

REVISIÓN DEL CONCEPTO DE BIOREFINERÍA

y oportunidades en el sector palmero

OVERVIEW OF A BIOREFINERY AND OPPORTUNITIES

in the Palm Oil Sector

AUTORES



K.C. Das,

The University of Georgia,
Athens GA, USA.
kdas@engr.uga.edu

J.A. García-Núñez,

Cenipalma, Bogotá, Colombia.

M. García-Perez

Monash University,
Victoria, Australia.

Palabras CLAVE

Biorefinería, aceite de palma,
planta de beneficio, biomasa.

Biorefinery, palm oil, oils plam
mills, biomass.

Traducido por Fedepalma.
Versión original en inglés
disponible en el Centro de
Documentación de Fedepalma.

RESUMEN



La biorefinería integrada es un marco conceptual tomado de la altamente desarrollada industria refinadora del petróleo. Las refineras del petróleo actualmente usan crudo fósil para producir una variedad de compuestos energéticos (e.g. gasolina y diésel), compuestos químicos (e.g. amonio y sulfuro) y materiales (e.g. plásticos y lubricantes) los cuales forman el actual complejo petroquímico. En una biorefinería, diferentes procesos de conversión de la biomasa están ligados unos con otros de tal manera que las salidas (outputs) de unos sean las materias primas de los otros. En su forma ideal, este sistema tomará diferentes tipos de biomasa como entradas y producirá múltiple productos como salidas, de tal forma que todos los productos tengan valor y no se generen residuos sin ningún valor. Algunas de las etapas del proceso incluye hidrólisis ácida, fermentación, gasificación, pirólisis, combustión, separación, etc. Dentro de los productos de una biorefinería se destacan entre otros: calor y potencia, líquidos combustibles, plásticos, solventes, adhesivos, lubricantes, pinturas, tintes, detergentes, papeles y tableros, etc. La biomasa tiene relativamente baja densidad energética (MJ/kg) y baja densidad volumétrica (kg / cm^3), por lo tanto, el transporte de este material a una biorefinería centralizada podría no ser económicamente viable si se tienen que cubrir grandes distancias. El establecimiento de una biorefinería en lugares donde ya se tenga biomasa disponible y donde se produzcan otros productos (por ejemplo una planta de beneficio del aceite de palma) es consecuentemente mas atractivo.

SUMMARY

The integrated biorefinery is a conceptual framework borrowed from the highly evolved petroleum oil refinery. Petroleum refineries presently use fossil crude to produce multiple energy (e.g. gasoline and diesel), chemical (e.g. ammonia and sulfur), and material products (e.g. plastics and lubricants) forming today's petrochemical industrial

complex. In a biorefinery, different biomass conversion processes are coupled with each other such that the output (byproduct) from one process becomes the input (feedstock) for another. In its ideal form, this system will take different types of biomass as inputs and produce multiple products as outputs, where all products have value and there are no valueless wastes produced. Some of the processing steps include acid hydrolysis, fermentation, gasification, pyrolysis, combustion, separation, etc. and products from a biorefinery can include heat and power, liquid fuels, plastics, solvents, adhesives, lubricants, paints, dyes, detergents, paper and board, solvents etc. Biomass has relatively low energy density (MJ/kg) and low bulk density (kg/m³) therefore material transport to a centralized biorefinery may not be economical if distances are large. Establishing biorefineries at locations where biomass conversion already exists for producing other products (e.g. at a palm oil mill) therefore is more attractive.



INTRODUCCIÓN

La biorefinería integrada es un marco conceptual prestado de la altamente evolucionada refinería petrolera. Hoy día, las refinerías petroleras usan crudo fósil para producir energía (por ejemplo, gasolina y diésel), químicos (como amoníaco y azufre), y otros productos (por ejemplo, plásticos y lubricantes) que forman el complejo industrial petroquímico. En una biorefinería, diferentes procesos de conversión se acoplan entre sí de tal manera que el subproducto de un proceso se convierte en materia prima para otro. En su forma ideal, este sistema toma diversos tipos de biomasa como materia prima para elaborar diferentes productos; todos los productos tienen valor y no se producen residuos sin valor. Algunos de los pasos del proceso incluyen hidrólisis ácida, fermentación, gasificación, pirólisis, combustión, separación, etc. y los productos de una biorefinería pueden incluir calor y energía, combustibles líquidos, plásticos, solventes, adhesivos, lubricantes, pinturas, tinturas, detergentes, papel y cartón, etc.

