REVISTA FORESTAL LATINOAMERICANA Nº 26/99

SILVIQUÍMICOS Y DENDROENERGÍA

Adriana Padilla*

RESUMEN

El objetivo de este documento es analizar los múltiples beneficios que surgen de la producción y uso de los silviquímicos y la bioenergía. Se expone, en forma breve y sencilla, algunos procesos de conversión química de la biomasa forestal con fines energéticos. Este documento, producto de experiencias en el Laboratorio de Bioenergía de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la ULA, así como, de múltiples consultas bibliográficas, ofrece una información general de la versatilidad de uso que nos brinda el bosque.

Palabras clave: Ssilviquímicos, bioenergía, dendroenergía, pirólisis, licuefacción, biogás, gasificación.

---

*Profesora de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes. Venezuela. Coordinadora del Laboratorio de Bioenergía. e-mail: adrianap@forest.ula.ve.

SILVICHEMICAL PRODUCTS AND DENDROENERGY

Adriana Padilla

SUMMARY

The goal of this paper is to analyse the multiple benefits from production and uses of silvichemical products and the bioenergy Some biomass chemical process tha are carried out for energy goals are showed in a brief and simple way.

This bibliographical abstract tries to give general information about the diverse uses we get from forest.

Key Words: Silvichemical products, bioenergy, dendroenergy, pyrolisis, licuefaction, biogas gasification.

La madera representa una de las materias primas más antiguas de la historia, mediante su combustión el hombre comenzó a cocinar sus alimentos y a calentarse.

Hace aproximadamente 10000 años, en el norte de Europa las piedras eran pegadas a las lanzas de madera con pez, una sustancia obtenida de la destilación del alquitrán producido durante la carbonización de la madera (1).

La pez es un producto pastoso en caliente y duro en frío que se emplea para pavimentación, impermeabilización, protección de metales, aislamiento de materiales, briquetas y electrodos. Las resinas y pez de madera o de corteza, se usaban como preservativo de la madera, como cola y masilla. Su uso para calafatear flotas navales, en la edad media, hizo de Suecia uno de los principales proveedores (2).

Los mayas, aztecas e incas hicieron uso de las resinas para inciensos y desinfectantes de heridas. Se sabe que los incas efectuaban operaciones complicadas tales como cesáreas y trepanaciones, siendo ésto posible sólo con el uso de desinfectantes (1).

Otra industria importante era la de ceniza de madera (potasa, K_2CO_3), que se fundía con ácido sailícico y calcio para obtener vidrio (1).

Desde el año 1 500 antes de Cristo, durante la edad de hierro, se producía carbón vegetal para la obtención del mineral. Por medio de la reducción del óxido ferroso se obtiene el hierro según la siguiente reacción:

$$2Fe_2O_3 + 3C \longrightarrow 4Fe + 3CO_2$$

Para la obtención de una tonelada de hierro se necesitan 120 m^3 de madera (3).

Una de las industrias forestales más importantes es la de la fabricación de pulpa y papel. El sajón Keller hizo, en el año 1843, un importante invento: por medio de un molino, raspando sencillamente la madera, con mucha agua, produjo una fibra conocida hoy como "pasta mecánica de madera". Posteriormente se descubrieron procesos químicos (bisulfito y sulfato) para eliminar la lignina. No fue sino hasta 1

925 cuando se obtuvo la primera pasta semiquímica, de alto rendimiento en fibras. El método semiquímico difiere del método químico sólo en que el tiempo de cocción, en el primero, es más corto, seguido por un proceso de desfibrado mecánico.

Las industrias de los derivados celulósicos se ha desarrollado con el conocimiento de la química en general.

La celulosa es un polímero natural en forma de cadena, cuyos eslabones constan del monómero glucosa que ha perdido dos H y un O (una molécula de H_2O) en el momento del enlace. Cada unidad de glucosa contiene tres grupos hidroxílicos (OH). Por consecuencia de la transformación de estos grupos resultan los derivados, por ejemplo éteres y ésteres (4).

La nitrocelulosa, base de la pólvora utilizada en todas las armas modernas, y también del celuloide, material transparente que durante muchos años se usó para películas fotográficas y de cine, es un derivado de celulosa descubierto en 1 845. Este material se sustituyó por el acetato de celulosa debido a que su combustión genera gases cianhídricos (5).

Otra importante innovación, desarrollada por Cross y Bevan en 1892, es la seda artificial o rayón. Se obtiene a partir de celulosa, nitrato de celulosa o acetato de celulosa; la disolución del producto correspondiente se hace pasar por unos orificios obteniéndose hilos largos y brillantes de celulosa (4).

La celulosa también ha sido hidrolizada a glucosa para la producción de alcohol mediante fermentación o para cultivo de microorganismos y obtención de alimento de alto valor proteico para animales, vitamina D y hormonas sexuales (4).

SILVIQUIMICOS

La palabra "silviquímicos" se refiere a los productos químicos obtenidos de los bosques. La representación más simbólica de la floresta es el árbol, sin embargo otras formas lignocelulósicas son de irrebatible importancia y no deben ser ignoradas por los investigadores de la línea química de productos forestales.

La composición elemental de la madera varía muy poco entre especies, 40-50% de C; 6% de H, 43-44% O y 0.5% de N; no obstante la constitución química está lejos de ser constante: 20-40% de lignina, 30-50% de celulosa, 9-28% de pentosanas, 0-12% de mananas y galactanas, 0.2-20% de extractivos como gomas, resinas, ceras, grasas y aceites (4, 6,7).

La madera y la corteza asociada a ésta, forman un complejo sistema químico. Madera y corteza varían en la proporción de sus componentes químicos principales. Más aún, los componentes químicos varían tanto en proporción como en composición entre especies y sobre todo si se compara entre angiospermas y gimnospermas.

