia	29,9	20,2			0	26,9	17,8	40,1
Cáscara de nuez de kukui	16,2	14			0	14,6	12,3	60,1
Cáscara de pacana	6,2	3,1	1,2			5,6	3,8	70

Tabla 5.4. Análisis la composición de diferentes biomásas

5.2.1.2.2. Modelo matemático 2

Las siguientes gráficas DSC indican un pico a la temperatura correspondiente a la mayor pérdida de masa de la muestra. [19]. Se puede apreciar la diferente evolución entre la madera de haya y madera de abeto. Para poder alcanzar datos cuantitativos del calor de reacción de las DSC curvas, es necesario obtener patrones de referencia de estas gráficas. Aquí como ya se ha indicado anteriormente se incluyen 2 sumandos el flujo de calor necesario para calentar la muestra y el calor de la reacción de pirólisis. Para separar un concepto del otro se va a calcular una curva teórica de calentamiento de la muestra.

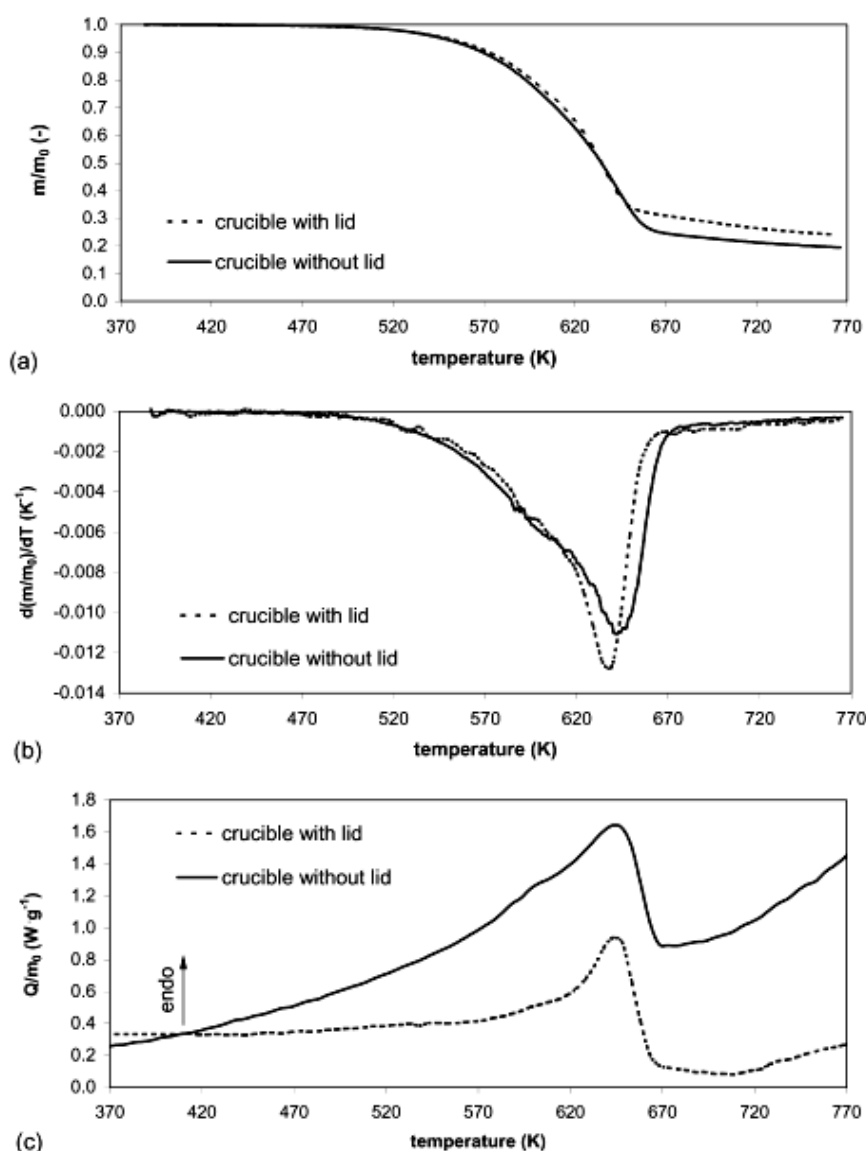


Figura 5.12. Resultados TG, DTG y DSC para experimentos de madera de abeto en un rango de 373 a 773 K y para 10 K/minuto

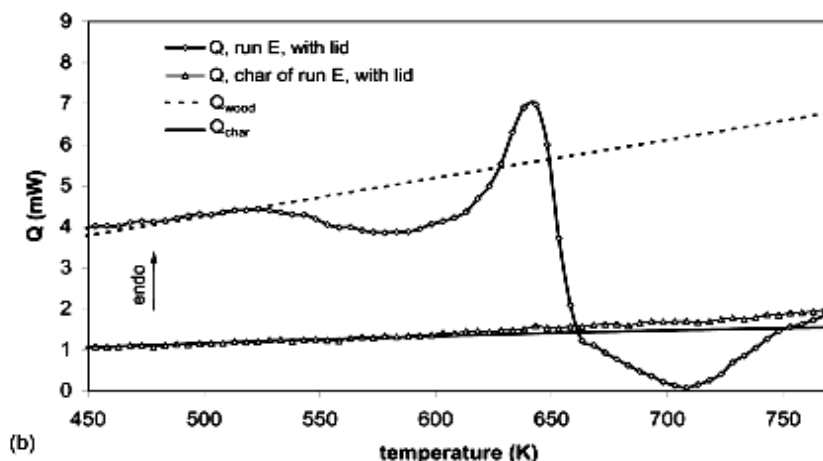


Figura 5.13. Experimentos DSC con madera de abeto y carbón de madera de abeto para un rango de 373 a 773 K y 10 K/minuto

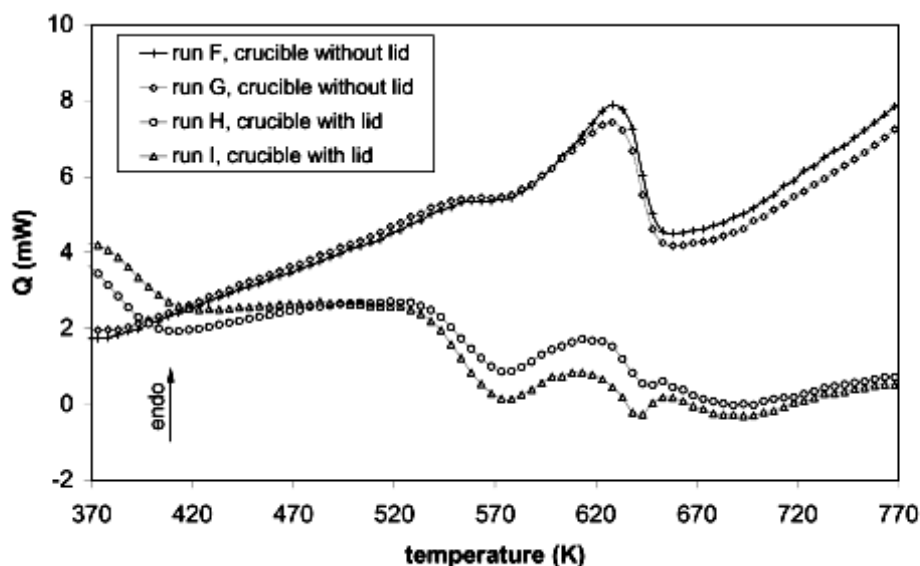


Figura 5.14. Experimento DSC para madera de haya en el intervalo entre 373 y 773 K.

La figura 5.15 muestra la magnitud de conversión adimensional de biomasa en carbón vegetal para ambos tipos de madera definida como:

$$X(T^a) = \frac{m_0 - m(T^a)}{m_0 - m_{final}}$$

m_0 = masa de la muestra al inicio

$m(T^a)$ = masa de la muestra a la temperatura T^a

m_{final} = masa de la muestra al final (masa de carbón vegetal)

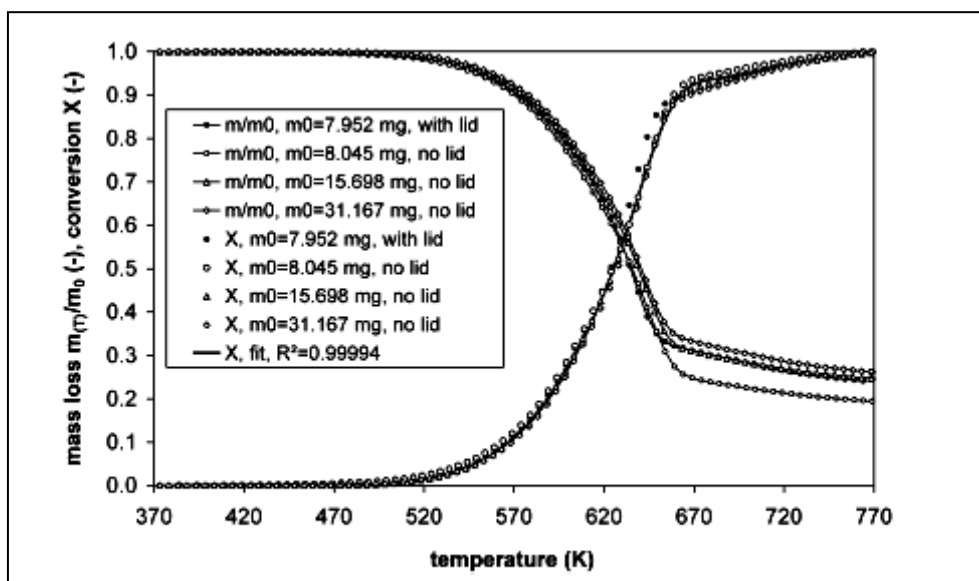


Figura 5.15. Resultados experimentales de la pirolisis de madera de abeto. Ajuste de la curva de conversión de biomasa en carbón vegetal.

Así se puede definir una hipótesis de trabajo donde Q_s es el flujo de calor necesario para calentar la muestra sin considerar ningún calor de reacción. Así en ausencia de otros fenómenos, el flujo de calor debido a los efectos térmicos de la reacción de pirolisis (Q_R) puede ser estimado substrayendo Q_s al patrón de las curvas DSC.

$$Q_s = ((1 - X(T^a)) * m_0 * C_{e \text{ biomasa}} + X(T^a) * m_{\text{final}} * C_{e \text{ carbón}}) * dT^a/dt \quad (W)$$

Los valores tomados para los calores específicos en este caso son más complejos

$$C_{e \text{ biomasa}} = 1113,68 + 4,8567 * (T^a - 273,15) \quad T^a \text{ (Kelvin)}$$

$$C_{e \text{ carbón}} = (8314/5,75) * (e^{(380/T^a)} - 1) / (380/T^a)^{-2} + 2 * e^{(1800/T^a)} * (e^{(1800/T^a)} - 1) / (1800/T^a)^{-2}$$

A continuación se pueden obtener el calor de pirolisis a través de 2 conceptos H_p y H_s que reflejan las dos etapas con distinto comportamiento térmico. En la figura 5.11. se pueden apreciar dos picos: exotérmico entre 250 ° C y 330 ° C y endotérmico entre 330 ° C y 385 ° C.

$$H_p = (1/ m_0) * \int_{250}^{330} Q_R * dt \quad (J/g)$$

$$H_s = (1/ m_0) * \int_{330}^{385} Q_R * dt \quad (J/g)$$

En la tabla 5.5. se aprecia el calor de devolatilización para varios experimentos con temperaturas finales de alrededor de 400 °C.

Tipo de madera	Muestra inicial (mg)	Muestra final (mg)	Rendimiento final de carbón	Tª cambio de endotérmico a exotérmico (K)	Calor de pirolisis (J/g)		
					Hp	Hs	Total
Abeto	5,71	1,28	0,223	663	162,1	-41,9	120,2
Abeto	5,83	1,35	0,231	660	70,6	-62,6	8
Abeto	11,53	2,82	0,245	658	41,9	-60,8	-18,9
Haya	7,63	1,73	0,226	654	-85,6	-49,6	-135,2
Haya	7,76	1,92	0,247	654	-156,1	-65,7	-221,8

Tabla 5.5. Calor de pirolisis para diferentes experimentos

5.2.2. Cálculo iterativo de las pérdidas de energía del horno y de las dimensiones del horno

El consumo necesario de biomasa para llevar a cabo el proceso dependerá en parte de la proporción de energía perdida. Este concepto depende así mismo de la geometría del horno que variará en función del volumen de madera, por lo que necesitamos encontrar el punto donde converge este bucle.

El mismo artículo [21] facilita la progresión del residuo másico con el aumento de la temperatura. Se ha digitalizado e interpolado la figura 5.16. considerando varios puntos específicos incluidos en la tabla 5.6. entre 167 y 700 °C. Este dato se utilizará en cálculos posteriores.

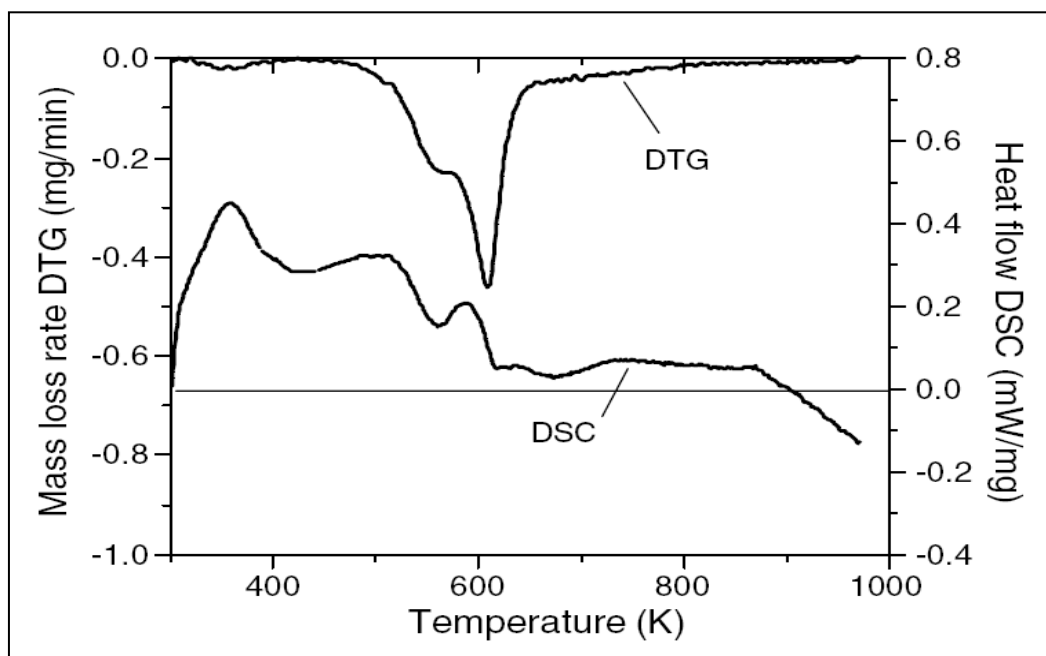


Figura 5.16. Comparación de las curvas DTG y DSC de la paja de trigo

Relación del residuo másico y requerimientos caloríficos con la evolución de la temperatura						
Pico de temperatura (°C)	167	257	400	500	600	700
Residuo másico (%)						
Tallo de algodón	100,0	93,8	34,1	28,0	25,5	23,9
Paja de trigo	100,0	95,2	38,8	32,5	30,1	29,2
Pino	100,0	96,2	29,8	23,2	20,7	19,4
Requerimientos caloríficos (KJ/Kg)						
Tallo de algodón	214	360	459	465	493	505
Paja de trigo	243	414	523	558	592	568
Pino	211	371	646	600	582	501

Tabla 5.6. Relación del residuo másico, requerimiento calorífico y temperatura

A continuación, se ha eliminado el porcentaje de cenizas.

$$N_c \text{ (sin cenizas)} = N_s \text{ (Biomasa seca)} - N_{\text{cenizas}}$$

N_c = Porcentaje de biomasa seca y sin cenizas

% cenizas (base seca)	Código	%
Pino	c	2
Paja de trigo	c	9
Tallo de algodón	c	3

Tabla 5.7. Resumen del % de cenizas en los diferentes tipos de biomasa.

5.2.2.1. Conversión de biomasa en carbón vegetal y volátiles.

Se ha digitalizado e interpolado la siguiente figura 5.17., Es un caso de madera blanda y se va a extender al resto de tipos de biomasa. Está reflejado en [19]. El dato que nos interesa es el factor de conversión $X(T^a)$ y su complementario $(1-X(T^a))$ y sus respectivas integrales entre 0°C y la temperatura final.