La biomasa tiene una densidad energética relativamente baja (MJ/kg) y baja densidad aparente (kg/m³); de manera que su transporte a una biorefinería centralizada puede no ser rentable si las distancias son muy largas. Por tanto, es más viable establecer biorefinerías en sitios donde la conversión de biomasa para elaborar otros productos ya existe (como una planta de beneficio de aceite de palma).

LABORATORIO NACIONAL DE ENERGÍA RENOVABLE DE ESTADOS UNIDOS – CONCEPTO DE BIOREFINERÍA

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) desarrolló conceptos con base en conversión biológica (Plataforma de azúcar) de biomasa y conversión térmica (Plataforma Syngas) de biomasa (Figura 1). La selección de plataforma se basa en las propiedades de la biomasa y en el producto final deseado. Por ejemplo, cuando la biomasa está predominantemente compuesta por azúcares o almidones, el procesamiento es bioquímico dentro de la plataforma de azúcares para productos como etanol, ácido poliláctico, energía y calor combinados (electricidad), etc. un ejemplo de este sistema es la Refinería Integrada de Bioproductos de Maíz (ICBR) establecida por un grupo liderado por la compañía Du Pont que procesa maíz para elaborar diferentes productos incluyendo 1,3 –propanediol (un químico básico en polímeros usado para textiles, tapetes etc.). Du Pont desarrolló una tecnología de fermentación que será usada para la producción de bio-propanediol dentro de la biorefinería.

Clasificación y evolución de las biorefinerías

En términos generales, las biorefinerías se dividen en tres fases según su grado de evolución (Fernando *et al.*, 2006). La Fase I es la menos flexible en términos



de uso de materias primas y variedad de productos (Ej. planta de etanol seco). La Fase II es más flexible, por ejemplo, plantas de etanol húmedo donde las mezclas de productos se pueden cambiar con base en la demanda externa, precios, etc.

Las biorefinerías de Fase III son las más avanzadas, y en la actualidad se encuentran únicamente a escala de investigación o como plantas piloto. Pueden usar una mezcla de biomasa y producir una amplia variedad de productos. Una clasificación dentro de las biorefinerías de Fase II es la “biorefinería de cultivo completo”, donde todas las partes de una planta se pueden usar para diferentes tipos de productos. La biomasa que ingresa a estas biorefinerías primero se separa mecánicamente en sus diferentes componentes, cada uno de los cuales ingresa a una línea de proceso. Hoy día en una planta de beneficio de aceite de palma existen varias líneas de productos incluyendo aceite, palmiste y, en algunas, energía y calor combinados, y metano. Sería necesario desarrollar productos adicionales con base en la biomasa no usada y disponible e integrarla al sistema de procesamiento. Dichos productos alternativos podrían resultar a partir de la gasificación de la biomasa para producir gas de síntesis (principalmente una mezcla de CO y H₂) que se reconstituye por medio de conversión catalítica para producir químicos como metanol. Otro ejemplo es la producción de xilosa a través de la hidrólisis ácida de racimos vacíos de palma (Rahman *et al.*, 2006). La xilosa se usa como sustrato para la producción de xilitol, un sustituto del azúcar, de alto valor.

Nosotros creemos que las plantas de beneficio de aceite de palma evolucionarán hacia biorefinerías integradas de “cultivo completo” basadas en procesos de conversión termoquímica. Por tanto, estas tecnologías se describen aquí con mayor detalle. Las siguientes

secciones dan cuenta de formas de procesamiento para obtener nuevos productos a partir de gas de síntesis y aceite de pirólisis (bioaceites). Un producto adicional en la conversión pirolítica es carbón que se puede usar como combustible, como enmienda del suelo o, después de mayor activación, como absorbente o catalizador. Las formas de procesamiento que se describen son: (a) *Productos a partir de gas de síntesis* (b) *Productos a partir de bioaceites crudos*, (c) *Reformación de vapores de pirólisis para producir hidrógeno*, y (d) *Conversión de carbón vegetal*.