Los criterios de clasificación dependen del contexto que los incluya. En este particular los silviquímicos puedrían clasificarse:

1. Según el componente químico de origen
   a. Derivados de carbohidratos
   b. Derivados de lignina
   c. Derivados de extractivos

2. Según el tipo de tratamiento de obtención
   a. Tratamiento químico drástico o severo
   b. Tratamiento químico suave o simple extracción
   c. Subproductos de la fabricación de pulpas

3. Según el sitio de ubicación en el árbol
   a. Corteza
   b. Madera (albura o duramen)
   c. Follaje
   d. Raíz

Con un tratamiento determinado pueden obtenerse productos químicos de los tres componentes principales de la madera (carbohidratos, lignina y extractivos) por esta razón se facilitará el estudio de silvoquímicos al guiarse por la clasificación 2. A continuación se hace mención de algunos productos, forma de obtención y usos (2, 4, 6, 7, 8).

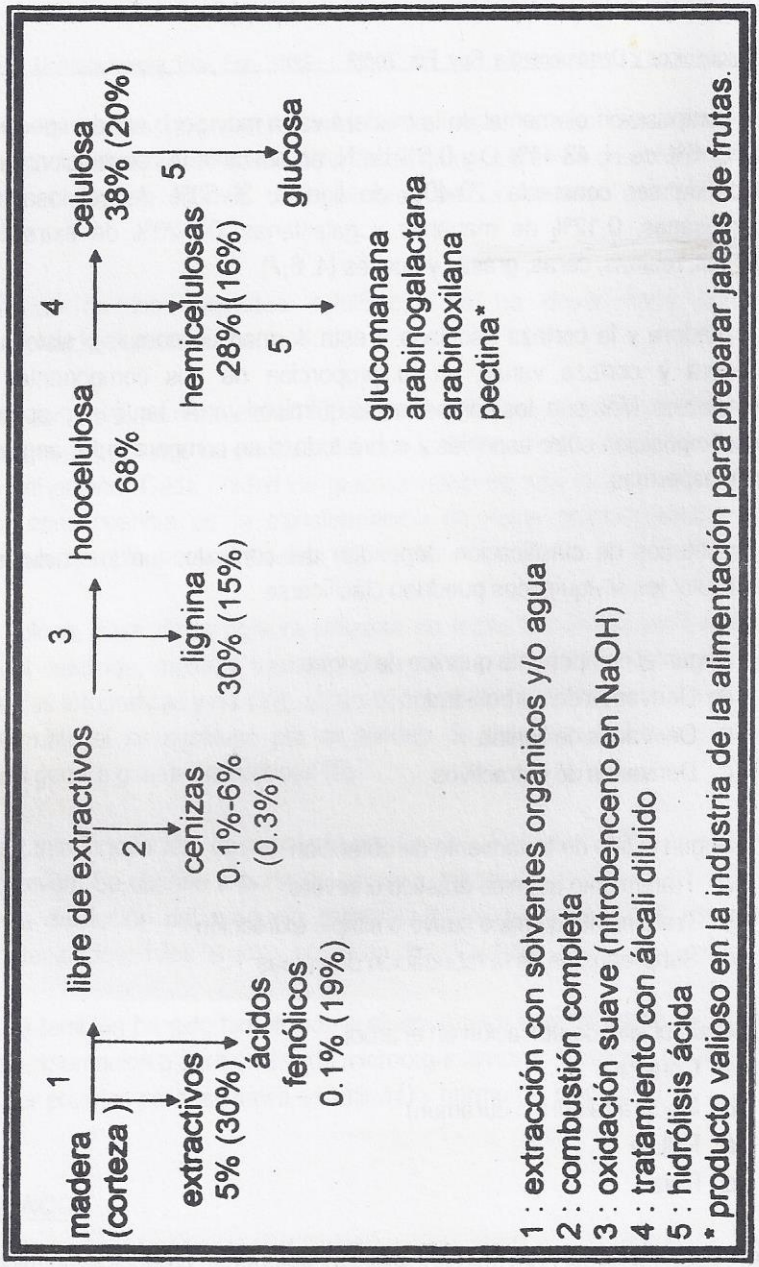

Figura 1.- Conversión de la madera y la corteza en sus principales componentes químicos. Esquema general (4).

1. Productos silvoquímicos obtenidos mediante tratamiento suave

1.1. Oleorresina

Brota de los pinos, se obtiene mediante cortes en el árbol o por destilación de tocones. La oleorresina tratada con vapor de agua rinde trementina y colofonia.

1.1.1. Trementina

Se emplea como solvente de pinturas y barnices, insecticidas, esencias aromáticas.

1.1.2. Colofonia

Se emplea en farmacia y sirve también para frotar las cerdas de los arcos con que se tocan varios instrumentos de cuerda.

1.2. Extractivos

Incluye sustancias extraíbles con solventes orgánicos como ceras, taninos, carbohidratos.

1.2.1. Ceras

Se extraen, generalmente, con solventes orgánicos (se ha probado también la extracción alcalina acuosa). Son abundantes en algunas cortezas. Su uso principal es como extensor de adhesivos de contrachapado.

1.2.2. Taninos

Los ácidos tánicos se obtienen en agua caliente y solventes orgánicos. Son utilizados en curtidería, como colorantes y antioxidantes.

1.2.3. Carbohidratos

La extracción con agua a 170°C elimina hasta 10% de los carbohidratos de la madera. Los ácidos se liberan y, por hidrólisis, las hemicelulosas se despolimerizan. Un ejemplo de la importancia de estos extractos es el xilitol, edulcorante para diabéticos. Otros carbohidratos digeribles son extraídos para uso dietético de personas y animales.

2. Productos silviquímicos obtenidos mediante tratamientos especiales (severos o drásticos)

Los productos obtenidos por combustión directa, carbonización, gasificación, licuefacción y procesos bioquímicos se consideran resultados de tratamientos

drásticos o especiales, no obstante serán considerados en laa sección "Dendroenergía". Los procesos de obtención de pulpa para papel conforman un tópico amplio y complejo fuera del alcance de los objetivos de este artículo.