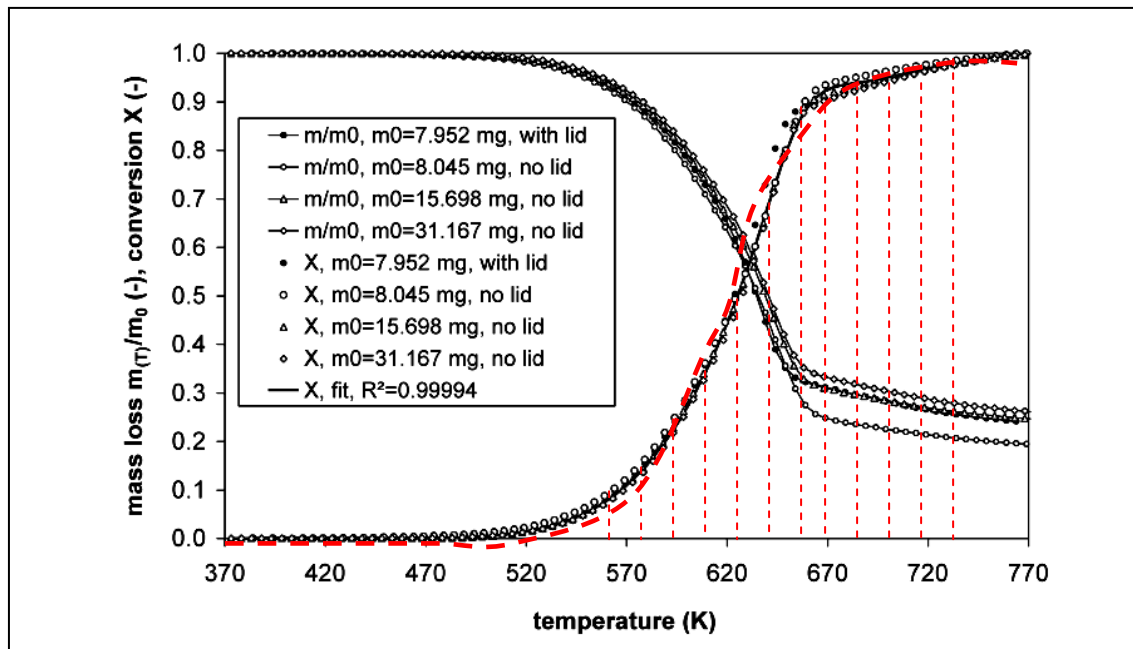


Figura 5.17. Resultados experimentales de la pirólisis de madera de abeto. En el gráfico se puede apreciar la pérdida de masa y la conversión de la biomasa frente al aumento de temperatura.

El factor K va a dar la conversión de biomasa inicial en carbón vegetal y volátiles (zona rayada) y el factor J la biomasa inicial no convertida (zona no rayada)

$$K = \left(\int X(T^a) dT^a \right) / T_{final}$$

$$J = \left(\int (1 - X(T^a)) dT^a \right) / T_{final}$$

A continuación se calcula la estimación del porcentaje de la biomasa inicial seca y sin cenizas sin convertir y la estimación del porcentaje de la conversión de biomasa inicial seca y sin cenizas en carbón vegetal y la estimación del porcentaje de la conversión de biomasa inicial seca y sin cenizas en volátiles.

$$N_{biomasa} = J * N_c$$

$$N_{carbón\ vegetal} = Residuo\ másico(T_f) * K * N_c$$

$$N_{volátiles} = (1 - Residuo\ másico(T_f)) * K * N_c$$

Del contenido de volátiles podemos obtener la estimación del porcentaje de la conversión de biomasa inicial seca y sin cenizas en volátiles gaseosos y la estimación del porcentaje de la conversión de biomasa inicial seca y sin cenizas en volátiles condensados

$$N_{gas} = 46 \% * N_{volátiles}$$

$$N_{líquidos} = 54 \% * N_{volátiles}$$

Estos datos nos posibilitan calcular un poder calorífico ponderado de la biomasa consumida considerando todo el proceso de pirólisis y sus transformaciones.

$$PC_{ponderado} = (N_{biomasa} * PC_{biomasa}) + (N_{carbón} * PC_{carbón}) + (N_{gas} * PC_{gas}) + (N_{líquidos} * PC_{líquido})$$

5.2.2.2. Producción de carbón vegetal y volátiles

A continuación se calcula la producción de carbón vegetal, así como la cantidad de gases, líquidos y tars utilizando porcentajes obtenidos de experimentos como los reflejados en las figuras 5.18. extraídas de [32]

$$M_{carbón\ vegetal} (M_{char}) = Residuo\ carbón (T_f) * M * N_c$$

$$M_{líquido} (M_{liquido}) = Residuo\ líquido (T_f) * M * N_c$$

$$M_{volátiles} (M_{vol}) = Residuo\ gas (T_f) * M * N_c$$

$$M_{tars} (M_{tars}) = Residuo\ tars (T_f) * M * N_c * 0,12$$

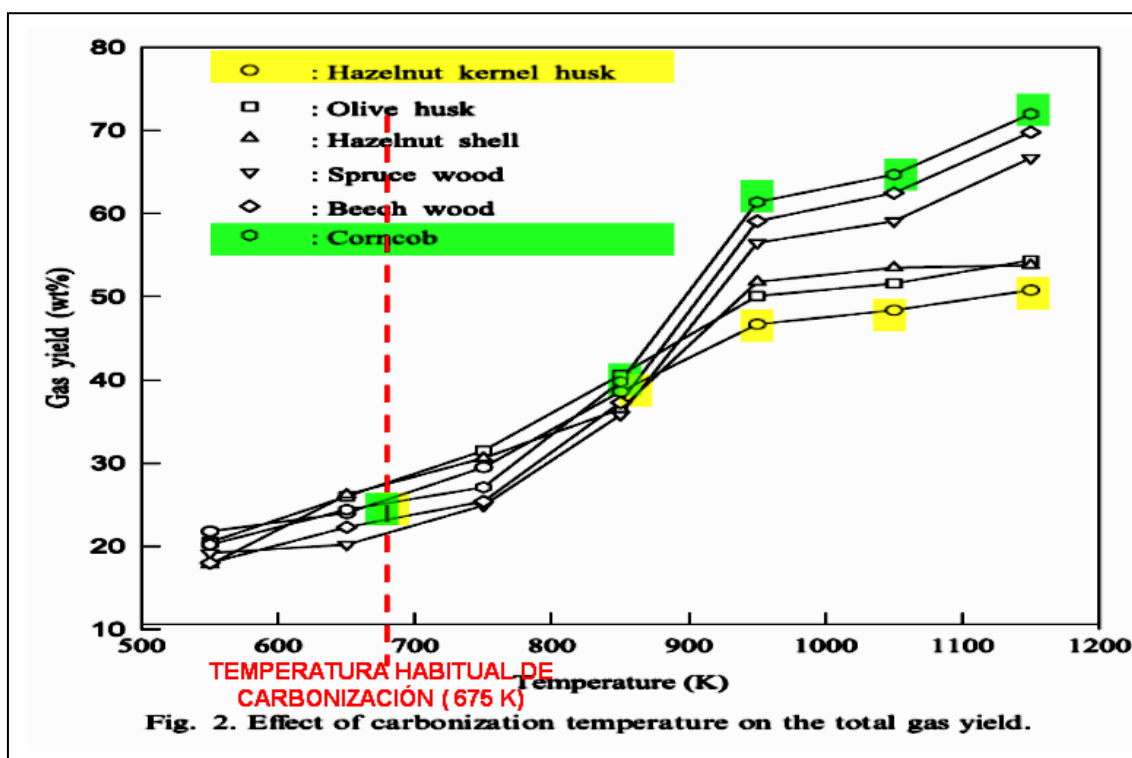
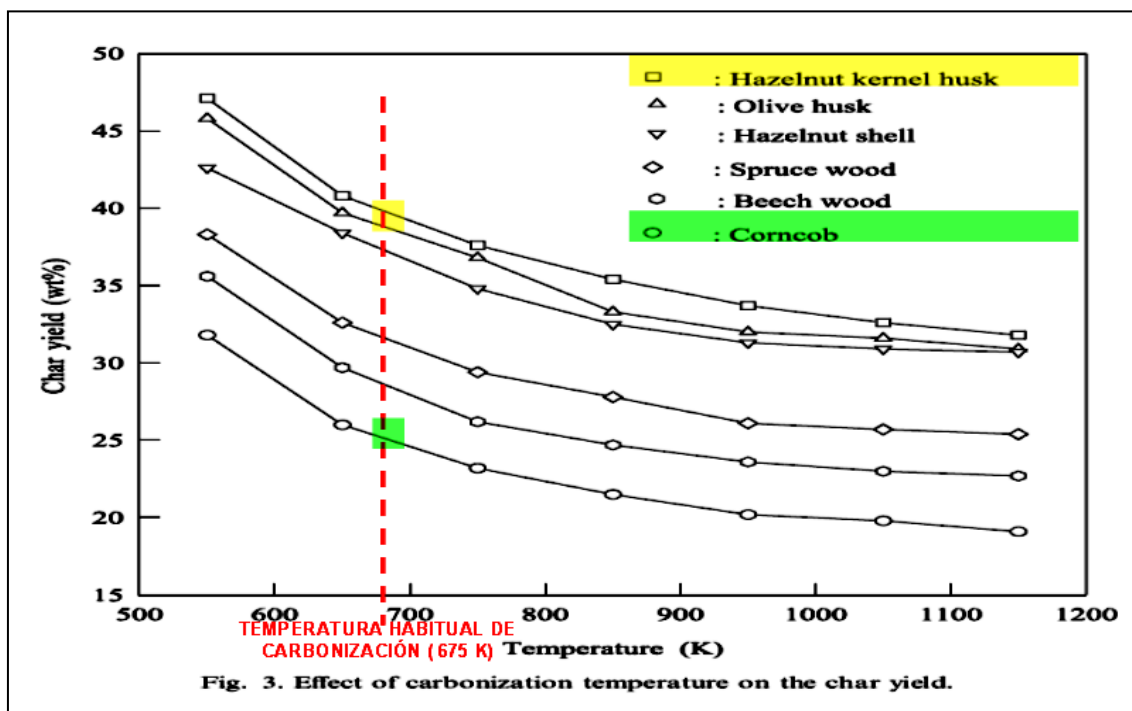


Figura 5.18.. Efecto de la temperatura de carbonización en la producción de carbón vegetal, líquido condensado, gas y tar.

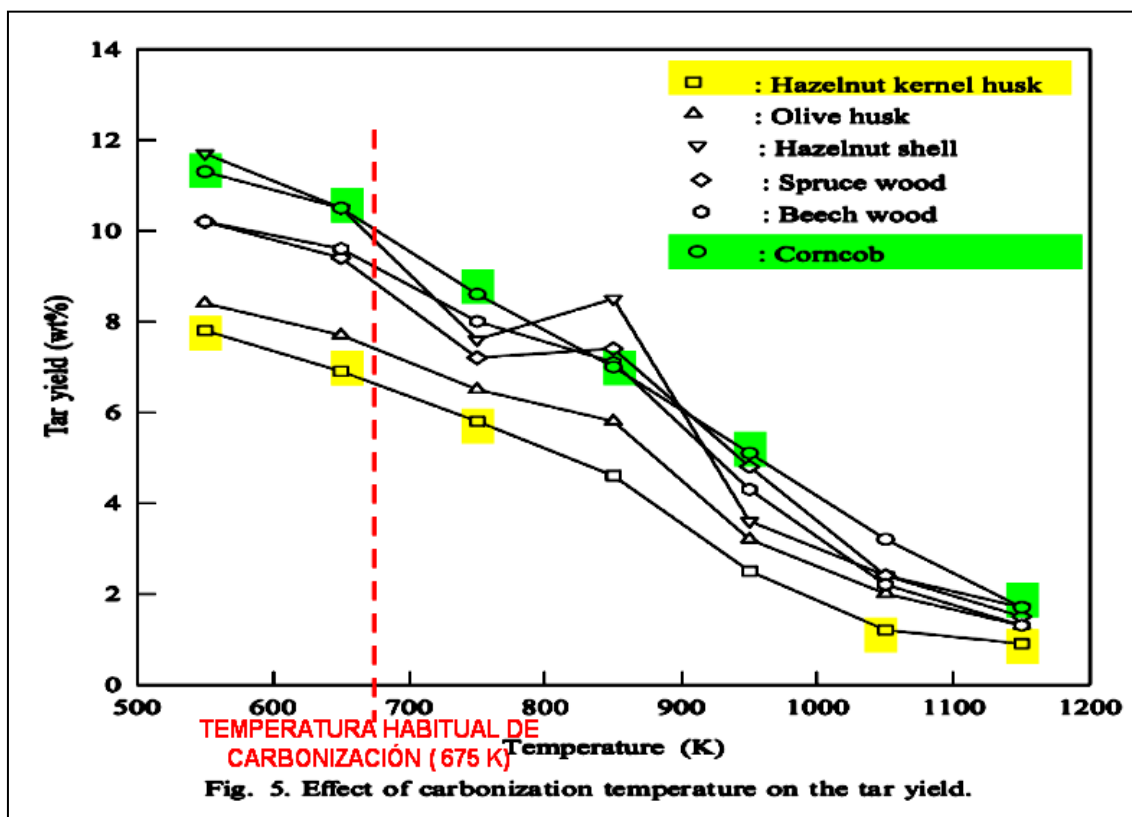
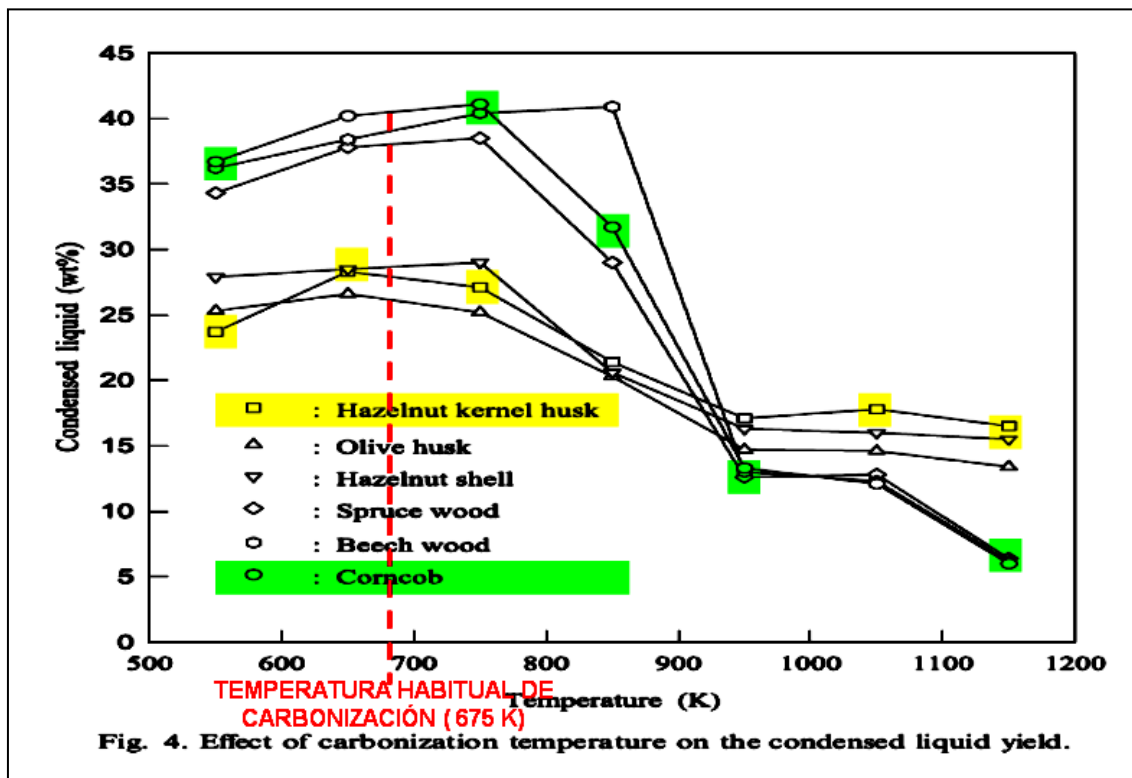


Figura 5.18 bis. Efecto de la temperatura de carbonización en la producción de carbón vegetal, líquido condensado, gas y tar.

A continuación se obtiene el calor máximo que pueden aportar los volátiles recirculados

$$Q_{\text{volátiles recirculados}} = f * M_{\text{volátiles}} * PC_{\text{gas}}$$

Se abren dos posibilidades. Por un lado puede ser que este último concepto sea mayor que el calor necesario a aportar por lo que no se queman todos los volátiles recirculados y no es necesario consumir nada de biomasa.

$$Q_{\text{volátiles recirculados}} > Q_{\text{total a aportar al proceso}}$$

$$M_{\text{biomasa quemada}} = 0$$

$$M_{\text{volátiles quemados}} = Q_{\text{total}} / PC_{\text{gas}}$$

Por otro lado puede ser que el calor proporcionado por la combustión de los volátiles recirculados no sea suficiente, por lo que se consumen todos y es necesaria la combustión de biomasa.

$$Q_{\text{volátiles recirculados}} < Q_{\text{total a aportar al proceso}}$$

$$M_{\text{biomasa quemada}} = (Q_{\text{total}} - Q_{\text{volátiles recirculados}}) / PC_{\text{ponderado}}$$

$$M_{\text{volátiles quemados}} = Q_{\text{volátiles recirculados}} / PC_{\text{gas}}$$

A partir de aquí ya tenemos la masa total del horno, añadiendo a la masa que se va a carbonizar la parte de madera quemada.

$$M_{\text{TOTAL HORNO}} = M + M_{\text{biomasa quemada}}$$

5.2.2.3. Rendimientos de los subproductos de la carbonización.

Se establecen los siguientes ratios:

$$R_{\text{másico de carbón (base seca)}} = M_{\text{carbón vegetal}} / (M_{\text{TOTAL HORNO}} / (1 + \text{hum}))$$

$$R_{\text{másico de carbón (base húmeda)}} = M_{\text{carbón vegetal}} / M_{\text{TOTAL HORNO}}$$

$$R_{\text{másico de volátiles}} = M_{\text{volátiles}} / (M_{\text{TOTAL HORNO}} / (1 + \text{hum}))$$

$$R_{\text{energético de carbón}} = M_{\text{carbón}} * PC_{\text{carbón}} / (M_{\text{TOTAL HORNO}} * PC_{\text{biomasa}} / (1 + \text{hum}))$$

$$R_{\text{energét. subproductos recuperados}} =$$

$$M_{\text{carb.}} * PC_{\text{carb.}} + (46\% * PC_{\text{gas}} + 54\% * PC_{\text{liq}}) * M_{\text{vol. no quem}} / (M_{\text{TOTAL}} * PC_b / (1 + h))$$

Todos los subproductos vaporosos y gases escapan a la atmósfera en la forma de humo. Los subproductos en instalaciones industriales pueden ser recuperados, pasando los gases liberados a través de una serie de condensadores de agua, obteniéndose el llamado ácido piroleñoso, y el gas de la madera no condensable supera los condensadores y de ser quemado, proporcionando calor. El gas de la madera puede ser usado sólo como combustible, y se compone:

Sustancia	%
<i>Metano</i>	17
<i>Hidrógeno</i>	2
<i>Monóxido de Carbono</i>	23
<i>Dióxido de Carbono</i>	38
<i>Oxígeno</i>	2
<i>Nitrógeno</i>	18

Tabla 5.8. Composición promedio del gas de madera no condensable

Este gas de madera tiene un valor calorífico de alrededor de 10,8 MJ/m³ o sea alrededor de un tercio del valor calorífico del gas natural.