Formas de procesamiento dentro de las biorefinerías termoquímicas

Conversión de gas de síntesis

La gasificación es una oxidación térmica a alta temperatura que produce gas de síntesis rico en monóxido de carbono e hidrógeno. Los componentes del gas de síntesis, H₂ y CO son los químicos básicos para la producción de una variedad de hidrocarburos mediante conversión catalítica (Higman, 2003). El gas de síntesis puede usarse directamente en turbinas de gas para producir electricidad o se puede convertir en productos como amoníaco, metanol y gases industriales (Figura 2). En los procesos que usan gas de síntesis para elaborar productos, la producción de gas de síntesis representa entre 50% y 75% del

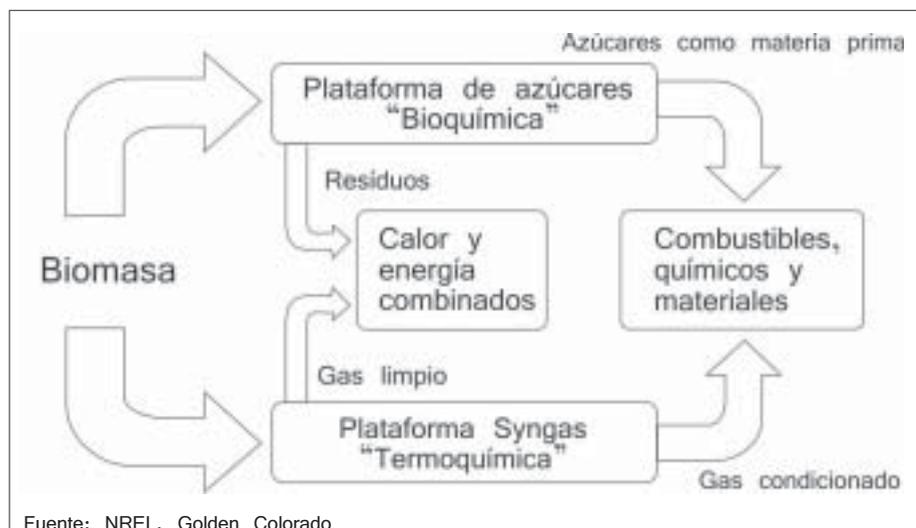
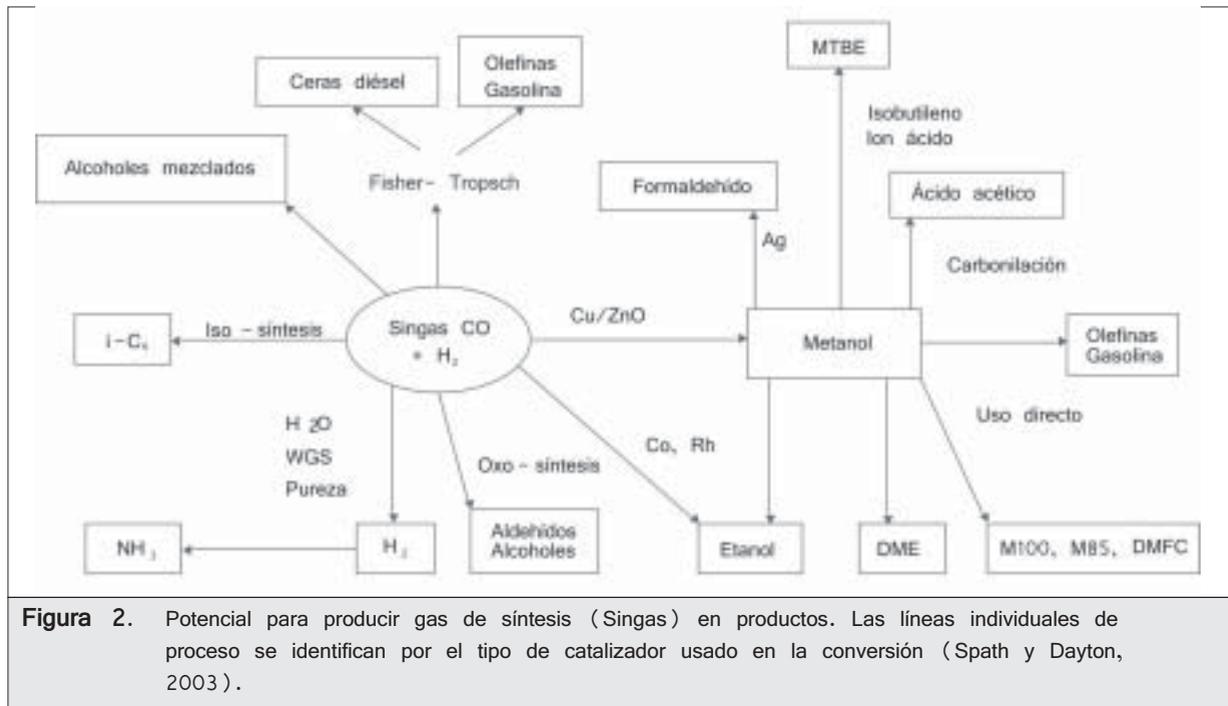