3. Subproductos de la fabricación de pulpas celulósicas

Son productos silvícolas muy importantes, tanto por su variedad como por su volumen. Los grandes volúmenes de lejía residual de los distintos procesos para obtener pastas o pulpa celulósica contienen sustancias valiosas. Se las ha aprovechado como sigue (2, 4, 6, 7, 8):

a) La lejía residual de procesos al sulfito contiene azúcares los cuales se pueden fermentar. Así se obtiene alcohol y levaduras de alto contenido de vitaminas y proteínas.
b) Luego de retirados los azúcares, se recuperan los lignosulfonatos, sustancia tensoactiva utilizada en la industria petrolera.
c) De la lejía residual del proceso al sulfato (kraft) se obtiene principalmente la trementina y aceite de tall. El "tall oil" es una mezcla de resinas y de ácidos grasos usada como agente de flotación, surfactante, controlador de absorción de humedad en papeles, componente de adhesivos, de cauchos sintéticos, de pinturas y barnices, jabones, detergentes y además, se usa en farmacología. Otro producto importante de éstos efluentes es el dimetilsulfóxido, sustancia usada en la formulación de fármacos hipnóticos. En los gases de alivio están presentes los compuestos de hidrosulfuro (mercaptanos) que se usan para dar olor al gas de cocina.
d) El aprovechamiento de la lignina todavía es un problema grande. Sin embargo existen diferentes modos de usarla : para la producción de vainilla artificial, carbón activo, insecticidas, surfactantes, aglutinantes, antiespumantes, detergentes, defloculantes, medicinas como la L-DOPA usada para curación del mal de parkinson y en hipertensión.

DENDROENERGIA

La madera es el recurso natural más antiguo de que dispone el hombre, desde siempre le ha proporcionado combustible, alimento, protección. El uso de la madera para obtener energía marcó, para el hombre prehistórico, no solamente la posibilidad de aumentar su dieta sino también el comienzo de la civilización

puesto que la elaboración de instrumentos manuales o herramientas fue posible gracias al fuego que forjaba los metales.

Actualmente, un alto porcentaje de la población mundial depende aún del bosque para cocinar y calentarse. Muchos países en desarrollo son grandes consumidores de leña y carbón vegetal: Brasil, África Central, India, Nepal, por nombrar sólo algunos (9).

Con el tiempo el hombre ha necesitado utilizar energía en cantidades cada vez mayores, para aumentar su productividad y su bienestar. En este proceso se ha pasado de las fuentes de energía renovables al uso, cada vez mayor, de energía no renovable, obtenida de los fósiles, principalmente de los derivados del petróleo. Esta tendencia ha sufrido un cambio fundamental al reconocerse en todo el mundo, que las principales fuentes de energía fósil pueden agotarse, con el consiguiente rápido aumento de sus precios lo que ha determinado una masiva búsqueda de nuevas fuentes de energía para el desarrollo económico mundial.

En los países industrializados el uso del recurso dendroenergético abarca un amplio espectro. Se cubren necesidades domésticas e industriales con materiales lignocelulósicos. Podemos, entonces, deducir la importancia de la madera como fuente estratégica de energía.

En comparación con el petróleo, la madera presenta una serie de ventajas: a) reducido impacto ambiental; b) posibilidad de planificar su reproducción; c) las plantaciones energéticas contribuyen a detener procesos de erosión. Estas ventajas han sido tomadas en cuenta por los países desarrollados, inclusive los poseedores de grandes reservas fósiles, preocupados cada vez más por la conservación de su medio ambiente.

De acuerdo con la más reciente estimación, existe en Venezuela reservas de gas natural para 160 años, alcanzando éstas 5.4 millones de m^3, un 70% se ubica geográficamente en tierra firme, en el oriente del país y 30% en el occidente(10).

Venezuela no escapa a las consecuencias de la crisis energética mundial. De manera insistente se anuncia la imperante necesidad de conversión de equipos y motores que operan con gasolina a gas natural. Esta no parece ser la manera de solventar las necesidades energéticas de nuestros pueblos occidentales. Los gasoductos que deberían construirse recorrerían enormes trechos, involucrando

altos costos y riesgos de explosión debido al carácter volátil del metano que impide su licuefacción y además el deterioro del ambiente continuaría su implacable ascenso.

El potencial para desarrollar recursos forestales combustibles en nuestros paises tropicales es grande, pero en la mayoría sus gobiernos aún no se han dado cuenta que el desarrollo de estos recursos podría traerles grandes beneficios.

En Venezuela el 56% del territorio está cubierto de bosques. Se puede estimar un potencial mínimo de 238 millones de m^3/año de madera, sin embargo, los lineamientos de la politica forestal señalan como disponible para fines energéticos restos de explotaciones forestales, residuos industriales, madera de deforestación con fines agropecuarios y madera de entresaca de plantaciones (9).

Un breve recorrido por el interior del país nos permite darnos cuenta del incumplimiento de estas normativas. Un ejemplo cercano, es la evidente desaparición de las especies leñosas arbóreas y arbustivas en los páramos merideños.

La madera tiene un valor inapreciable por no decir única por su condición de recurso natural capaz de ser renovando. El petróleo se acabara un día, las minas de carbón, y otros minerales se agotarán pero un bosque bien cuidado irá produciendo madera indefinidamente (11).

A corto plazo, los medios más prometedores por su efectividad, costo y adaptabilidad para aumentar la producción de energía en el medio rural de muchos países son: la hidroenergía, la bioenergía, energía solar y eólica. La conversión de biomasa en energía es una de las pocas opciones a gran escala en cualquier escenario mundial, ya que se trata de una energía que no contamina, renovable, con una reducida generación de carbono, lo que reduce toda posibilidad del efecto de los gases invernaderos (12).

El continuo aumento en el uso de la madera también aumenta la disponibilidad de los residuos adecuados para combustible, una mayor utilización de los residuos proporcionaría claras ventajas ambientales, disminuyendo la producción de calor por la descomposición de la materia orgánica y disminución del dióxicido de carbono, ya que la madera que se utiliza como combustible libera la misma cantidad de CO_2 que el árbol fija en su crecimiento. La biomasa vegetal tal vez no

sea el remedio o la gran solución a la crisis energética, pero no hay duda de que este importante recurso puede proporcionar una mayor contribución al consumo energético mundial. Quizás la ventaja más significativa de utilizar la biomasa sea su renovabilidad, además de que la utilización de la biomasa es probablemente la forma de uso más eficiente de lo que se considera residuo y desperdicio de las actividades forestales, lo que se traduciría en una contribución significativa de energía mediante el uso eficiente del material desechado (13).