El ácido piroleñoso se compone principalmente de agua. Es un líquido sumamente contaminante nocivo, corrosivo, que debe ser, ya sea tratado correctamente para obtener los subproductos para la venta, o eliminado, por quema con la ayuda de otros combustibles, como ser con madera o con gas de madera. Los otros componentes, fuera del agua, son alquitranes de madera, tanto los solubles en agua como los insolubles, el ácido acético, el metanol, la acetona y otros complejos químicos en menores cantidades. Si se deja en reposo, el ácido piroleñoso se separa en dos capas consistentes en el alquitrán insoluble en el agua y la capa acuosa que contiene los otros productos químicos. Como orientación de los rendimientos del subproducto condensado (ácido piroleñoso), pueden tomarse como típicos los siguientes rendimientos de latifoliadas caducas del hemisferio norte:

Sustancia	Masa obtenida (kg)	%
Ácido acético	50	15,9
Metanol	16	5,1
Acetona y metil-acetona	8	2,5
Alquitranes solubles	190	60,5
Alquitranes insolubles	50	15,9

Tabla 5.9. Rendimiento de 1 Tonelada de madera seca al aire.

5.2.2.4. Dimensiones del horno

La típica parva, es de alrededor de 4 metros de diámetro en la base y de alrededor de 1 a 1,5 m de altura, aproximadamente un hemisferio aplastado. En la base, se hacen alrededor de seis a diez tomas de aire, y una apertura arriba, de alrededor de 20 cm. de diámetro, permite la salida del humo durante la combustión.

Se limpia un espacio de alrededor de 6 m, se nivela y compacta, debiendo ser bien drenado. A veces se planta un poste de alrededor de 2 m de alto, en lo que será el centro de la pila de leña, para facilitar la acumulación de la madera, para dar estabilidad a la pila y para dar un soporte al operador cuando se tapa el apilado con tierra y se hace el agujero superior para el humo, y luego cuando se enciende la parva. Normalmente se saca el poste antes del encendido para dejar una apertura central a través de todo el montículo.

Se coloca antes, sobre el suelo y radialmente, una tejedura de pequeñas trozas cruzadas, para formar un círculo de alrededor de 4 m de diámetro. Luego se empaca densamente la madera, que debe ser carbonizada sobre esta plataforma, cuya finalidad es que el fuego y los gases calientes circulen correctamente.

$$\text{Volumen}_{\text{horno}} = (M_{\text{total horno}} / (\text{densidad}_{\text{biomasa}} * \text{factor llenado}))$$

Se asemeja su forma a una semiesfera.

$$V = (4/3 * \pi * R^3) / 2$$

$$\text{Diámetro} = 1,1 * (V * 12 / \pi)^{1/3}$$

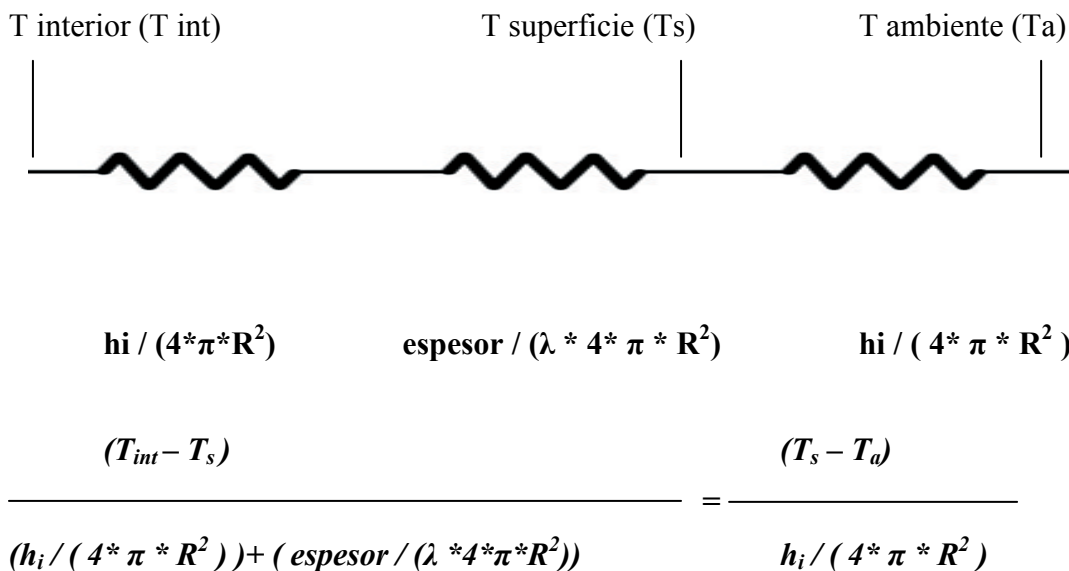
$$\text{Altura}_{\text{horno}} = D * 0,9 / 2$$

$$\text{Superficie}_{\text{inferior}} = \pi * R^2$$

$$\text{Superficie}_{\text{superior}} = 2 * \pi * R^2$$

5.2.2.5.Cálculo de pérdidas por la superficie superior (cubierta)

Se realiza el siguiente análisis:



Obtenemos el valor de la temperatura de la superficie del horno.

$$T_{superficie} = \frac{(T_{int} * \lambda_{tierra} * h_i) + (T_{ambiente} * ((h_o * \lambda_{tierra}) + (h_o * h_i * espesor)))}{(h_o * \lambda_{tierra}) + (h_i * \lambda_{tierra}) + (h_o * h_i * espesor)}$$

Magnitudes del aire a 300 K	Código	
Longitud característica	Lo	Diámetro
ρ (Densidad)	ro	1,1614 Kg/ m ³
Cp (Calor específico)	cp	1,007 J / Kg*K
μ (viscosidad absoluta)	mu	185*10 ⁻⁶ N*s/m ²
ν (viscosidad cinemática)	nnu	15,89 * 10 ⁻⁶ m ² /s
λ (Conductividad térmica)	kaire	26,3*10 ⁻³ W/m*K
α (Difusividad térmica)	alfa	22,5 * 10 ⁻⁶ m ² /s
Pr (Número de Prandtl)	Pr	0,707

Tabla 5.10. Datos del aire a 300 K. Obtenido de [45]

Cálculo del coeficiente de convección natural

El cálculo se hace en base a correlaciones empíricas dependiendo de la forma, que en este caso es una esfera.

$$Ra_{Raileigh} = (g \cdot (T_{superficie} - T_{ambiente}) \cdot (Lo^3)) / (T_m \cdot \alpha \cdot \nu)$$

$$Nu_{convección\ natural} = 2 + ((0.589 \cdot Ra^{0,25}) / (1 + (0.469/Pr)^{9/16})^{4/9})$$

$$h_{convección\ natural} = Nu_{natural} \cdot \lambda_{aire} / Lo$$

Cálculo del coeficiente de convección forzada

$$Número\ de\ Reynolds = velocidad_{aire} \cdot Diámetro / \nu$$

μ_s es la viscosidad absoluta correspondiente a la temperatura superficial. Varía en un rango de $250,7 \cdot 10^{-6}$ a $290 \cdot 10^{-6}$ N*s/m².

Para la transferencia de calor en líquidos y gases la siguiente ecuación correlaciona los datos disponibles en los intervalos de los números de Reynolds entre $3,5$ y $7,6 \cdot 10^4$ y los números de Prandtl entre $0,7$ y 380 .

$$Nu_{forzado} = 2 + ((0.4 \cdot (Red^{0,5}) + 0.06 \cdot (Red^{2/3})) \cdot (Pr^{0,4}) \cdot ((\mu / \mu_s(Ts))^{0,25}))$$

Para combinar los efectos de la convección natural y forzada se utiliza un método empírico. En este caso los flujos son perpendiculares.

$$Nu_{combinado} = Nu_{natural} + Nu_{forzado}$$

$$h_{total} = Nu_{combinado} \cdot \lambda_{aire} / D$$

Velocidad del aire	Km / h
En calma	$v < 5$
Flojo	$6 < v < 20$
Moderado	$21 < v < 40$
Fuerte	$41 < v < 70$
Muy fuerte	$71 < v < 120$
Huracanado	$v > 120$

Tabla 5.11. Diferentes velocidades del aire

Como se aprecia en la figura 5.19. la región de pirolisis hace un movimiento en abanico desde la parte central y superior hacia la parte periférica inferior.

Para considerar la temperatura de cada parte del horno en cada momento no se ha cogido la misma temperatura para todo el horno. Se va a dividir el horno en 18 sectores circulares de 10 °C cada uno (semicírculo) y estudiar las pérdidas por zonas zona esférica.

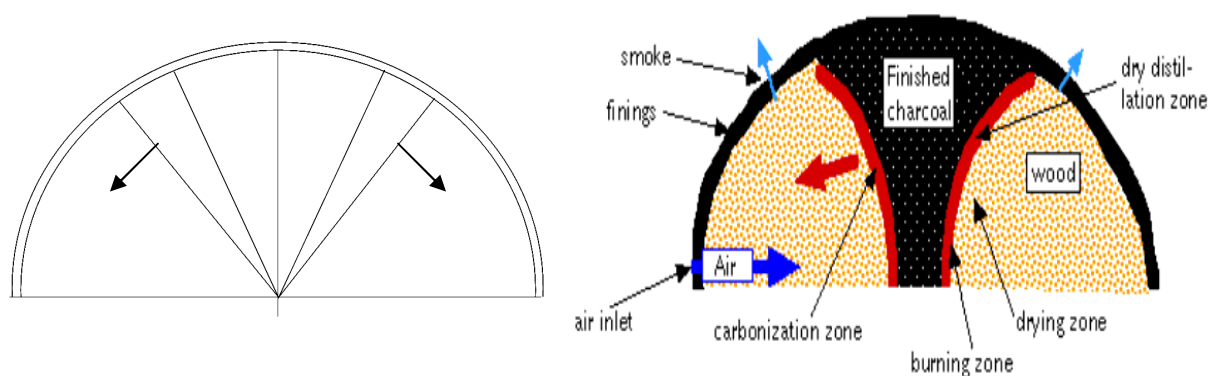


Figura 5.19. Asimilación geométrica del movimiento de la zona de carbonización de un horno

Partiendo de la siguiente ecuación:

$$Q_{superficie superior} = h_{total} * S * \Delta T^a$$

En todo momento existirá un sector de 10 ° a la temperatura de carbonización. Así mismo se va a considerar que los dos sectores anexos de 10 °C estarán a un 60 % de la temperatura de carbonización, salvo al inicio (primer sector) y al final (último sector) del proceso donde sólo se considerará un sector anexo al 60 %.

$$Q_{100\%} =$$

$$\sum (h_{total} * (2 * \pi * (D/2)^2) * (\text{seno}(\pi/2 * n/9) - \text{seno}(\pi/2 * (n-1)/9)) * (T_s - T_a))$$

$$Q_{60\%} =$$

$$\sum (h_{total} * (2 * \pi * (D/2)^2) * (\text{seno}(\pi/2 * (n+1)/9) - \text{seno}(\pi/2 * n/9) + \text{seno}(\pi/2 * (n-1)/9) - \text{seno}(\pi/2 * (n-2)/9)) * ((0.6 * T_s) - T_a))$$

$$E_{pérdidas cubierta} = (Q_{100\%} + Q_{60\%}) * t / 9$$

5.2.2.6. Cálculo de pérdidas por la superficie inferior (suelo)

Este dato se obtiene de la siguiente forma:

$$E_{\text{pérdidas suelo}} = \int S * \lambda_{\text{tierra}} * \Delta T^a(t) * dt$$

Para un cilindro en el cual el radio >>> altura

$$S = 2 * \text{Diámetro}$$

Consideramos que el aumento de la Temperatura en la parte inferior del horno es lineal ya que es la última región en carbonizarse. No se consideran los efectos de convección ya que en esta última fase del ciclo el colchón de aire creado por el enrejado de troncos se ha cubierto por el desprendimiento de carbón y no se mantiene.

$$\Delta T^a(t) = T_f(t) - T_{\text{ambiente}}$$

Por lo tanto,

$$E_{\text{pérdidas suelo}} = 2 * D * \lambda_{\text{tierra}} * (T_{\text{final}} - T_{\text{ambiente}}) * t / 2$$

5.2.2.7. Cálculo de pérdidas por los humos expulsados al exterior.

Consumo de aire en la combustión de biomasa y volátiles recirculados

La combustión de la celulosa sigue la siguiente fórmula y su combustión sigue la siguiente estequiometría. Para cada tipo de biomasa se efectúa un cálculo similar. En el caso de la madera de pino, se puede comprobar con los porcentajes y los pesos molares.

$$\% \text{ Carbono} = 49,41$$

$$PM \text{ Carbono} = 12 \qquad 49,41/12 = 4,12 \qquad 1,49$$

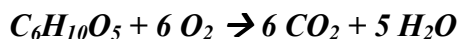
$$\% \text{ Hidrógeno} = 6,11$$

$$PM \text{ Hidrógeno} = 1 \qquad 6,11/1=6,11 \qquad 2,22$$

$$\% \text{ Oxígeno} = 44,07$$

$$PM \text{ Oxígeno} = 16 \qquad 44,07/16=2,75 \qquad 1$$

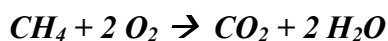
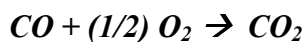
Se acerca de manera aproximada a la proporción de los índices de la celulosa



$$Mol \text{ celulosa quemada} = M_{quemada} / PM_{celulosa}$$

$$Mol O_2 (A) = Mol \text{ celulosa quemada} * 6$$

$$g O_2 \text{ combustión celulosa} = Mol O_2 (A) * PM O_2 * (1 + \% \text{ exceso aire}/100)$$



$$g CO = 56 g / 1 Kg \text{ biomasa inicial}$$

$$g CH_4 = 17 g / 1 Kg \text{ biomasa inicial}$$

$$Mol CO = 56 g * M_{total} / PM CO$$

$$Mol CH_4 = 17 g * M_{total} / PM CH_4$$

$$Mol O_2 (B) = Mol CO * (1/2) + Mol CH_4 * 2$$

$$g O_2 \text{ combustión volátiles} = Mol O_2 (B) * PM O_2 * (\% \text{ volátiles quemados})$$

El aire está compuesto en un 21% por Oxígeno y un 79 % de Nitrógeno aproximadamente. Así,

$$M_{\text{aire utilizado}} (Kg) = (g O_2 (A+B)) * (100 / 21) * (1 Kg/1000g)$$

$$M_{\text{humos}} = M_{\text{aire}} + M_{\text{biomasa quemada}} + M_{\text{volátiles desprendidos}}$$

Calor específico de los humos

Se ha incluido el calor específico de los humos como un promedio en función de la producción de CO₂ y vapor de agua, por lo que se han necesitado los siguientes parámetros:

$$Mol H_2O (A) = Mol_{\text{celulosa quemada}} * 5$$

$$Mol CO_2 (A) = Mol_{\text{celulosa quemada}} * 6$$

$$Mol H_2O (B) = Mol CH_4 * 2$$

$$Mol CO_2 (B) = Mol CO * 1 + Mol CH_4 * 1$$

$$g H_2O \text{ combustión celulosa} = Mol H_2O (A) * PM H_2O$$

$$g CO_2 \text{ combustión celulosa} = Mol CO_2 (A) * PM CO_2$$

$$(g H_2O / g CO_2) \text{ combustión celulosa} = 5 * PM H_2O / (6 * PM CO_2) = 0,3125 \quad (1)$$

$$g H_2O \text{ combustión volátiles} = Mol H_2O (B) * PM H_2O * (\% \text{ volátiles quemados})$$

$$g CO_2 \text{ combustión volátiles} = Mol CO_2 (B) * PM CO_2 * (\% \text{ volátiles quemados})$$

$$(g H_2O / g CO_2)_{\text{comb vol}} = Mol CH_4 * 2 * PM H_2O / ((Mol CO + Mol CH_4) * PM CO_2) = 0,2838 \quad (2)$$

$$Ce_{\text{humos promedio 1}} = (Ce CO_2 * (\% CO_2 (1))) + (Ce H_2O * (\% H_2O (1)))$$

$$Ce_{\text{humos promedio 2}} = (Ce CO_2 * (\% CO_2 (2))) + (Ce H_2O * (\% H_2O (2)))$$

Energía pérdida por la expulsión de humos

$$E_{\text{pérdida humos1 (aire)}} = M_{\text{aire}} * C_{e \text{ aire}} * ((0,5 * T_f) - T_{\text{ambiente}})$$

$$E_{\text{pérdida humos2 (biomasa quemada)}} = M_{\text{quemada}} * C_{e \text{ humos promedio 1}} * ((0,5 * T_f) - T_a)$$

$$E_{\text{p.h.3(volátiles)}} = M_{\text{volátiles}} * ((0,5 * T_f) - T_a) * (((100-xv) * C_{e \text{ hp2}}/100) + (xv * C_{e \text{ CO}_2}/100))$$

$$E_{\text{pérdida humos total}} = E_{\text{pérdida humos 1}} + E_{\text{pérdida humos 2}} + E_{\text{perdida .humos.3}}$$

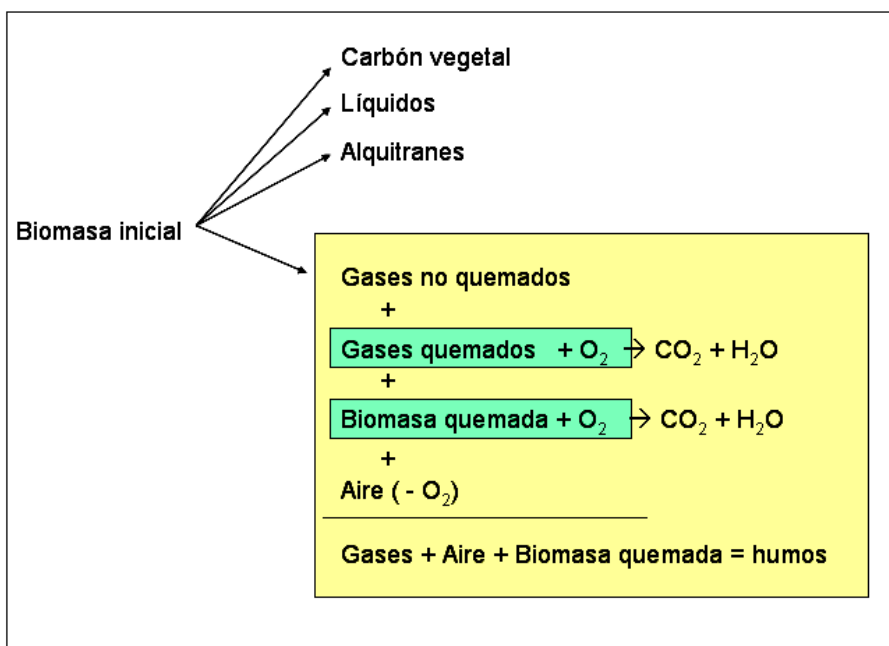


Figura 5.20. Composición de los humos.