El uso tradicional de la madera como combustible en forma de leña conduce a la perdida de cerca del 95% del poder calórico de la misma, la conversión de la madera en carbón, briquetas o alcohol, y hasta el solo uso de la leña con métodos adecuados, elevaría en más de 30% el rendimiento energético de este combustible (14).

Actualmente se ha despertado un gran interés por desarrollar y perfeccionar tecnologías que permitan aprovechar el recurso forestal natural o de plantaciones, como fuente alterna de energía. Dentro de estas tecnologías o procesos se pueden mencionar: la combustión directa, la carbonización, la gasificación, la licuefacción termoquímica y los procesos bioquímicos (por ejemplo hidrólisis y fermentación, metación, entre otros).

EL Poder calorífico, llamado también potencial calórico, poder calórico, calor de combustión, es el calor desprendido por la combustión de una unidad de peso de un cuerpo. Se mide en calorías, joules o unidades térmicas británicas (15).

Hay que distinguir dos casos según se suponga toda el agua de combustión en forma líquida o de vapor (16): a) el poder calorífico superior, referido al agua líquida que incluye el calor de condensación del vapor y; b) el poder calorífico inferior referido al agua que ha consumido energía para llegar a la forma de vapor.

El poder calorífico inferior (Hu), se deduce a partir del poder calorífico superior (Ho) que es el que se cuantifica mediante el uso de la bomba calorimétrica adiabática (17):

$$Hu = \frac{Ho - 600(u + 9H)}{1 + u}$$

u es el contenido de humedad referido al peso seco y
H es la proporción de hidrógeno. La composición elemental de la madera varía muy poco entre especies.

Ciertos factores que influyen en el poder calorífico de materiales lignocelulósicos.

La humedad contenida en la madera influye decisivamente sobre el poder calórico, debido a que el agua contenida en la madera consume mucho calor durante la descomposición térmica, afectando el balance térmico del proceso. Lo que se traduce en un mayor requerimiento de energía. El contenido de humedad tiene la influencia dominante, sobre la pirólisis de la madera de reducir la temperatura de la llama (18).

La ceniza, al igual que el agua, actúa como represor del calor, paralelamente, reirradia energía facilitando la pirólisis. La disposición de estos compuestos minerales de elevado punto de fusión en la madera, originan disminuciones del valor calórico debido a que la combustión no se realiza de forma homogénea, existiendo altos valores en porciones carentes de cenizas y bajos valores en porciones donde se encuentra la ceniza depositada (18).

En un estudio de 115 especies (16) para determinar su poder calórico utilizando madera 100% seca se obtuvo valores de ésta que van desde 4 310 a 5 170 Kcal/kg y los valores calóricos observados para los diferentes elementos de su constitución química fueron, en promedio, los siguientes:

Cuadro 1. Poder calorífico de algunos de los componentes químicos de los materiales lignocelulósicos

Componente	Kcal/Kg
lignina	6 100
celulosa	4 070
celulosa + 29% pentosanas	4 130
extractivos alcohol/benceno (latifoliadas)	6 230
extractivos alcohol/benceno (coníferas)	8 500

Las maderas ricas en extractivos y lignina tienen mayor valor calórico, se observó también que las latifoliadas tropicales tienen un poder calórico del orden de 4 770 Kcal/Kg en tanto que las latifoliadas de zonas templadas están en el orden de 4 600 Kcal/Kg (16).

El estudio de las 115 especies reportó que no existe relación entre la densidad de la madera y el poder calorífico por unidad de peso.

Como el poder calorífico (en Kcal/Kg) es la cantidad de calor desprendido por kilogramo de combustible, la densidad de la madera no tiene una relación directa con éste; la relación puede considerarse de forma indirecta, ya que a igual peso la composición elemental de las maderas varía poco, teniendo un poder calorífico promedio parecido. Ahora bien, desde el punto de vista del volumen, existe una relación evidente, ya que en un mismo volumen, la madera más densa, presenta mayor cantidad de elementos que participan activamente en la combustión, proporcionando mayor cantidad de calor. Al comparar dos especies de igual volumen pero con diferentes densidades, se puede decir, que las maderas más pesadas y densas son mejores combustibles porque arden durante más tiempo ya que, en contraste con maderas menos densas y más porosas, la menor cantidad de oxígeno en la pieza retarda la combustión.

La madera como tal posee un poder calorífico relativamente bajo comparado con otros combustibles, es por ello que si se quiere aprovechar al máximo el valor calórico de la madera debe ser procesada. El Cuadro 2 presenta una comparación entre el valor calórico de la madera y otros combustibles (19, 20).

Cuadro 2. Valor calórico de la madera y otros combustibles

Sólidos	Hu (Kcal/kg)	Líquidos	Hu (Kcal/kg)	Gases	Hu (Kcal/m³)
lignito	6 500	petróleo	11 000	antracita	1 300
coque	8 500	metanol de madera	5 400	carbón mineral	4 800
antracita	8 000	etanol de madera	7 100	butano	28 327
celulosa	4 100	alquitrán de madera	8 000	carbonización	3 200
carbón vegetal	8 000	gasolina	10 000	madera (gasógeno)	1 300
lignina	6 000			carbón (gasógeno)	1 400
madera	4 800				

Los procesos de obtención de energía de materiales lignocelulósicos más comunmente usados son cinco:

1. Combustión directa

La combustión de la biomasa puede definirse como la descomposición térmica donde ésta se convierte en energía térmica, cenizas, bióxido de carbono y vapor de agua. El oxígeno no es combustible aunque favorece activamente la combustión. Para que ocurra la combustión es necesario que el combustible se encuentre bien mezclado con el oxígeno y permanezca a una determinada temperatura durante un intervalo de tiempo. El calor de combustión se debe a la ruptura de los enlaces químicos y a la formación de nuevos compuestos.

A continuación se resumen los pasos para la evolución del proceso de combustión de la madera según un estudio realizado por Tillman (18):

a. La partícula combustible debe alcanzar desde la condición ambiente hasta 225°C, donde comienza a ocurrir la pirólisis. La degradación térmica de las hemicelulosas se produce en un rango de temperatura establecido entre 225°C y 325°C, la celulosa entre 325°C y 375°C y la lignina entre 250°C y 500°C. A partir de aquí una serie de reacciones degradan las moléculas en fragmentos gaseosos mientras que las reacciones de condensación producen carbón.

b. Los enlaces tipo éter y los grupos carboxilo y carbonilo incrementan el número y complejidad de los productos volátiles de la pirólisis. La lignina origina una serie de compuesto como CO, CO_2, CH_4, C_2H_6, en porcentajes de 50, 10, 38 y 2 respectivamente. El alquitrán arrastra numerosos compuestos aromáticos tales como fanilacetileno, antraceno y nafptaleno.

c. Rompimiento homolítico de los volátiles en fragmentos radicales sucede por dos caminos:

(a) R---R"---------R + R"
(b) R"---H---------R" + H

Para (a) aplicada a C_2H_6, la energía de activación es de 88 Kcal/mol. La energía de activación es de 98 Kcal/mol para (b) cuando R" representa un grupo metilo puesto que si R" contiene 2 o más carbonos el enlace C---C se debilitaría antes que el C---H. Radicales CH_3 también pueden surgir de la pirólisis de lignina.

M es una especie que remueve calor (p.e. ceniza).

EJEMPLO:

$C_2H_6 + M \rightarrow 2CH_3 + M$

$2CH_3 + 2\,C_2H_6 \rightarrow 2CH_4 + 2C_2H_5$

$M + C_2H_5 \rightarrow H + C_2H_4 + M$

$H + C_2H_6 \rightarrow H_2 + CH_2H_5$

d. Oxígeno y combustible se mezclan en la zona de combustión y mediante reacciones de radicales libres producen en último caso CO_2 y H_2O.

2. Carbonización

Operación en la cual un material es sometido a altas temperaturas en ausencia de aire y un limitado contenido de oxígeno, provocando la descomposición térmica

de los polímeros de la madera en moléculas más pequeñas en forma de sustancias condensables, productos gaseosos y residuo sólido (13).

En este proceso se obtiene alrededor de 30% de carbón vegetal, 50% de piroleñosos (condensables) y 20% de gases no condensables (21). Los productos gaseosos son básicamente gases que contienen oxígeno, dioxido y monóxido de carbono (O, CO_2, CO). Los piroleñosos pueden separarse en dos fases (2, 20):

a. Los ácidos piroleñosos, compuestos principalmente por metanol, un combustible líquido derivado de la madera y mejor conocido como alcohol de madera (CH_3OH) y otra amplia variedad de sustancias como el acetato de metilo y ácido acético.
b. El alquitrán, usado como combustible, esta fracción es una mezcla de aceites pesados y livianos que se usan para impregnación y aplicaciones médicas. Después de la destilación del alquitrán se recupera un residuo pastoso en caliente y duro en frio, empleado en pavimentación, impermeabilización, protección de metales, conocido con el nombre de pez de madera. La fracción de aceites pesados puede procesarse para obtener creosota, cuyo principal componente es el guayacol, un producto farmacéutico usado como antiséptico.

Puesto que el resultado de la carbonización es por un lado carbón vegetal y por el otro productos volátiles llamados productos de destilación de la madera, se emplean dos términos equivalentes para un mismo proceso químico: carbonización, cuando se enfatiza la producción de carbón, y destilación destructiva de la madera, destilación seca o pirólisis cuando la recuperación de los productos químicos es lo importante (20).

La lignina es un componente importante, cuando lo que se persigue es la producción de carbón vegetal, por su elevada resistencia a la degradación térmica no se degrada totalmente hasta que alcanza 500°C (18).

La descomposición térmica de los compuestos de carbono ocurre a medida que se eleva la temperatura, llegando a la formación de un residuo sólido el cual es más rico en carbono que el material original. Esta acumulación se debe a la reducción del oxígeno e hidrógeno de la madera. La proporción de carbono fijo

para madera está entre 40 y 50 por ciento y para carbón vegetal entre 74 y 83 (13, 17, 18).

El carbón vegetal se usa en metalurgia y siderurgia en los procesos de reducción de los óxidos de hierro y otros minerales, con fines energéticos o para fabricación de carbón activado de uso en medicina, purificador de agua, decolorante y otras aplicaciones industriales (3, 22).

3. Gasificación

La gasificación consiste en un proceso de degradación térmica de la madera (o del carbón vegetal) a temperaturas por encima de 800°C, en dispositivos especiales llamados gasógenos con la consecuente producción de un gas conocido como gas de madera o gas pobre. Su poder calorífico es bajo (Cuadro 3) en comparación con otros gases combustibles, por ejemplo: 38 000 KJ/m^3 para gas natural (19, 23).

Este proceso desempeñó un importante papel en el pasado, sustituyendo a los combustibles derivados del petróleo, en los motores de combustión interna, pero cayeron en desuso después de la segunda guerra mundial debido a sus inconvenientes económicos y técnicos en comparación con los combustibles importados, realmente baratos (17, 24).

Desde mediados de los años 70, el aumento de los precios del petróleo ha renovado el interés por la tecnología de la gasificación de la madera, especialmente en los países que dependen de las importaciones del petróleo pero disponen de existencias adecuadas de madera u otro tipo de biomasa o, como en el caso de Suecia, en que se mantiene y desarrolla la tecnología como cuestión política (23).

Una característica en las zonas rurales, de los países en desarrollo, es que los motores de combustión interna se emplean mucho en instalaciones fijas, como las de producción de energía eléctrica y funcionamiento de bombas hidráulicas. Tecnologías como la gasificación, que permiten la utilización de tales motores con combustible de biomasa, tras una preparación mínima, son, por lo tanto de especial importancia (23).