5.2.2.8.Desarrollo de la chimenea del horno

$$Caudal\ de\ humos = M_{humos} / t$$

El caudal de humos que produce el horno es pequeño y las chimeneas que se suelen construir son suficientes y sobredimensionadas para que con una temperatura mínima de los humos de la base de la chimenea (algo mayor que la temperatura ambiente) funcione correctamente y se produzca el ascenso de los humos.

A continuación se ofrece el desarrollo de una chimenea convencional

$$Q = C * A * (2 * g * H * (T_i - T_e) / T_i)^{0,5}$$

$$Flujo\ mástico = Q * \rho$$

Q = Caudal volumétrico de humo en la chimenea (m³ / s)

A = Área de la sección transversal del conducto (m²)

C = Coeficiente de descarga (0,65/0,7)

H = altura de la chimenea (en este caso 2 m)

T_i = Media de la temperatura de los humos (K)

T_e = Temperatura externa ambiente (K)

ρ = densidad humos (Kg. / m³)

Siguiendo la siguiente fórmula se muestra el resumen que corrobora lo anterior.

Tº humos	100	150	200	250	300	350	400	Radio
Flujo mástico (Kg/s)	0,019	0,023	0,026	0,028	0,030	0,031	0,032	0,05
	0,077	0,093	0,104	0,112	0,119	0,124	0,128	0,1
	0,173	0,210	0,235	0,253	0,267	0,279	0,288	0,15
	0,307	0,373	0,417	0,450	0,475	0,495	0,512	0,2
	0,480	0,582	0,652	0,703	0,742	0,774	0,800	0,25
	0,692	0,839	0,938	1,012	1,069	1,114	1,152	0,3

Tabla 5.12.. Flujo mástico de la chimenea en función de la temperatura de salida de humos y del radio de la chimenea.

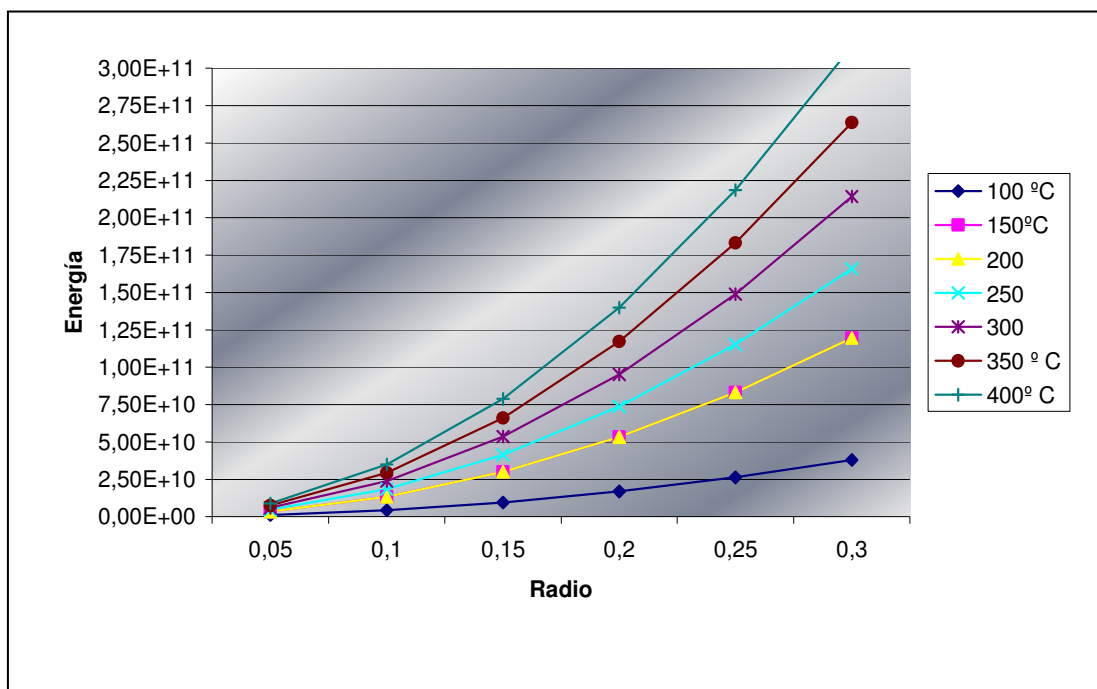


Figura 5.21. Energía pérdida por los humos en función del Radio y de la Temperatura de salida del horno de los humos.

El volumen teórico que puede condensarse es considerable y consiste principalmente en agua sin valor. De 100 m³ de madera (un horno Casamance grande) pueden producirse alrededor de 21 Tn de condensado, que implicaría alrededor de un centenar de tambores de gasóleo para contenerlo. El condensado es en su mayor parte agua sin uso, que es corrosiva y contamina el medio ambiente debido a su contenido de ácido acético y ácidos relacionados. Pueden cosecharse alrededor de 2 Tn de alquitrán, que llenarían alrededor de 10 tambores, suponiendo que nada de él se quema en su camino hacia la chimenea.

Es esencial, permitir que toda el agua y las sustancias ácidas pasen por la chimenea, como vapor, y escapen en el aire en la forma normal. La dilución en la atmósfera reduce sus efectos contaminantes e irritantes, lo que se obtiene manteniendo caliente la chimenea y evitando los vientos fríos. Se pierde parte del alquitrán, pero es inevitable en un método tan sencillo; de otro modo, el hoyo recolector desbordaría de condensado y el área se contaminaría seriamente. En los lugares donde las condiciones de funcionamiento atmosféricas frías dan origen a una excesiva condensación de agua, debe aislarse la parte inferior de la chimenea, o se debe construir una chimenea de ladrillos. Si se mantiene caliente la chimenea, p. ej. a 100 °C se asegura una succión continua, por lo que los gases circulan correctamente en el horno y la carbonización será buena, y el alquitrán aún así se condensará.

5.2.2.9. Cálculo de pérdidas por el escape de gases

Este dato es una parte de las pérdidas por humos. Para obtener el total de la energía perdida a través del escape de gases habría que sumar la energía perdida por el aire y por el vapor de agua. Sirve como verificación parcial del dato obtenido en el apartado 5.2.2.7. Además este cálculo se ciñe sólo a la biomasa en forma de madera.

Teniendo en cuenta las emisiones de gases que nos facilitan en [27] en el que se hace referencia al grado de contaminación que provoca el ciclo de pirolisis y la siguiente combustión de carbón vegetal en un quemador. Esta contaminación se mide en gramos equivalentes de CO₂. Por ejemplo el efecto de cada gramo de metano en el calentamiento global es 21 veces el de 1 gramo de CO₂. A continuación se calculan la equivalencia en emisiones de CO₂ del conjunto de gases.

$$CO_2 \text{ pirolisis} = 0.234 * M_{total}$$

$$CH_4 \text{ pirolisis} = 0.367 * M_{total}$$

$$CO \text{ pirolisis} = 0.112 * M_{total}$$

$$NMHC \text{ pirolisis} = 0.034 * M_{total}$$

$$Aerosol \text{ pirolisis} = 0.0022 * M_{total}$$

$$CO_2 \text{ combustión} = 0.353 * M_{total}$$

$$CH_4 \text{ combustión} = 0.064 * M_{total}$$

$$CO \text{ combustión} = 0.09 * M_{total}$$

$$NMHC \text{ combustión} = 0.015 * M_{total}$$

$$Aerosol \text{ combustión} = 0.0007 * M_{total}$$

La suma de todos estos términos nos da el grado de contaminación en emisiones equivalentes de CO₂. Asimismo, en el gráfico también se ofrece una estimación de las pérdidas de trozos finos de carbón vegetal (carbonilla) por manipulación y transporte.

$$Perdidas \text{ en finos} = 0.1 * M_{total}$$

En cualquier caso esta información anterior nos facilita información valiosa, pero lo que buscamos en este apartado es la energía desprendida en estas emisiones, como se detalla a continuación.

$$Q_{CO_2} = ((0.234 * M) + (0.353 * M_{quemada})) * ((T_f * 0.4) - T_a) * (1-f) * Ce_{CO_2} / (1+hum)$$

$$Q_{CH_4} = ((0.017 * M) + (0.003 * M_{quemada})) * ((T_f * 0.4) - T_a) * (1-f) * Ce_{CH_4} / (1+hum)$$

$$Q_{CO} = ((0.056 * M) + (0.045 * M_{quemada})) * ((T_f * 0.4) - T_a) * (1-f) * Ce_{CO} / (1+hum)$$

$$E_{\text{pérdidas gases}} = (M_{\text{humedad}} * Ce_{H_2O} * ((100) - T_0) * (1 - f)) + (Q_{CO_2}) + (Q_{CH_4}) + (Q_{CO})$$

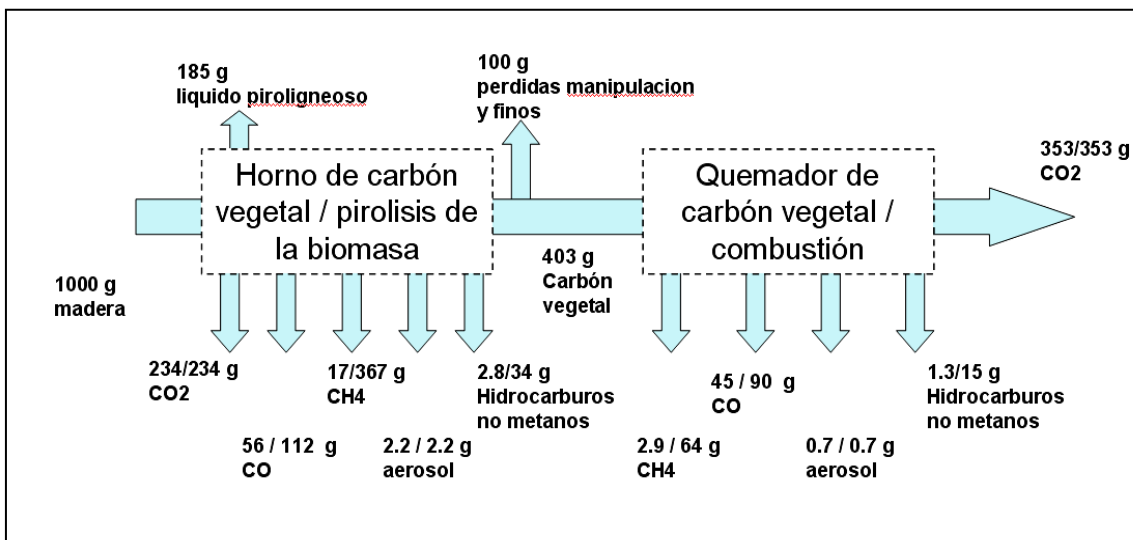


Figura 5.22. Emisión de gramos equivalentes de CO en la pirólisis de la biomasa y su posterior combustión en un quemador.

5.2.3. Calor total necesario para llevar a cabo el ciclo de carbonización en condiciones reales.

$$E_{total} = Q_{carbonización} + E_{pérdidas\ totales\ horno}$$

$$E_{total} = (Q_1 + Q_2) + (E_{cubierta\ exterior} + E_{suelo} + E_{humos})$$

Q_1 = Calor de carbonización y secado de la madera hasta 167 °C

Q_2 = Calor de carbonización de 167 °C hasta T_f

$E_{cubierta\ exterior}$ = Pérdidas por la superficie esférica exterior del horno

E_{suelo} = Pérdidas por la superficie inferior del horno

E_{humos} = Pérdidas por el calor expulsado al exterior a través de los humos

5.3. Cálculos económicos locales en el tercer mundo

5.3.1. Generalidades

La parva es práctica en zonas agrícolas, donde las fuentes de leña pueden hallarse dispersas, y es deseable hacer el carbón vegetal cerca de los pueblos u otros emplazamientos permanentes.

La leña que será carbonizada en una parva puede también ser juntada sin apuro durante un lapso de meses, apilada en posición, haciendo que se seque bien antes de tapar y quemar. Ello va de acuerdo con la manera de vivir de un pequeño agricultor, quien puede juntar pedazos de madera, ramas y trazas y apilarlos con cuidado para formar el montón. Al cabo de algunos meses, según la estación, según los precios del carbón vegetal etc., recubre el montón con tierra y quema el carbón. Genera de esta manera un pequeño ingreso en efectivo, sin tener necesidad de un gasto inicial en moneda.

La fabricación de carbón vegetal es a menudo una actividad estacional. La estación de lluvias puede interrumpir las operaciones, o la mano de obra puede, por tradición ser empleada en ciertas épocas en prácticas agrícolas de cosecha o de plantación. Ello puede crear dificultades en atraer y retener la mano de obra bien entrenada y motivada, pero los buenos resultados dependen de equipos de trabajo estable y afirmado. Por lo tanto, es importante tratar de desarrollar un régimen estable de trabajo en la producción de carbón vegetal. Esta es una característica de toda operación carbonera exitosa en gran escala. [16]

5.3.2. Análisis 1: Tanzania en 1990.

La mano de obra es con mucho el mayor input en la producción de carbón, mientras que el equipo implica muy bajo desembolso, el cual en su vida útil resulta despreciable. Asumiendo un coste nulo de la mano de obra y materia prima gratuita, en 1993 un hogar obtenía de media una renta de 177 \$ / año de la producción de carbón vegetal a lo largo de la autopista que une Dar-es-Salaam y Morogoro. El margen comercial es probablemente la razón para que en el 54 % de los hogares la producción de carbón sea la principal actividad generadora de ingresos. En algunas áreas de esta región costera los granjeros cortan árboles de anacardos para fabricar carbón vegetal debido a que los ingresos provenientes de la industria del carbón son más altos [34].

Capacidad de las bolsas de carbón = 29 Kg.

Precio de la bolsa de carbón = 2 \$

Nº bolsas = M carbón vegetal / 29 Kg

Ingresos del horno = M carbón vegetal (Kg) * 2 (\$/bolsa) / 29 (Kg/bolsa)

$$\text{Coste}_{\text{herramientas}} = 20.5 \text{ \$}$$

Se deben renovar cada 5 años

$$\text{Sueldo diario persona} = 1,67 \text{ \$}$$

$$\text{Jornales}_{\text{mano de obra de recolección}} / \text{Kg}_{\text{carbón vegetal}} = 54 / 1280$$

$$\text{Jornales}_{\text{mano de obra del resto de trabajo}} / \text{Kg}_{\text{carbón vegetal}} = 46 / 1280$$

$$\text{Coste}_{\text{Mano de obra del horno}} = M_{\text{carbón vegetal}} * 100 / 1280$$

$$\text{Coste}_{\text{biomasa}} = 1 (\text{\$/bolsa}) * N^{\circ} \text{ bolsas}$$

$$\text{Coste}_{\text{chimenea}} = 200 \text{ \$} / (n * (1 + 0.05)^{10})$$

Se utiliza el coste en el año 2000 y se anualiza de manera inversa con un 5 % para n usos.

$$\text{Margen (\%)} = (I - C_{\text{biomasa}} - C_{\text{mano de obra}} - C_{\text{herramientas}} - C_{\text{chimenea}}) * 100 / I$$

5.3.3. Análisis 2. Senegal

Este es un caso de un horno Casamance ubicado en la región de África donde fueron desarrollados este tipo de hornos

$$\text{Coste}_{\text{leña}} = 550 * \text{Volumen}_{\text{horno}}$$

$$\text{Coste}_{\text{mano de obra}} = 770 * ((16 + (d/24)) / 24$$

$$\text{Coste}_{\text{carga de camiones}} = 0,25 * M_{\text{carbón vegetal}}$$

$$\text{Coste}_{\text{transporte y descarga}} = 1,05 * M_{\text{carbón vegetal}}$$

$$\text{Otros costes} = 4 * M_{\text{carbón vegetal}}$$

$$\text{Coste}_{\text{chimenea}} = 40000 F / n$$

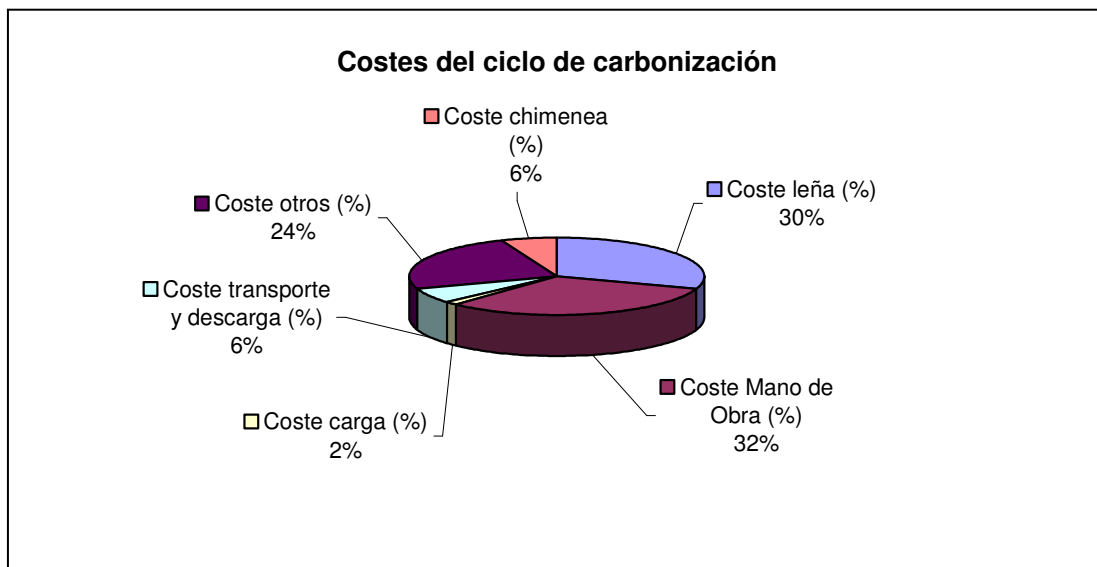


Figura 5.23. Costes del ciclo de carbonización para un horno Casamance de Senegal con madera de pino.