El gas pobre consiste en un 40% aproximadamente de gases combustibles, principalmente monóxido de carbono, hidrógeno y algo de metano. El resto no es

combustible y consiste de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (Cuadro 3).

Se ha determinado que, en promedio, se necesitan 4 Kg de madera o 2 Kg de carbón vegetal para sustituir cada litro de gasolina por gas pobre (23).

Cuadro 3. Composición del gas procedente de gasógenos demadera y carbón (23, 24)

Componente	Gas de madera (% volumen)	Gas de carbón vegetal (% volumen)
Nitrógeno	50 - 54	55 - 65
Monóxido de carbono	17 - 22	28 - 32
Dióxido de carbono	9 - 15	1 - 3
Hidrógeno	12 - 20	4 - 10
Metano	2 - 3	0 - 2
Vapor de agua	11 - 22	11 - 22
Valor calórico del gas (KJ/m^3)	5 000 - 5 900	4 500 - 5 600

4. Licuefacción termoquímica

Es un medio de obtener derivados en forma líquida (aceites). La licuefacción de la madera consiste en un aumento de la relación carbono/oxígeno de los componentes mediante la adición de hidrógeno y no OH durante la hidrólisis, o bien eliminando oxígeno.

La base de este procerso es un tratamiento de alta presión y de alta temperqatura de astillas en presencia de gas hidrógeno y un catalizador (singas, tetralina, otros) para producir un aceite en vez de un gas. El aceite podría sustituirse, potencialmente por algunos usos que actualmente tiene el petróleo. Un aceite con valor calórico de 35 200 btu/kg (8 060.5 Kcal/Kg) puede obtenerse por reacción de los desechos de madera por 1 hora

En la actualidad, la tecnología de punta desarrolla un proceso conocido como "flash pyrolysis" el cual produce alrededor de 10% de carbón activado convirtiéndose el resto del material ligocelulósico en aceite de alto potencial energético, luego de haber permanecido por corto tiempo en un reactor que opera

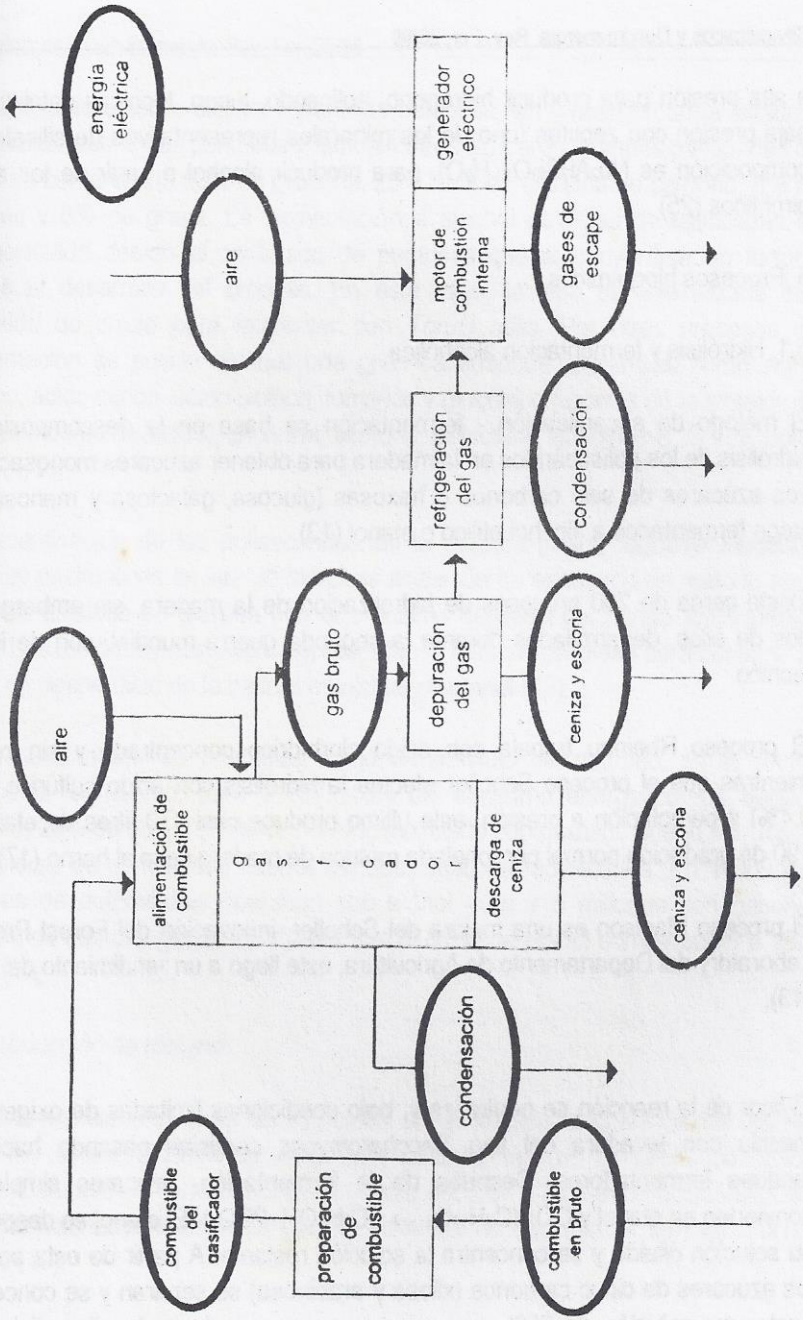

Figura 3. Esquema de un gasógeno de gas pobre (FAO, 1993)

a alta presión para producir hidrógeno, aplicando, luego, técnicas catalíticas de baja presión con zeolítas (uno de los minerales representativos de silicato cuya composición es $Na_2Al_2Si_3O_{10}.H_2O$), para producir alcohol a partir de los aceites pirolíticos (25).