En la figura 5.23. se puede apreciar lo relatado en el punto anterior, la mano de obra y el coste la leña suponen los input más importantes. Si estos dos costes se consideran nulos debido a que la mano de obra es exclusiva del carbonero y a que la materia prima es recolectada en zonas comunales los costes se ven reducidos en un 60 %.

“Otros costes” incluyen impuestos, imprevistos y gastos de almacenamiento de madera y carbón.

$$C.u.(F/Kg) = (C_{leña} + C_{mano\ de\ obra} + C_{carga} + C_{Transporte} + C_{descarga} + C_{otros} + C_{chimenea}) / M_{carbón}$$

$$Transporte (mercado de Dakar) = 8 F$$

$$Transporte (mercado de Ziguinchor) = 1,81$$

$$Precio (Dakar) = 22,5 F / Kg.$$

$$Precio (Ziguinchor) = 20 F / Kg.$$

$$Margen (\%) = (Precio\ mercado - C.\ unitario - Transporte) * 100 / Precio\ mercado$$

5.3.4. Estudio en horno de ladrillos de arcilla en monte de sabana para rendimientos de 40 m³ / ha.

A continuación se muestran los datos para otro tipo de horno distinto al de parvas. Se puede apreciar como los costes no varían sustancialmente y los porcentajes relativos se mantienen aproximadamente. Seguimos teniendo un 69 % en costes de mano de obra y de cosecha de madera.

Costo de la madera al costado del horno (incluye costes financieros)	60 %
Costo de la mano de obra en el horno (incluye carga y descarga)	9 %
Costo del capital de trabajo	3,5 %
Costos fijos de las inversiones de los pozos, hornos o retortas	1,5 %
Costos de transporte del carbón vegetal a los puntos de distribución)	26 %

Tabla 5.13. Costes asociados a la producción de carbón vegetal.

Es evidente también la importancia de los costes de transporte.

No debe olvidarse que la fabricación de carbón requiere otras materias primas auxiliares. Los hornos necesitan arcilla para sellar y para hacer un barro viscoso para el enfriamiento, y ladrillos, que deberán hacerse en lo posible cerca del sitio de fabricación del carbón vegetal.

Las fosas de tierra y las parvas requieren tierra de textura adecuada y grandes cantidades de paja, hojas y ramas.

Los hornos metálicos requieren arena, soldaduras a gas, elementos para cortar y reparar las planchas metálicas.

Todos los procesos de carbón vegetal necesitan agua para enfriamiento, para apagar el fuego y para preparar el barro viscoso con arcilla. Sobre todo, el proceso requiere globalmente en la actualidad una cierta cantidad de combustibles líquidos para el cultivo y cosecha de la madera, para el transporte de la madera y del carbón, y para el transporte vario del personal y del equipo auxiliar. Lo anterior es fundamental para el éxito de la operación carbón vegetal. Otros elementos que no pueden ser olvidados son los alimentos, las viviendas y otras infraestructuras para los obreros, y la provisión de forraje, cuando se usan animales de trabajo para el transporte. Si el carbón vegetal no se manipulea suelto, deberán agregarse los costos de empaquetado [16].

5.4. Parámetros de salida

A través de una hoja Excel se extraen los siguientes datos en cada cálculo de MatLab ®.

- Energía de secado (hasta 167°C): Aumento de T^a de la madera y evaporización de la humedad.
- Energía necesaria para alcanzar la temperatura de carbonización. (desde 167°C) y llevar a cabo el proceso de pirolisis.
- Dimensiones del horno.
- Pérdidas de energía por convección y conducción y pérdidas de energía a través de los humos.
- Madera consumida necesaria para llevar a cabo el proceso.
- Fracción de volátiles quemados.
- Cantidad de carbón vegetal, líquidos, gases y alquitranes obtenidos.
- Cantidad de gases obtenidos (metano, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono).
- Cantidad de líquidos obtenidos (ácido acético, metanol, acetonas, alquitranes solubles, alquitranes insolubles).
- Eficiencia energética (con y sin recuperación de gases).
- Grado de contaminación (con y sin recuperación de gases) en Kg. equivalentes de CO_2 .
- Deforestación (para el caso del pino).
- Rentabilidad del horno en distintos escenarios.
- Mano de obra necesaria.
- Población abastecida con el horno.

Así mismo se obtiene una gráfica en MatLab ® con los flujos de calor para los diferentes modelos.

Utilidad de este modelo

Partiendo del código base este modelo permite variar los parámetros incluidos y obtener los resultados correspondientes para cada estudio.

Se pueden jugar con las características del horno y la chimenea, el tipo de biomasa y sus propiedades físico-químicas, la relación de volátiles / biomasa quemados, las circunstancias climáticas de cada región (viento,...),... El estudio económico hace

referencia a dos casos muy concreto pero en la realidad la estructura económica de cada región variará en función de los precios de las materias primas, los costes de mano de obra, la variación de los costes indirectos como el transporte, la demanda de carbón, y la posible existencia de competencia por parte de otro tipo de energía.

Así mismo este modelo ofrece la posibilidad de verificar hipótesis teóricas del comportamiento del calor de devolatilización de cada tipo de biomasa con datos de resultados experimentales.

Hay tres archivos de MatLab para cada tipo de biomasa. En la ejecución del comando se incluyen la masa y porcentaje en tanto por uno de la recirculación de volátiles. Dentro del código se tiene que incluir en la función `xlswrite` el nombre del archivo excel y de sus hojas de cálculo dónde se van a extraer los datos de manera automática. Por ejemplo:

```
xlswrite ('nombre del archivo.xls', Ao, 'nombre de la hoja', 'A2')
```

```
xlswrite('nombre del archivo.xls', B, 'nombre de la hoja', 'A1')
```

6. Resultados obtenidos de la ejecución del programa.

Estos resultados corresponden a 4 pruebas con madera de pino con 2 tamaños del horno (10 y 100 m³) y 2 factores de recirculación (horno tradicional sin mejoras y horno Casamance con un 30 % de recirculación de volátiles.

6.1. Influencia de la mejora del proceso

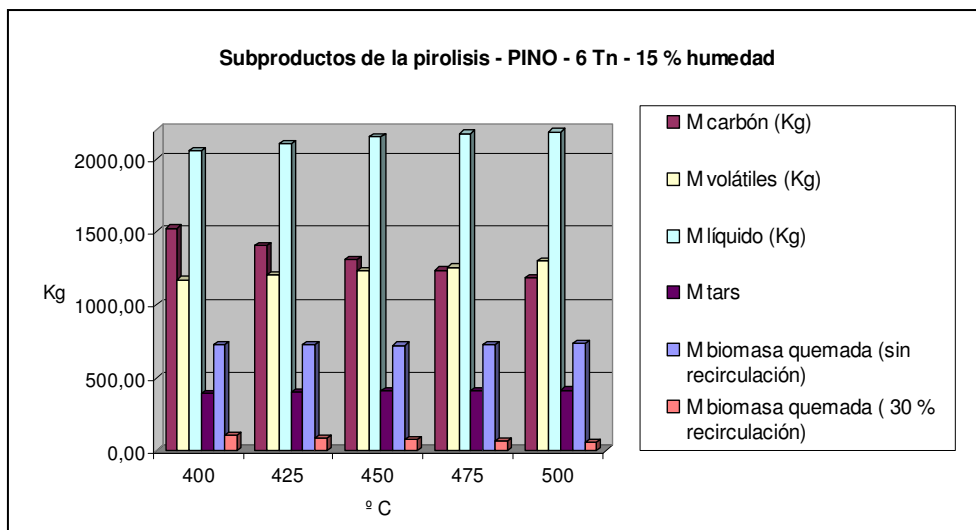


Figura 6.1. Subproductos de la pirólisis para un horno de 6 Tn de madera de pino con un 15 % de humedad en base seca. Así mismo se muestra el consumo de madera para aportar la energía necesaria a la carbonización en 2 escenarios. El primero sin recirculación de gases y el segundo con recirculación y combustión parcial de los volátiles.

Como se puede apreciar en el gráfico superior 6.1. el consumo de biomasa quemada disminuye drásticamente si existen mejoras del proceso que favorezcan la recirculación de volátiles dentro de un horno.

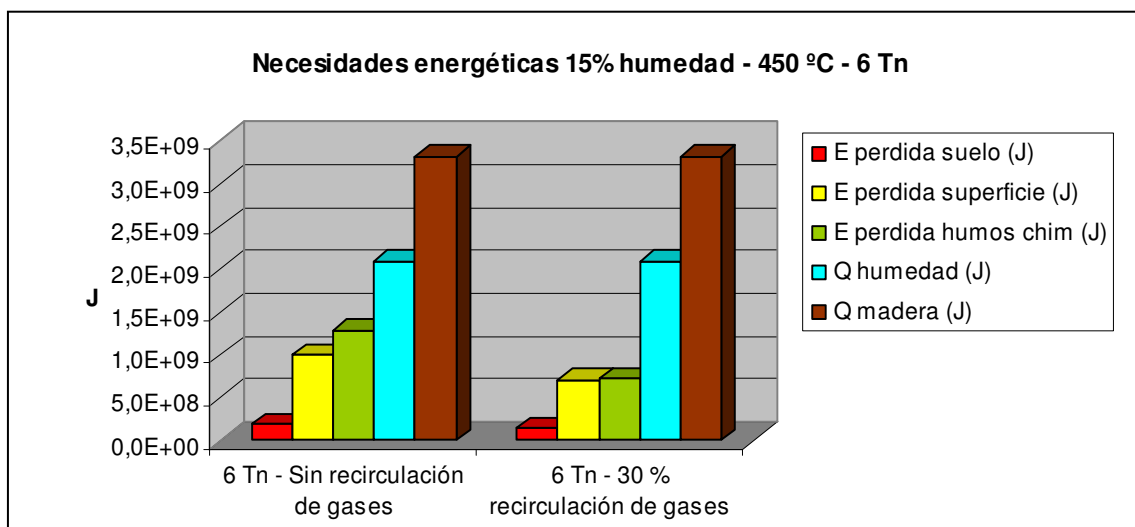


Figura 6.2. Conceptos energéticos del proceso de pirólisis para hornos de 10 m³.

Si el calor necesario sólo lo aporta la combustión de biomasa esto suele provocar que se pierda entre un 10 y un 15 % de la biomasa para este fin con la consiguiente reducción del rendimiento de carbón vegetal entre un 2 y un 4 %.

Se puede observar en la figura 6.2. como la recirculación de gases y la mejor distribución del horno afecta principalmente a las pérdidas en la superficie exterior del horno y al escape de calor a través de los humos. En ambas se nota una disminución importante. Las primeras pérdidas son menores debido principalmente a que dependen del tiempo de exposición de la cubierta a las condiciones climáticas. Cuando el proceso se acelera, por ejemplo al utilizar un horno Casamance con su correspondiente chimenea, la eficiencia aumenta.

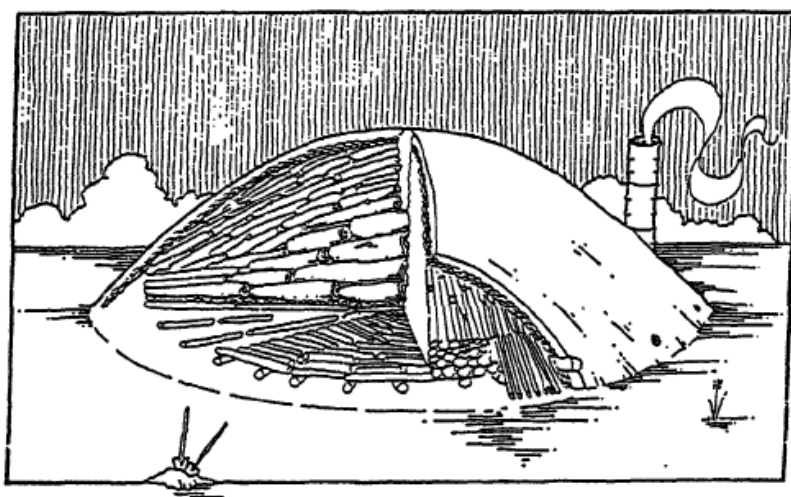


Figura 6.3.. Horno Casamance

Cuando hay recirculación y combustión de volátiles se favorece un menor consumo de biomasa y una menor introducción de aire al interior para llevar a cabo la combustión por lo que la emisión de humos disminuye, con lo que el calor emitido al exterior es menor. Este efecto es más notable en tamaños grandes dónde la reducción del ciclo es mucho más acusada. (figura 6.4.)

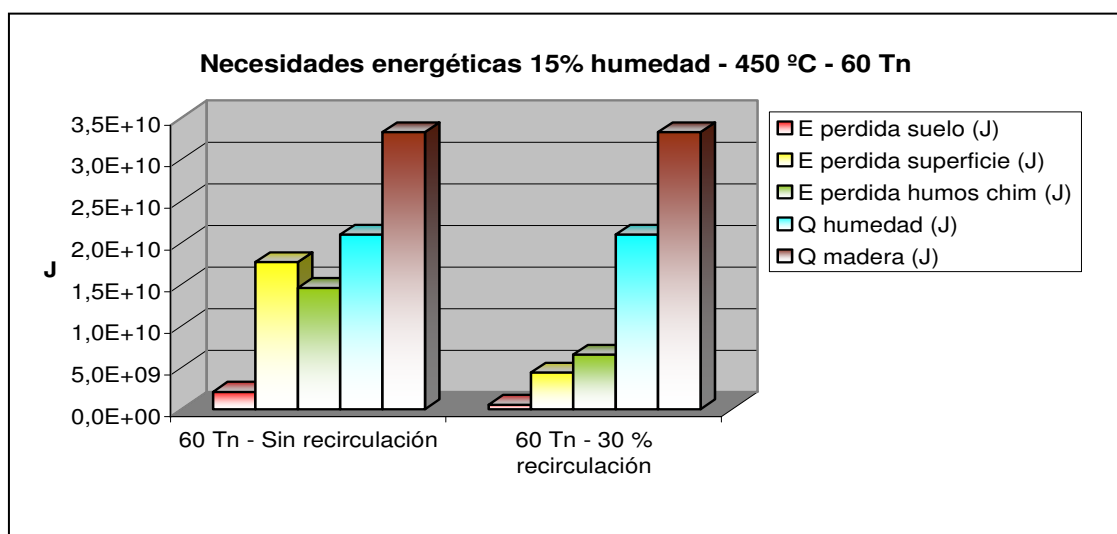


Figura 6.4.. Conceptos energéticos del proceso de pirolisis para hornos de 100 m³ de madera de pino.

Como se indica en apartados anteriores las dimensiones habituales de la chimenea de un horno Casamance (se suelen utilizar bidones metálicos) son sobradamente suficientes para expulsar los humos derivados de la carbonización y sólo es necesario que la temperatura en la base de la chimenea sea superior al punto de evaporación del agua para evitar condensaciones. (figura 6.5.)

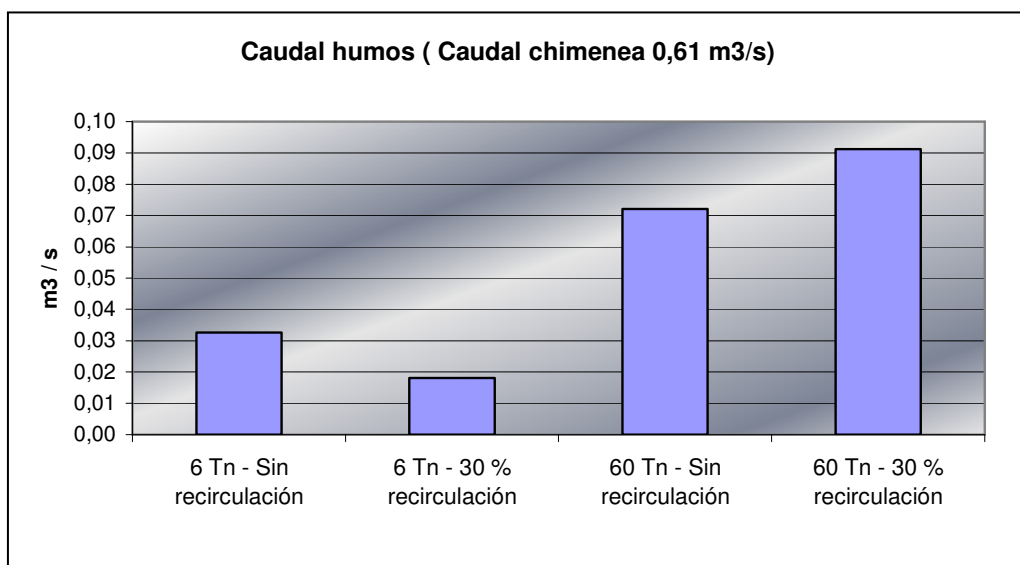


Figura 6.5. Caudal de humos para diferentes características de un horno de parvas.