5. Procesos bioquímicos

5.1. Hidrólisis y fermentación alcohólica

El método de sacarificación - fermentación se basa en la descomposición o hidrólisis de los polisacáridos en la madera para obtener azúcares monosacáridos Los azúcares de seis carbonos o hexosas (glucosa, galactosa y manosa) son luego fermentados a alcohol etílico o etanol (13).

Existe cerca de 200 procesos de hidrolización de la madera, sin embargo sólo dos de ellos, desarrollados durante la segunda guerra mundial, son de interés técnico.

El proceso Rheinau trabaja con ácido clorhídrico concentrado y sin presión mientras que el proceso Scholler efectúa la hidrólisis con ácido sulfúrico (0.2 - 0.4%) y percolación a presión, este último produce casi 170 litros de etanol de 190 de gradación normal por tonelada métrica de madera seca al horno (17).

El proceso Madison es una mejora del Scholler, innovación del Forest Products Laboratory del Departamento de Agricultura, éste llegó a un rendimiento de 222 l/t (13).

El licor de la reacción se neutraliza y, bajo condiciones limitadas de oxígeno, se mezcla con levadura del tipo *Saccharomyces cervisiae* pasando hacia los tanques fermentadores. Después de la fermentación, azúcares simples se convierten en etanol y CO_2 ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH+2CO_2$). El etanol se despoja de su solución diluida y se concentra la solución restante. A partir de esta solución los azúcares de cinco carbonos (xilosa y arabinosa) se separan y se concentran hasta una solución de 65% y se venden como complemento alimenticio o se destinan a la producción de furfural (13, 26).

No es posible obtener alcohol a partir de pentosas, sin embargo con la levadura *Torula utilis* dan, estas pentosas y también otros azúcares, grandes cantidades de levadura conteniendo 50% de proteína, 23 - 25 % de hidratos de carbono, 5% de cenizas y 6% de grasa. La fermentación a alcohol de lejías de latifoliadas es obstaculizada debido al contenido de pentosas que al convertirse en furfural impide el desarrollo del proceso. En este caso, la lejía es neutralizada con hidróxido de calcio para fermentar con *Torula utilis*. Por otros procesos de fermentación se puede obtener una gran cantidad de sustancias como ácido acético, ácido cítrico, ácido oxálico, fumárico y glucónico (usados en la síntesis de compuestos medicinales), glicerina, acetona, penicilina, vitaminas B, C y D, entre otros (4, 2).

La sacarificación de los polisacáridos de la madera puede lograrse mediante técnicas enzimáticas en vez de hidrólisis ácida. Se ha ensayado un método para convertir celulosa en glucosa con una enzima derivada del hongo *Trichoderma viride*. Los métodos enzimáticos representan la máxima promesa para convertir el papel de desperdicio de la basura municipal en etanol (13).

En Brasil el etanol es producido como un sustituto del petróleo, en el sector transporte representó, para 1 987, 18% del consumo energético. Es barato, además, 22% de etanol (96% de pureza) mezclado con gasolina puede ser usado en motores de combustión interna sin necesidad de modificarlos. En 1 989 4.5 millones de automóviles operaban con etanol puro y 5 millones con gasohol (mezcla de etanol y gasolina). Para 1 994 el costo de etanol correspondió a 18.5 USc/l (13).

5.2. Producción de metano

Como se mencionó en el punto 3.1., existe en Venezuela reservas de gas natural para 160 años, alcanzando éstas 5.4 billones de m^3, un 70% se ubica geográficamente en tierra firme, en el oriente del país y 30% en el occidente. Las cifras mencionadas indican un posible consumo de gas natural de casi $34x10^9$ m^3/año (10).

También se puede obtener metano mediante una reacción anáerobica, como producto de la descomposición de residuos vegetales, animales y humanos. Cuando existe buen funcionamiento, las bacterias convierten cerca del 90%, de los residuos en energía la cual está contenida en el biogás (aproximadamente 55

- 75 % de metano), que es utilizado como fuente de energía para cocinas e iluminación. Este gas no es tóxico, ni presenta olor (13).

No es un exabrupto intentar comparar la posible producción de gas natural de Venezuela con la producción de biogás en otros países, siendo el principal componente energético el metano en ambos casos.

En Danish, Dinamarca, por ejemplo, con 15 cooperativas de plantas de biogás se produce $24x10^5$ m^3/año; en Leningrado, Rusia, hay 8 estados agrícolas cuya producción de biogás sobrepasa los $2x10^9$ m^3/año (27), siendo éste uno de los países petroleros más importantes del mundo.

La aplicación del proceso de digestión anaerobia deriva en tres grandes ventajas, 1) la producción in situ de biogás, 2) el saneamiento ambiental y 3) la obtención de fertilizantes orgánicos.

La producción en el sitio, evita costos de transporte o construcción de gasoductos; el saneamiento ambiental se debe, en parte, al hecho de que el combustible en cuestión sea obtenido de desechos principalmente agropecuarios, sin obviar la disposición de desechos urbanos e industriales; y el valor o potencial como fertilizante depende, en parte, del contenido total del nitrógeno presente en las purinas y pirimidinas que se encuentran en los ácidos nucleicos, RNA y DNA de las células vegetales (28).

La producción de biogás o biometanación es una fermentación anaeróbica cuyas reacciones bioquímicas básicas, afectadas por microorganismos involucrados, son las de oxidación - reducción, donde un número de compuestos orgánicos son oxidados por la remoción de hidrógeno. El bióxido de carbono es reducido para proveer un oxidante para la metano bacteria. El hidrógeno producido puede ser reemplazado por alguno de los ácidos orgánicos y alcoholes como un reductor del bióxido de carbono. La metanobacteria crece favorablemente en cultivos puros de mezclas gaseosas de hidrógeno y bióxido de carbono (29), produciendo metano mediante la ecuación (30):

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + 253{,}3\ kJ$$

La proporción de los componentes químicos del material vegetal es variable y afecta el desarrollo de los procesos bioquímicos de la biometanación.