En resumen, la mejora del proceso de carbonización tiene 2 efectos simultáneos: menor consumo de biomasa para aporte energético y menores pérdidas de energía emitidas al exterior. Para la madera de pino este aumento de eficiencia se traduce en un aumento del rendimiento de carbón en un 4 %, inferior a lo indicado en los artículos de investigación. En cualquier caso la modelización de la recirculación de los volátiles es compleja, por lo que se requiere llevar a cabo estudios experimentales con una alta fiabilidad.

A esto hay que sumarle una reducción considerable en la contaminación. El contenido de carbono de la madera y del carbón son 50 y 90 % respectivamente. Por lo tanto:

- 1000 Kg. de madera son 500 Kg. de carbono
- 250 Kg. de carbón vegetal son 225 Kg. de carbono (horno mejorado)
- 150 Kg. de carbón vegetal son 135 Kg. de carbono (horno deficiente)

Cuando se carboniza una tonelada de madera, se liberan a 365 Kg. de CO₂ con una técnica deficiente, mientras que con una técnica mejorada sólo 275 Kg. Se impide la emisión de 90 Kg. de carbono o 1,1 Tn de de CO₂ por tonelada de carbón vegetal consumido.

La principal ventaja de las técnicas de carbonización mejoradas (horno de ladrillos, hornos metálicos,...) es que los procesos de carbonización son más fáciles de conducir y controlar que en los hornos de parvas. Sin embargo la literatura muestra que cuando se opera en las mismas condiciones técnicas y socio-económicos los hornos mejorados no proveen mejores resultados que los hornos de parvas.

Este hecho confirma que los buenos rendimientos de carbonización son obtenidos por productores de carbón que dominan la técnica. En este contexto los hornos mejorados dan resultados menos variables y carbón con rendimientos y calidades más constantes.

País	Tradicional	Casamance	Ganancia relativa
Senegal (tests)	15 - 20 %	20 - 30 %	40 %
Ruanda (tests)	14 %	19 - 25 %	75 %
Ruanda (sobre el terreno)	7 - 9 %	13 - 22 %	40 %
Jamaica 1 (tests)	15 - 17 %	17 %	5 %
Jamaica 2 (tests)	22 %	23 %	5 %
Ghana (tests)	22 %	25 %	15 %
Ghana (sobre el terreno)	17 %	20 %	15 %
Tanzania (tests)	19 %	23 %	20 %
Burundi (tests)	14 %	20 %	43 %

Figura 6.6. Comparativa de la eficiencia de carbón vegetal para hornos tradicionales frente a hornos Casamance.

Sin embargo a principal desventaja de los hornos mejorados es que requieren una inversión prohibitiva para los pequeños productores. Consecuentemente, desde un punto de vista técnico, simples desarrollos en los hornos de parvas (Hornos Casamance, cobertura metálica,...) requieren bajas inversiones, principalmente en equipo y materiales locales, que daría un valor añadido a la producción de carbón por parte de un sector informal (granjeros y productores de carbón a tiempo parcial, pequeños equipos de productores,...) que representa la mayor parte de producción de carbón en países del tercer mundo.

Discusión y conclusiones

El horno de parvas es una técnica de carbonización bien adaptada a las condiciones socioeconómicas en los países en desarrollo. Requiere baja inversión en equipos, es móvil, no necesita pesadas operaciones de descarga y permite una flexibilidad en el volumen de madera carbonizada. Además si un horno es operado por un productor habilidoso y bien preparado puede producir carbón con contenidos en carbono fijo superior al 70 % y rendimientos entre el 20 y el 30 % en base seca. En cualquier caso hay que tener en cuenta estas consideraciones:

- El horno Casamance supone un mejor control del proceso: mejor colocación de los troncos, mejor circulación de los gases calientes, y una supervisión más constante durante la fase de carbonización.
- Un control cuidadoso del pico de temperatura puede proporcionar producciones de carbón por encima del 50%. Sin embargo, estos materiales tienen un contenido en

materia volátil que supera el 35 %, y pueden desprender humos al arder. Consecuentemente la madera torrefactada no puede ser usada como un sustituto del carbón convencional. Si se desea obtener carbón convencional, se necesita un cuidadoso control del pico de temperatura en un horno sin que se supere un 35 % de rendimiento. [28-30]

- Pretratamientos térmicos, variaciones en el ratio de calentamiento o adiciones de ácidos catalizadores de Bronsted o Lewis no aumentan significativamente la producción de carbón.

En [7] también se indica que aditivos químicos como AlCl_3 , FeCl_3 , NH_4Cl , KOH y ZnCl_2 afectan suavemente a la primera etapa inhibiendo la descomposición de la hemicelulosa y acelerando la descomposición de la celulosa a través de la reacción de deshidratación. Sin embargo, el ácido fosfórico exhibe la mayor influencia en el proceso de pirolisis. Con concentraciones superiores al 30 % de H_3PO_4 , las 2 etapas de pérdida de masa se que se corresponden con la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa se superponen.

- Altos rendimientos de carbón son obtenidos cuando la pirolisis se produce a elevadas presiones. Mejoras adicionales se materializan cuando los vapores de pirolisis permanecen en el horno a la temperatura pico hasta que la pirolisis es completa.

El principal problema que se presenta es como aumentar la presión de manera sencilla y como aislar el recinto de pirolisis sin grandes instalaciones. Es necesario realizar el proceso con un carácter lo más anaerobio posible sin limitar la combustión de la otra parte de la biomasa.

6.2. Influencia de la humedad

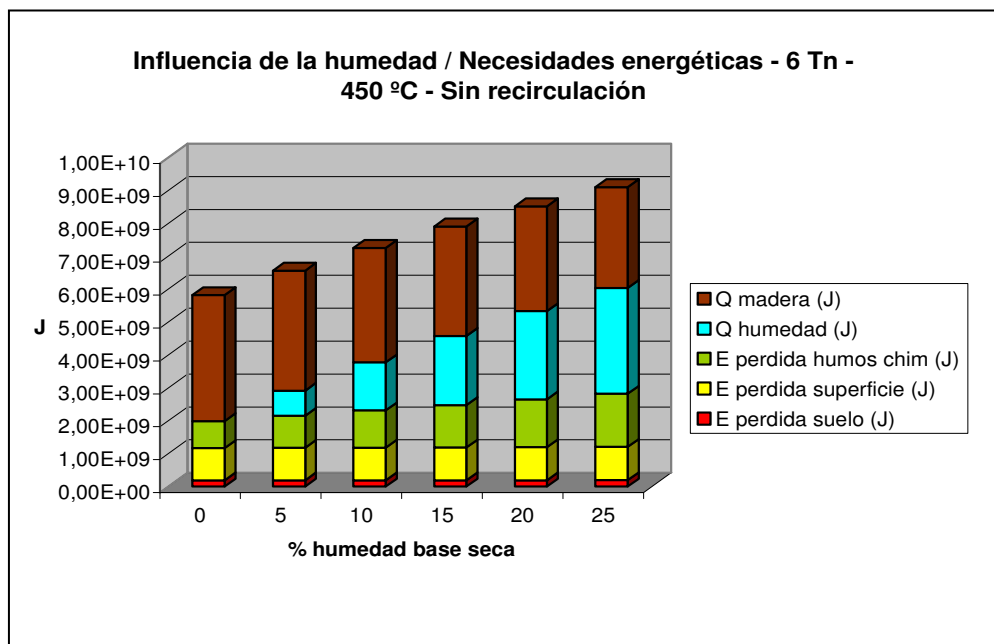


Figura 6.7.. Reparto de la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de carbonización en función de la humedad de la madera de pino en un horno de 6 Tn a una temperatura pico de 450 °C.

En las figuras 6.7 y 6.8. se observa la importancia relativa que puede tener el secado de la humedad dentro del reparto de energía para llevar a cabo el ciclo de carbonización. Alcanzando un 30 % de la aportación energética para un 25 % de humedad. Dentro del gráfico de entalpías de la celulosa, hemicelulosa y lignina del apartado 5.2.1.2. se observa como el intervalo entre 0 y 150 °C tiene un fuerte carácter endotérmico.

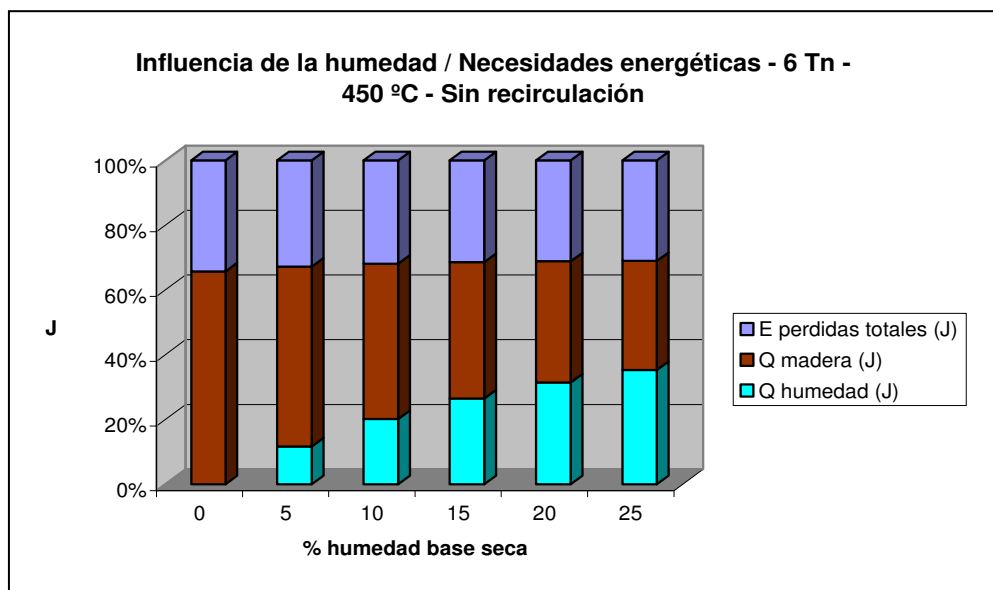


Figura 6.8.. Reparto de la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de carbonización en función de la humedad de la madera de pino en un horno de 6 Tn a una temperatura pico de 450 °C.

Así mismo, en uno de los experimentos realizados en [31] en 8 tipos de biomásas, se observa que la duración de la carbonización es proporcional al ratio de humedad. Esto provoca que las pérdidas emitidas al exterior aumenten. Así mismo el tiempo de carbonización también depende del diámetro y talla de los troncos. (Tabla 6.1.)

	$\Phi < 10 \text{ cm}$	$10 < \Phi < 20 \text{ cm}$	$\Phi > 20 \text{ cm}$
Masa de carbón obtenido (Kg)	74	122	128
Tiempo de carbonización (h)	112	116	124
Rendimiento (%)	17,9	17,2	15,4

Tabla 6.1. . Ensayos con diferentes espesores de biomasa.

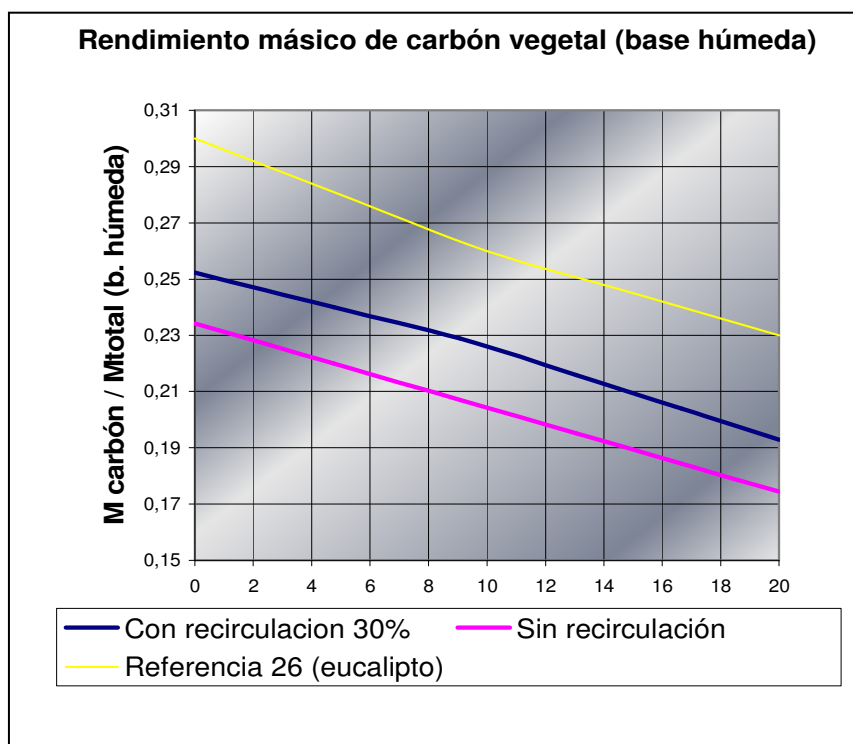


Figura 6.9.. Rendimiento del carbón vegetal en función del contenido de humedad de la biomasa.

Pese a que el dato bibliográfico hace referencia a otro tipo de madera, el eucalipto, se comprueba que para la madera de pino la pendiente de la curva es similar a la obtenida en el modelo. Aproximadamente por cada 10 % de reducción de humedad la eficiencia aumenta un 3,5 %. El máximo rendimiento que se puede obtener para madera de pino seca es un 25 %. (figura 6.9.)

Se concluye que si existe la relación lineal entre el rendimiento de carbón en base húmeda y el contenido de humedad también en base húmeda.

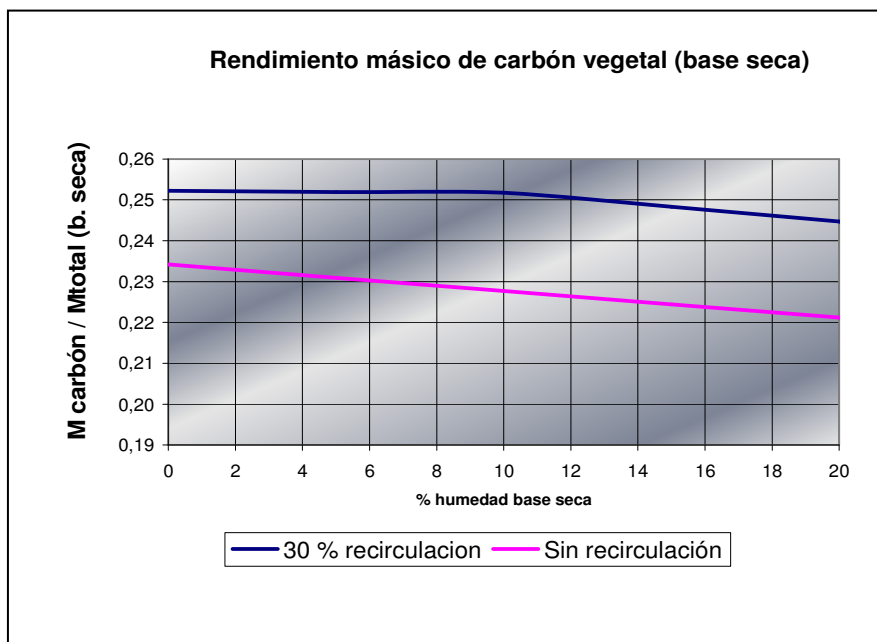


Figura 6.10. Rendimiento másico de carbón en base seca frente al aumento de % de humedad en base seca para madera de pino.

En la figura superior 6.10. se puede apreciar como el rendimiento de carbón en base seca descende en una pequeña proporción. Si la fuente de calor del proceso fuese externa este ratio no debería variar con el cambio de humedad, pero al quemar madera del propio horno para secar el resto se reduce este rendimiento. En el caso del horno mejorado se ve un quiebro en la curva que se debe al máximo de humedad que es posible eliminar con la combustión de los volátiles, en este caso a un 10 % de humedad.