La celulosa y hemicelulosas se degradan rápidamente a carbohidratos simples mediante hidrólisis, no obstante, cuando estos compuestos están asociados con la lignina, pueden estar disponibles para los cultivos metanogénicos en proporciones menores a 50% (30) ya que ésta es poco susceptible a la hidrólisis y su degradación se logra sometiendo el material lignocelulósico a procesos de digestión alcalina.

Experiencias desarrolladas en el Laboratorio de Bioenergía de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la ULA, han demostrado que la demanda química de oxígeno (DQO), al final del proceso anaeróbico depende de la cantidad de celulosa contenida en la materia prima antes de comenzar el proceso (DQO disminuye cuando % de celulosa aumenta); además, un incremento en la proporción de ceniza de la materia prima causa aumento en el DQO de las aguas residuales del proceso anaeróbico.

Los balances de masa que pueden ejercerse y que permiten la evaluación del proceso en cuanto a las potencialidades metanogénicas de una materia prima se basan en el carbono total (CT) ya que 1g de CT equivale a 1.866 litro normal (0°C y 1 atmosfera) o a partir de la demanda química de oxígeno (DQO) ya que 1 kg de DQO equivale a 320 litro normal de CH_4 (31). Estas variables permiten caracterizar la producción de metano en la tecnología del biogás.

El tratamiento anaerobio de las complejas fibras poliméricas orgánicas puede ser explicado en tres etapas: 1) un grupo de microorganismos actúa sobre los substratos orgánicos; 2) por hidrólisis enzimática, los polímeros son convertidos en monómeros solubles disponibles para que otro grupo de microorganismos los transformen en ácidos orgánicos; 3) estos ácidos orgánicos solubles, principalmente compuestos por ácido acético, constituyen el substrato de las bacterias metanogénicas de la última etapa: "la metanación o producción de biogás".

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes, organismo que, con su apoyo financiero, hizo posible muchas de las pruebas necesarias para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. Asikainen, A. (1995). Energy wood harvesting technologies. Biofuels for sustainable development proocedings of the second international seminar. University of Joensuu, Faculty of Forestry, Finland. 43-46.

2. Babor, J. y Aznárez, J. (1959). Química general moderna. Manuel Martín y Cïa, Editores. Barcelona, España. 1144 p.

3. Casey, P. (1990). Pulpa y papel. química y tecnología química. Vol. 1. LIMUSA. México. 950 p.

4. De Cusa Ramos, J. (1969). Chimeneas. Ediciones CEAC, Barcelona, España. 253 p.

5. Devlin, R. (1976). Fisiología vegetal. Omega S.A., Barcelona, España. 517 p.

6. Doat, J. 1977. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. Bois et Fôrets des Tropiques. 172:33-55.

7. FAO (1993). El gas de madera como combustible para motores. FAO. Roma, Italia. 140 p.

8. Fengel, D.y Wegener, G. (1983). Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter and Gruyter. Germany.613 p.

9. Gamboa, B. (1997). Producción y caracterización de carbón activado a partir de ramas de pino caribe y teca. *Tesis de Postgrado. CEFEP-ULA. Mérida,* Venezuela.

10. González, S. (1993). Conversión directa de metáno con catalizadores a base de óxido de lantano. ULA, Facultad de Ciencias, Mérida, Venezuela. 146 p.

11. Hilly, G.y Chaussin, C. (1967). Curso básico de metalurgia y siderurgia. Editorial José Montesó. Barcelona, España. 240 p.

12. Johnson,H (1978). La Madera. Editorial Blume. Barcelona, España. 271 p.

13. Keep, M. (1994). Se explora la biomasa en Brasil. Opciones Vol 3: . 11-12 Editada por la ONU.

14. Kodja, B. (1970). Problemes de Thermodynamique et de gazodynamique. Masson et cie. Paris, France. 262 p.

15. Kollmann, F (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Instituto de investigaciones y experiencias al servicio de la madera. Tomo I. Madrid, España. 676 p.

16. Libby, E. (1983). Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo 1. Cía. Ed. Continental. México. 534 p.

17. Lombardo, C. (1995) Diccionario terminológico en química de la madera. Trabajo de ascenso. Fac. Ciencias Forestales. Mérida, Venezuela. 196 p.

18. Padilla, A. (1998) Experiencia personal adquirida en asistencia a congresos internacionales de Bioenergía. Mérida, Venezuela.

19. Petrff, J. y Doat, J. 1978. Pyrolyses des bois tropicaux. Influence de la composition chimique sur les produits de distillation. Bois et Fôrets des Tropiques. 177:51-64.

20. Petrucci, R. (1986). Química general. Fondo Educativo Interamericano. México. 692 p.

21. Rodriguez, R. y Franco, W. (1984). El Recurso forestal como fuente alterna de energia en América Latina. Instituto Forestal Latinoamericano (IFLA). Mérida, Venezuela. 63 p.

22. Sanderman, H. (1968). Las industrias químicas de la madera. Publicación Miscelánea N° 59 del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 88 p.

23. Sjostrom, E. (1993). Wood chemistry fundamentals and aplications. Academics Press, INC. New York. 293 p.

24. Stafford, D.; Hawkes, D.y Horton, R. (1981). Methane production from waste organic matter. CRC Press, Inc., Florida, USA. 285 p.

25. Tillman, D. 1981. Review of mechanisms associated with wood combustion. Wood Science. Vol 13, 4:177-184.

26. Ullmann´s. Enciclopedia of Industrial Chemistry. 1.986. Vol. A.6. Ceramics to Chlorohydrins. Editorial Publishers. New york. 576 p.

27. Weiland, P. y Taylhardat, L. (1996). Course of design of anaerobic reactors for treatment of wastes from farms, agroindustries and urban areas. CONICIT.UCV.Federal Research of Agriculture (FAL), Venezuela. 350 p.

28. Wilches, M. (1987). Bioingeniería. Tomo 1. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 334 p.

29. Wise, D. (1981). Fuel gas production from biomass Vol II. CRC press, Inc. Florida, USA. 280 p.

30. Woods, J. (1994). Bioenergy for development. Paper Nº 13. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia. 78 p.

31. Young, R. (1991). Introducción a las Ciencias Forestales. Limusa. México. 632 p.