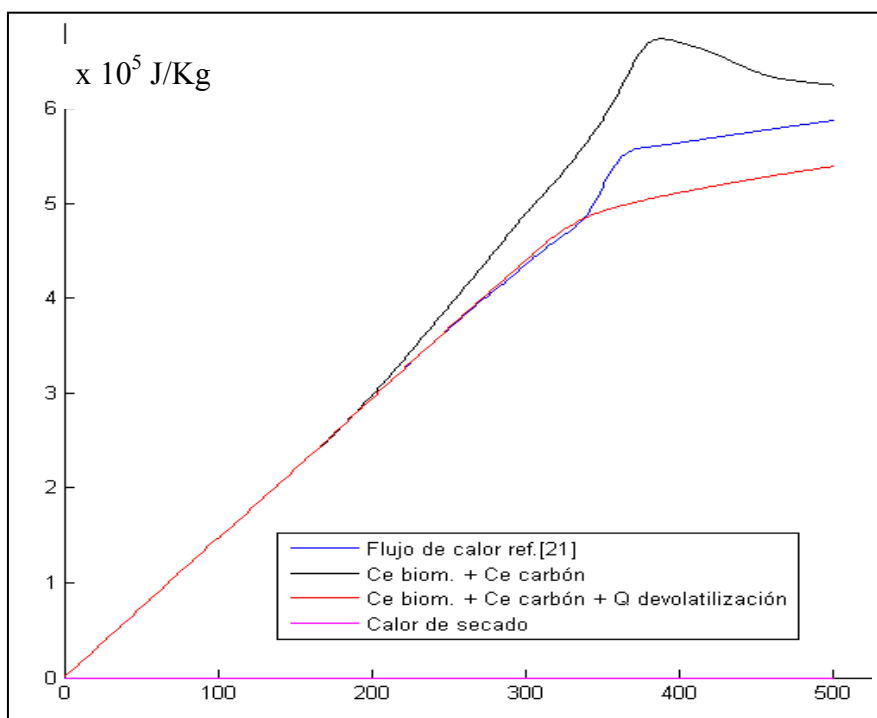


Figura 6.11. Flujo de calor(J/Kg) del proceso de carbonización de la madera de pino para un contenido de humedad nulo. El dato de [27] se ha modelizado siguiendo las indicaciones de este mismo artículo y las de la referencia [6]

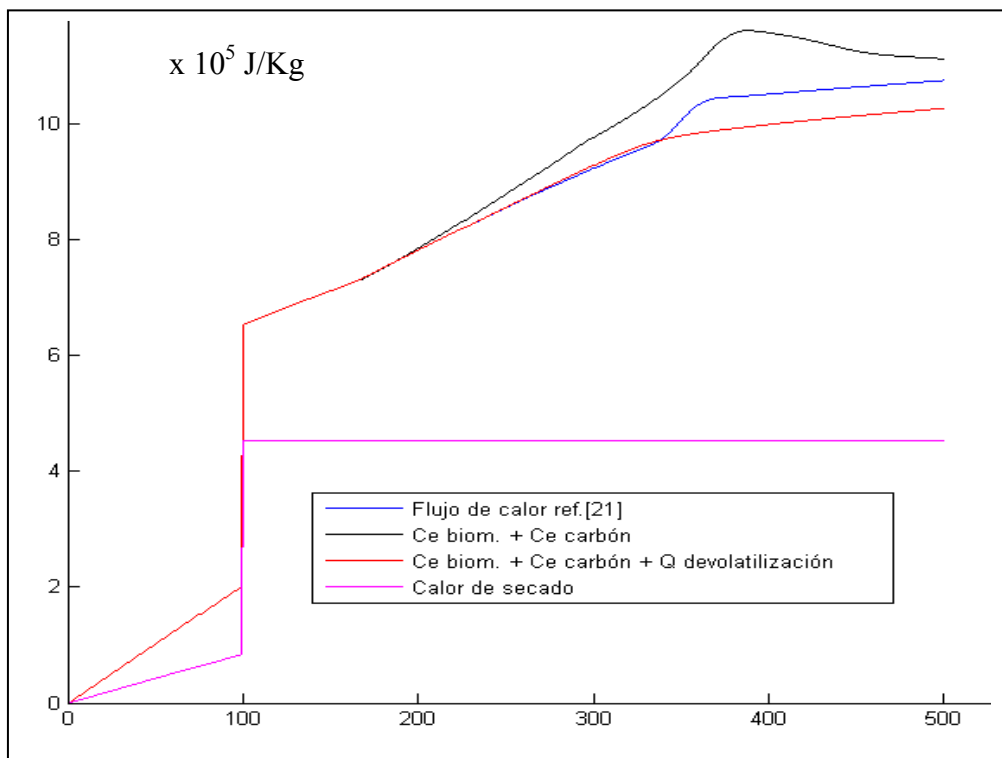


Figura 6.12. Flujo de calor (J/kg) del proceso de carbonización de la madera de pino para un contenido de humedad del 25 %. El dato de [21] se ha modelizado siguiendo las indicaciones de este mismo artículo y las de la referencia [6]

Como se aprecia en las figuras 6.11. y 6.12. (mínimo y máximo de humedad) el mayor aporte energético se dedica al cambio de fase del agua contenido en la biomasa.

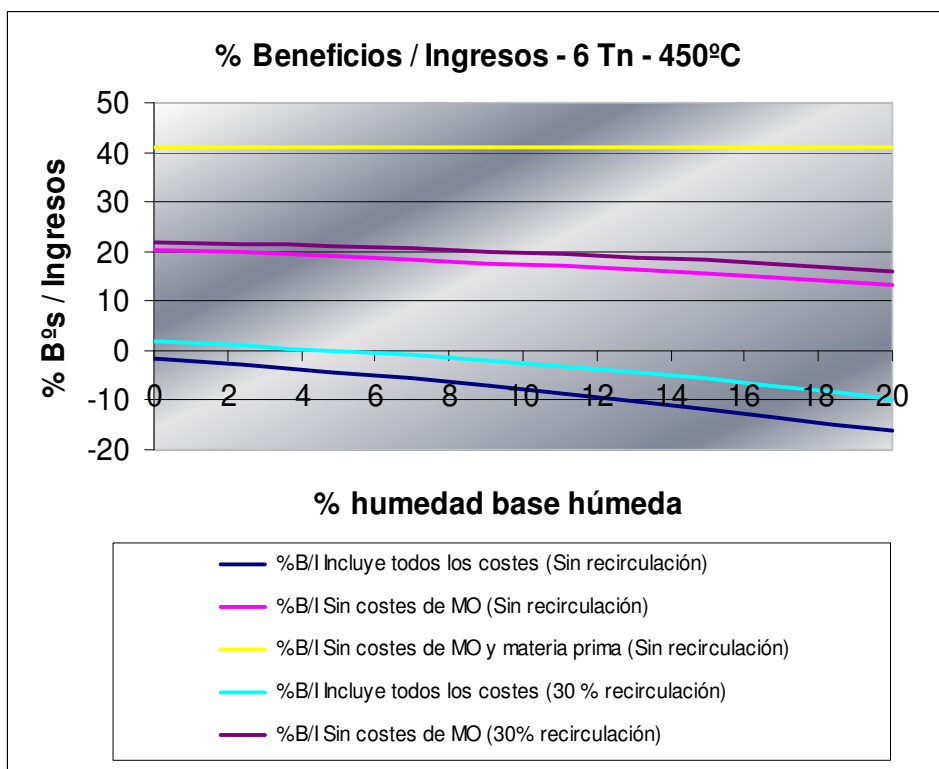


Figura 6.13. Indicador de Beneficios sobre ingresos para diferentes escenarios donde se asumen diferentes costes.

La figura 6.13. muestra como un buen secado puede ser crucial para que la producción de carbón vegetal sea rentable en el caso de que haya que pagar la mano de obra y la materia prima. En caso de que el trabajo se lleve a cabo por el productor y la materia prima se obtenga de manera gratuita mediante la recolección en bosques comunales el grado de humedad no será una cuestión tan importante pero si afectará a las rentas obtenidas.

Recomendaciones

Es muy importante realizar un esfuerzo para secar la madera antes de la carbonización ya que es fácilmente alcanzable. Para mejorar la eficiencia del horno, es necesario cortar y trocear la biomasa al menos 3 semanas antes del comienzo de la carbonización. Los troncos de madera no deben superar los 500 mm de largo ni los 200 mm de diámetro.

Durante el secado, se produce una pérdida de peso que hace más barato y más fácil el transporte. Una tonelada de madera con el 60% de contenido de humedad, después de su secado a un contenido del 30% de humedad, pesará sólo 812 Kg., con una pérdida de casi el 20%. También durante el secado algunas especies pueden deshacerse de la corteza, lo que es una ventaja puesto que la corteza sólo produce un carbón frágil, con elevado contenido de cenizas, y de bajo valor comercial. Durante el secado, la madera puede pudrirse y ser atacada por insectos; sucediendo rápidamente en los bosques tropicales húmedos. Por lo tanto, debe controlarse el tiempo del secado, para asegurar que se llegue al máximo y rápidamente, antes que la madera se deteriore.

Los troncos hay que apilarlos con cuidado y, si es posible, separados del suelo, sobre desperdicios de madera y en un lugar que reciba abundante sol y viento. Alrededor de 1 a 2 meses es, a menudo, al tiempo máximo disponible para el secado en un bosque tropical húmedo antes de que se produzcan graves daños. Hay que crear un stock en verano en previsión de la mayor humedad del invierno.

En los bosques del tipo seco, no son desconocidos los casos de períodos de secado de hasta un año con especies durables, pero deben ponderarse los beneficios del secado contra el capital inmovilizado por el stock en estacionamiento.

6.3. Influencia de las dimensiones del horno.

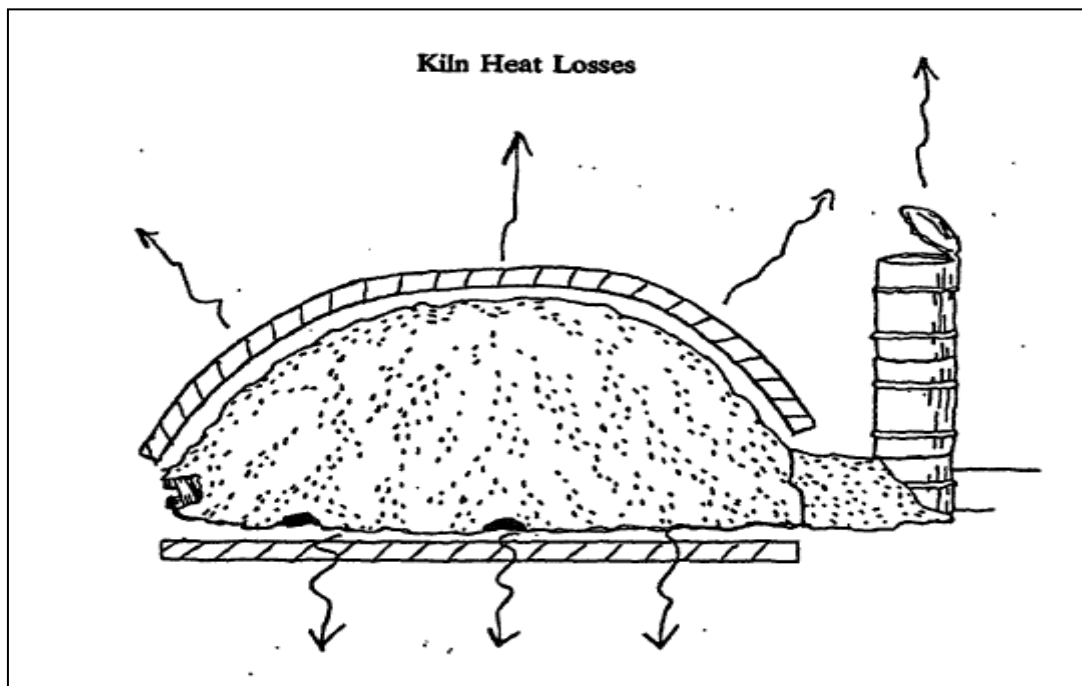


Figura 6.14. Tipos de pérdidas de un horno Casamance.

Como se puede apreciar en la figura 6.16. cuando el volumen aumenta 10 veces el diámetro se dobla. Las pérdidas que dependen de la superficie aumentan a un ritmo menor que el volumen, por lo que tenemos una cierta economía de escala. Esto es cierto para hornos con mejoras donde la diferencia del tiempo del ciclo de carbonización entre un horno pequeño y una grande es similar.

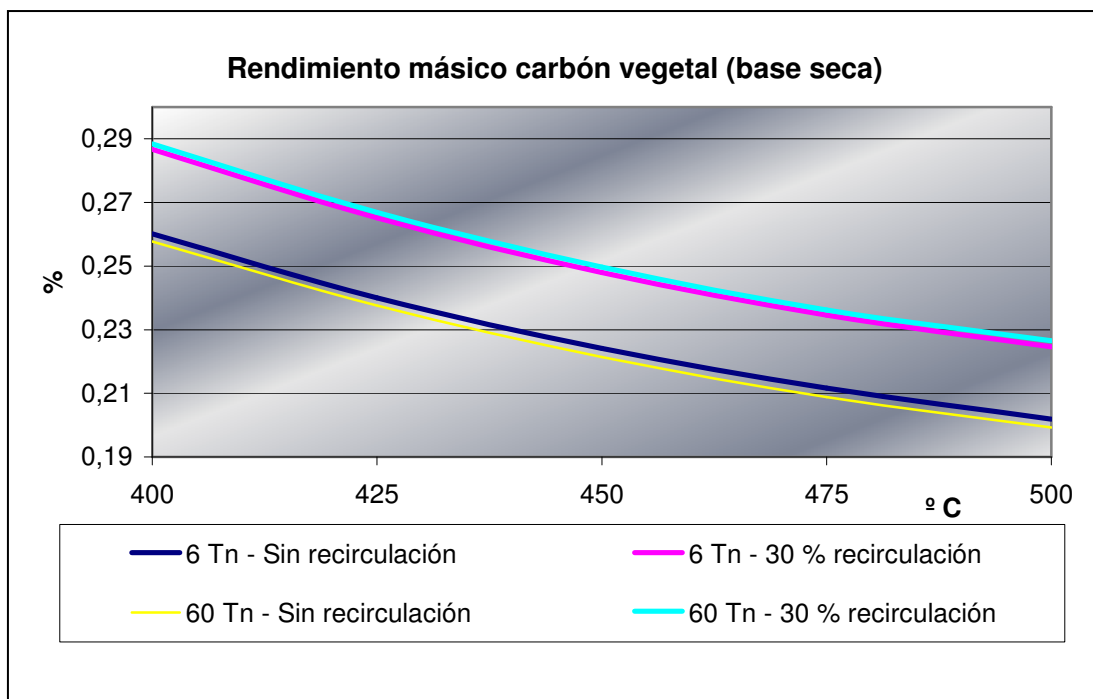


Figura 6.15. Rendimiento másico de carbón de pino en base seca para hornos de 6 y 60 Tn con o sin recirculación.

Para un horno tradicional no es así ya que los hornos grandes tienen ciclos muy largos que pueden llegar a las 3 semanas, por lo que la economía de escala se ve amortiguada por unas mayores pérdidas debido a que estas también dependen del tiempo. Como se puede apreciar en la figura superior 6.15. en la cual se aprecia una mejora de rendimiento mayor en los hornos de 60 Tn cuando hay recirculación que en los de 6Tn.

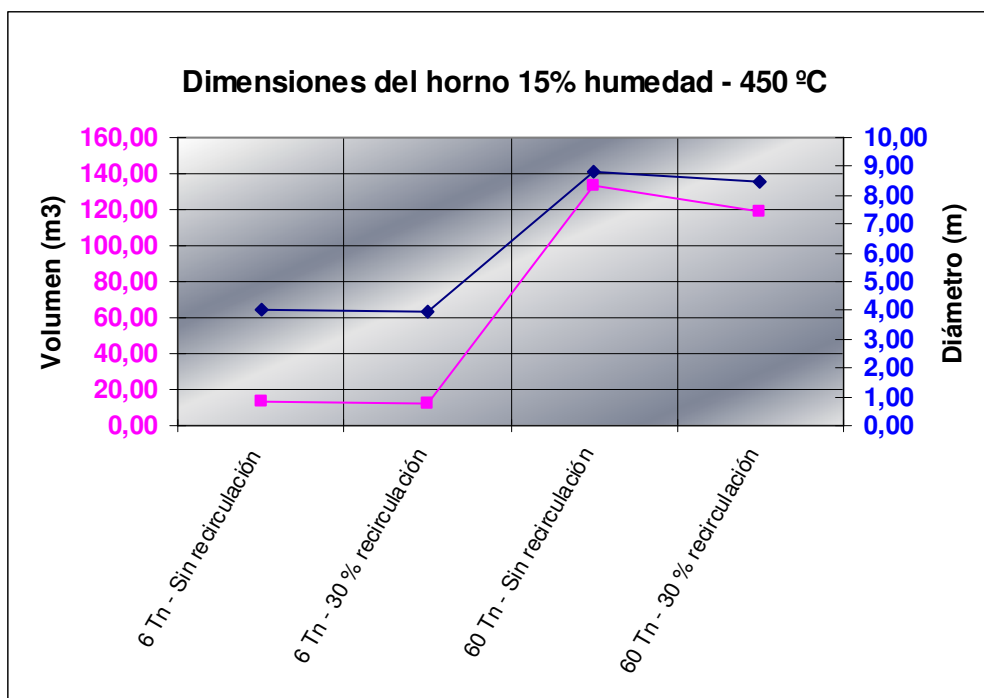


Figura 6.16 Volumen y diámetro de un horno de parvas en diferentes condiciones.

6.4. Influencia del tipo de biomasa

Los poderes caloríficos de los subproductos de la biomasa son función de la composición inicial de la biomasa. A la hora de plantar y cultivar se plantea crucial la elección de la especie para obtener mejores rendimientos energéticos y económicos. En caso de que la materia prima de la carbonización provenga de residuos será necesario valorarlo conjuntamente con su uso primario, probablemente alimenticio, para no crear efectos colaterales perjudiciales para la comunidad de que se trate. .

Como se puede observar en la tabla inferior el rendimiento de subproductos, su calidad y su poder calorífico varían ampliamente en función del tipo de biomasa. Existe una relación estable entre el contenido de lignina y los productos de carbonización de determinados combustibles.

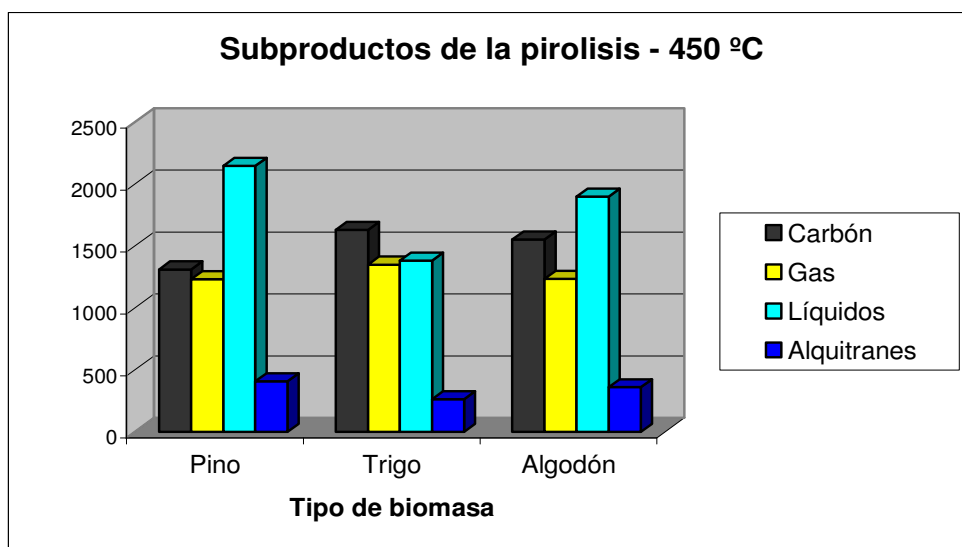


Figura 6.17. Subproductos de la carbonización de un horno de 6 Tn de pino a 450 °C.

Biomasa	Poder calórico superior (MJ/Kg)				Distribución de energía (%)		
	Biomasa	Carbón vegetal	Líquidos	Gas	Carbón vegetal	Líquidos	Gas
Corteza de coco	19,5	25	18,7	16,1	37,9	28,3	33,9
Mazorca de maíz	16,1	28,6	23,8	5,2	35,6	49,4	15
Cáscara de cacahuete	19,8	27,4	23,6	10	37,5	44,7	17,9
Cáscara de arroz	20	44,2	22,5	7,4	38,3	46,2	15,5
Madera	20	24,1	24,9	16,6	23,4	28,3	48,3

Tabla 6.2. Poder calorífico superior de la biomasa y de los productos de la pirólisis.

7. Conclusiones.

Partiendo de los objetivos marcados al inicio del proyecto y tras una extensa revisión del estado del arte de la producción de carbón, principalmente en países subdesarrollados, se ha llevado a cabo la modelización del funcionamiento de un horno de parvas. Este modelo ha permitido valorar la importancia de los factores que influyen en el proceso.

La dificultad principal encontrada ha sido la poca fiabilidad de los datos de estudios sobre el terreno en la literatura con el fin de poder verificar los resultados obtenidos en el programa. Se pueden encontrar valores relativos, por ejemplo, porcentajes de producción de carbón vegetal pero los valores absolutos son muy escasos, como puedan ser la cantidad de energía consumida en un horno, el reparto de pérdidas o las temperaturas en distintos puntos del horno. Aunque hay que tener en cuenta lo anterior, los datos de salida del modelo corresponden con datos bibliográficos de los experimentos sobre el terreno. Frente a esto, se plantea la necesidad de experimentar y extraer datos de especies de biomasa de la zona, así como la observación de los métodos de producción de carbón vegetal de la comunidad donde se vayan a implantar las mejoras.

Conclusiones técnicas

El modelo ha mostrado la importancia que tiene la humedad en el consumo de energía del horno. Las tareas de secado son relativamente fáciles de acometer y suponen una gran mejora. Para humedades del 25 %, el calor dedicado al secado de la humedad alcanza más del 30 % de la energía total del proceso. Se puede estimar que por cada disminución del 10 % de humedad en base húmeda se gana un 3,5 % de rendimiento en base húmeda. La posibilidad de que el productor obtenga mejores rentas pasa por que lleve a cabo actividades sencillas de secado previas al ciclo de carbonización.

Las mayores pérdidas se dan en la liberación de calor a través de los gases emitidos a la atmósfera y en las pérdidas por transferencia de calor a través de la superficie de la cubierta exterior. Las pérdidas de calor por conducción a través de la superficie inferior son mucho menores.

Las diferencias entre un horno tradicional y un horno Casamance son sustanciales. Si la recirculación y combustión de volátiles se estima en un 30 %, las pérdidas por la superficie inferior (suelo del horno) y la cubierta superior disminuyen un 28 % en ambos casos y un 43 % para las pérdidas de calor a través de los gases para un horno de 6 Tn.

El calor de humedad y el calor de carbonización de la biomasa (aumento de temperatura + calor de devolatilización) sería aproximadamente 2000 MJ y 3200 MJ respectivamente en ambos casos. Ahora bien, las pérdidas por conducción y convección a través de la cubierta superior, las pérdidas por conducción a través de la superficie del suelo y las pérdidas de calor a través de los gases liberados serían para el caso de un horno tradicional 900 MJ, 200 MJ y 1300 MJ respectivamente (2400 MJ en total). En el caso de un horno Casamance disminuirían hasta 730 MJ, 150 MJ y 750 MJ (1630 MJ en

total). Las pérdidas para un horno tradicional de 6 Tn con un 15 % de humedad y una temperatura pico de 450 °C sin recirculación supone un 31 % de la energía total del proceso, para un horno en las mismas condiciones con recirculación este dato disminuye hasta un 22,5 %.

Esta mejora es debida a los siguientes factores: menor consumo de biomasa para aporte energético, menor emisión de gases combustibles y no combustibles al exterior, y aceleración del proceso de carbonización del horno.

Esto se traduce en un aumento de rendimiento en base seca de carbón vegetal de un 3 % y un aumento de rentabilidad que puede alcanzar un 4,5 %. La ganancia relativa de eficiencia no superará el 15 %, algo que contrasta con los datos de experimentos sobre el terreno y de tests reportados en la tabla 6.6. notablemente mejores.

Cuando se carboniza una tonelada de madera, se liberan a 365 Kg. de CO₂ con una técnica deficiente, mientras que con una técnica mejorada sólo 275 Kg. Se impide la emisión de 90 Kg. de carbono o 1,1 Tn de de CO₂ por tonelada de carbón vegetal consumido.

El factor que más afecta a la mejora del proceso es la presión y el tiempo de residencia de vapores y gases en el horno. Los demás factores tienen una influencia despreciable en el rango del estudio y las condiciones de los hornos de parvas. Además para obtener un carbón con un contenido en carbono fijo y una calidad aceptable, es necesario un control cuidadoso del pico de temperatura que deberá superar los 450 ° C. La reproductibilidad de buenos rendimientos depende fundamentalmente de las habilidades del carbonero, algo que en otro tipo de hornos con resultados más estables (por ejemplo el horno de ladrillos) pierde importancia.

Por encima de todas las consideraciones, se encuentra la elección del tipo de biomasa. Es necesario biomasa con alto contenido en lignina, por ejemplo la cáscara de avellana puede alcanzar rendimientos del 40 % con un contenido de lignina del 51 %. Por el contrario para la mazorca de maíz estaríamos en un 25 % de rendimiento para un 15 % de contenido de lignina. Lo que supone una ganancia relativa en eficiencia de la cáscara de avellana sobre la mazorca de maíz de casi un 50 %.

El tope de eficiencia del horno lo sitúa el tipo de biomasa. Si la elección del tipo de biomasa no es acertada, de poco o nada servirá mejoras en el proceso del horno o en el secado de la madera donde los márgenes de mejora son más pequeños y en la mayoría de casos no superarán un aumento de 5 puntos porcentuales en el rendimiento. En cualquier caso se necesitará una valoración conjunta desde un punto de vista técnico y socioeconómico, si la biomasa en cuestión no sólo tiene como uso principal la obtención de energía.

Para nuestro caso en concreto el modelo determina que la paja de trigo se sitúa entre un máximo de 35 % y un mínimo del 23 % de rendimiento, frente a un 31/22 % del tallo de algodón y un 29/19 % del pino. Era algo previsible debido a las mayores necesidades energéticas del pino y a un menor residuo másico frente al aumento de temperatura. Varios residuos agrícolas (cáscara de kukui, nuez de macadamia, cáscara

de pacana,...) y especies tropicales ofrecen rendimientos más altos que las maderas tradicionalmente

En países donde se mantiene una masa forestal adecuada, un sistema de gestión de bosques salvajes es imprescindible, financiada por una combinación de tasas. Donde hay escasez de recursos forestales, es necesario establecer un uso de manera polivalente las plantaciones y promocionar una sustitución a gran escala entre combustibles. Según el modelo, por cada horno de 10 m³ de pino se clarean 0,75 Ha de promedio. En un bosque natural no ordenado el incremento medio anual puede ser de 2 a 3 m³ / Ha (aguantaría 3 o 4 hornos al año) frente a bosques tropicales o bosque bien gestionados donde crecimiento superará con facilidad los 20 m³ / Ha (más de 25 hornos al año).

Conclusiones económicas

En áreas rurales, particularmente en localizaciones remotas, transmisión y distribución de energía generada de combustibles fósiles puede ser difícil y cara. Producir energía renovable de manera local puede ofrecer una alternativa viable. Las energías renovables pueden facilitar un desarrollo económico y social pero sólo si los proyectos son inteligentemente diseñados y cuidadosamente planificados con la comunidad local. Particularmente en zonas rurales pobres, los costes de los proyectos de energía renovable se absorberán por un grupo importante de participantes con rentas escasas.

El margen comercial en una producción tradicional de carbón es atribuible a muy bajos desembolsos de capital, la mano de obra propia es aparentemente gratuita, materias primas gratuitas, una alta demanda de carbón vegetal, falta de preocupación por efectos colaterales negativos y falta de actividades alternativas generadoras de ingresos.

En el estudio llevado a cabo en Senegal, la mano de obra supone un 30 % del total de costes y el coste de la biomasa un 32 %. El hecho de que sean o no gratuitos estos dos inputs conlleva una variación de un 40 % de rentabilidad en la comercialización del carbón vegetal producido como se puede ver en la figura 6.13.

Aunque la comercialización de recursos madereros provee beneficios monetarios tangibles a las comunidades rurales, también contribuye a la degradación medioambiental que a la larga amenazarla supervivencia a largo término de estas comunidades. Los regímenes de propiedad común parecen poco sólidos a la hora de hacer respetar los mecanismos de control que eviten el uso excesivo de los recursos y necesitan ser reforzados.

Un nuevo desarrollo tecnológico por si solo no resolverá el problema. Esfuerzos complementarios son requeridos para:

- Organizar a los productores y aumentar su status socio-económico.
- Proveer incentivos a través de un intercambio de derechos de recursos y gestión de la responsabilidad, e implementación de políticas diseñadas para señalar la escasez de recursos de biomasa.
- Asegurar una fuente estable de asistencia financiera para los productores.

Líneas futuras de trabajo

Como complemento al horno de parvas se podría crear modelos de otros tipos de hornos tradicionales (metálicos, de ladrillos,...) y de hornos industriales para poder compararlos y ver su adaptación como tecnología apropiada a comunidades rurales.

Así mismo se deberían incluir modelos fluido mecánicos para salvar ciertas limitaciones en el modelo de este proyecto, por ejemplo la distribución de temperaturas en el horno durante el ciclo de carbonización.

Así mismo la recuperación de gases y líquidos condensables en los hornos tradicionales y la búsqueda de posibles usos son muy interesantes desde un punto de vista medioambiental.

El proyecto de biorefinería propuesto, pese a las grandes dificultades que presenta, supone un paso de gigante en el desarrollo de la biomasa como recurso energético a nivel global. Así mismo se deben dirigir esfuerzos a extender la implantación y el uso de gasificadores de pequeña escala en países en vías de desarrollo.

8. Referencias bibliográficas

Con asterisco las referencias especialmente interesantes.

Introducción a la biomasa

[1] Peter McKendry. **Energy production from biomass (part 1):overview of biomass.** Bioresource Technology 83 (2002) 37-46 *

[2]Peter McKendry.**Energy production from biomass (part 1):conversion technologies.** Bioresource Technology 83 (2002) 47-54 *

[3] Ralph P.Overend. **Biomass Conversion Technologies.** National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 80401, USA

[4] Ralph Overend and Andrew Barnett. **Modernization of biomass for poverty reduction.** Background paper. 2001

[5] Andre Faaij. **Modern biomass conversion technologies.** Copernicus Institute, Utrecht University. 2005

Pirolisis

* [6] Haiping Yang, Rong Yan,...**Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.** Fuel 86 (2007) 1781-1788. *

[7] Serdar Yaman. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks.** Energy conversion and management 45 (2004) 651-671.

[8] A.Demibas. **Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass.** Energy conversion and management 41 (2000) 633-646

* [9] K.Raavendran, Anuradda Ganesh. **Heating value of biomass and biomass pyrolysis products.** Fuel. Vol. 75. (1996) 1715- 1720

[10] A.M. Li, X.D. Li, S.Q. Li .**Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 50 (1999) 149–162

[11] Ayhan Demirbas. **Biomass resources facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals.** Energy conversion and management. 42 (2001) 1357 - 1378

Cinética de la pirolisis

[12]Eleni Kastanaki, Despina Vamvuka. **A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal–biomass char blends.** Fuel 85 (2006) 1186–1193

[13]Eleni Kastanaki, Despina Vamvuka **Thermogravimetric studies of the behavior of lignite–biomass blends during devolatilization.** Fuel processing technology. 2002

Gasificación

* [14] Hubert E.Stassen. **Small-Scale biomass gasifiers for heat and power.** World Bank Technical Paper nº 296. *

[15]H.A.M. Knoef. **The UNDP/World Bank monitoring program on small scale biomass gasifiers (BTG's experience on tar measurements).** Biomass and Bioenergy 18 (2000) 39-54

Producción de carbón vegetal

* [16] FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. **Métodos simples para fabricar carbón vegetal.** 1983.* www.fao.org/docrep/x5595s/X5595S00.htm

[17] FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. **Integrated energy systems in China - The cold Northeastern region experience.** Capítulo 7. 1994. * www.fao.org/docrep/t4470e/t4470e00.htm#Contents

* [18] Daniel M. Kammen, Debra J. Lew.**Review of technologies for the production and use of charcoal.** University of California, Berkeley.2005 *

* [19] J. Ratha, M.G. Wolfinger. **Heat of wood pyrolysis.** Fuel 82 (2003) 81–91 *

[20] Y.Schenkel. **An evaluation of the mound kiln carbonization technique.** Pergamon.

* [21] Fang He, Weiming Yi. **Investigation on caloric requirement of biomass pyrolysis using TG–DSC analyzer.** Energy conversion & Management. *

* [22] Daniel M. Kammen, Debra J. Lew.**Review of Technologies for the Production and Use of Charcoal.** Energy and Resources Group & Goldman School of Public Policy. University of California, Berkeley *

[23]A.R. Paddon, A.P. Harker. **Charcoal Production Using a Transportable Metal Kiln.** Tropical Development and Research Institute

[24] Jeffrey Wartluft, Stedford White. **Comparing simple charcoal production technologies for the caribbean.** Volunteers in Technical Assistance

[25] **Aprovechamiento de biomasa y obtención de energía - Aprovechamiento de carbón vegetal.**

www.zalameaemprende.com

* [26] M.R. Pelaez-Samaniego, M. Garcia-Perez. **Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2006. *

* [27] **Improving Charcoaling Efficiency in the Traditional Rural Sector.** The World Bank Industry and Energy Department. 1991. *

[28] M.J. Antal. **Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass.** Ind.Eng.Chem.Res. 2000, 39, 4024 – 4031

* [29] M.J.Antal. **Review of Methods for Improving the Yield of Charcoal from Biomass.** Energy fuels. 1990.

[30] M.J. Antal. **The art, science, and technology of charcoal production.**

[31] A. Mlaohui. **Trials of wood carbonization of some forest and fruit-bearing species.** Renewable energy. 1999

* [32] Ayhan Demirbas. **Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products.** Energy conversion and management. 2001. 1229-1238

Aspectos económicos

[33] Erlinda A. Dionco-Adetayo. **Utilization of wood wastes in Nigeria: a feasibility overview.** Technovation 21 (2001) 55–60

* [34] E.J. Luoga, E.T.F. Witkowski, K. Balkwill. **Economics of charcoal production in miombo woodlands of eastern Tanzania: some hidden costs associated with commercialization of the resources.** Ecological Economics 35 (2000) 243–257

Propiedades de la madera

[35] Instituto nacional de tecnología agropecuaria de Argentina.
www.inta.gov.ar

Tecnologías apropiadas para los países en desarrollo

[36] Guillermo Bendaña. **Energía para un desarrollo rural sostenible.** Universidad Centroamericana. Nicaragua.

[37] Jorge Martínez, Ulpiano Rivas. **Tecnologías apropiadas en cooperación para el desarrollo.** Curso de humanidades de la Universidad Carlos III.

[38] Practical Action. Technology challenging poverty. **Biomasa**

[39] Energia News. Gender and sustainable energy. Volume 4. July 2001. **A Tale of Two Women and their Charcoal Technology: A case from Mali**

[40] Biomasa como fuente energética en países en desarrollo. Módulo 5. Lectura 5.1. **Uso tradicional de la biomasa. Tecnologías mejoradas**

[41] Ahmed Abasaed. Hedon. Household energy network. **Cotton stalks a useful waste.**

www.hedon.info/SE1989:CalorificValuesOfWasteMaterials

Nicaragua

[42] CNE Nicaragua. **Desarrollo de una estrategia y plan de acción para el sector eléctrico.** Octubre 2003

[43] Memoria - **Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa.** FAO. <http://www.fao.org/docrep/T2363S/t2363s00.HTM>

[44] Economía Global

<http://www.eready.org.ni/Diagnostico/Frame%20Econom%C3%ADa.htm>

Conceptos de transmisión de calor

[45] Frank P. Incropera. **Fundamentos de transferencia de calor.** Prentice Hall. 4ª edición.