Figura 1. Concepto de una biorefinería de dos plataformas del Departamento de Energía y el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos.



costo del producto (Spath y Dayton, 2003). Por tanto, el uso de biomasa residual y cualquier mejora en los procesos puede llevar a tener impactos significativos en el costo total de producción.

Conversión de bioaceites

La pirólisis es la degradación térmica de biomasa en ausencia de oxígeno, produciendo aceite líquido (bioaceite crudo), carbón sólido y gases no condensables (CO , CO_2 , H_2 etc.). El bioaceite es de color café oscuro con una composición elemental similar a la de la biomasa a partir de la cual fue generado. Muchas de sus propiedades dependen del tipo de biomasa pirolizada y de los métodos de condensación y transformación empleados. Adicionalmente, debido a la alta reactividad química de los componentes en bioaceite, hay grandes cambios en las propiedades con el tiempo (desgaste del bioaceite). El mejoramiento del bioaceite, procesándolo para mejorar sus características de estabilidad es un área de investigación activa a nivel mundial, y se espera que conduzca a mejores propiedades de conversión y de almacenamiento. Fagnäs (1995) presenta una excelente descripción de los métodos de caracterización de bioaceites y la influencia de las materias primas en su composición química.

Las tecnologías que se encuentran en desarrollo para la transformación y el mejoramiento de los bioaceites incluyen filtración de gas caliente, desarrollo de micro-emulsiones (Ikura *et al.*, 1998), uso de solventes polares (Diebold y Czernik, 1997) y craqueo catalítico de vapor (Elliot *et al.*, 1987). Se están usando tecnologías de filtración con el fin de retirar partículas finas de carbón del bioaceite para reducir su reactividad. Se puede agregar solventes polares (metanol o etanol) para reducir su viscosidad y mejorar su estabilidad. Una vez estabilizado, el bioaceite puede ser materia prima para una amplia variedad de productos dentro de una biorefinería, lo que se ilustra conceptualmente en la Figura 3.

Un ejemplo de aplicación comercial de bioaceites es Ensyn Inc., que produce resinas naturales e ingredientes de resinas a partir de éste. Tales resinas se usan para la manufactura de productos de madera, particularmente de tipo OSB (Tableros de partículas orientadas) y contrachapada. Desde la década del noventa se han usado aceites de Ensyn comercialmente para aplicaciones industriales de calor. Otra compañía, Dynamotive Inc., está construyendo unas instalaciones para la cogeneración de bioaceites en Erie Flooring y Wood Products en West Lorne, Ontario. La planta de 2,5 MW combina la tecnología de pirólisis rápida de

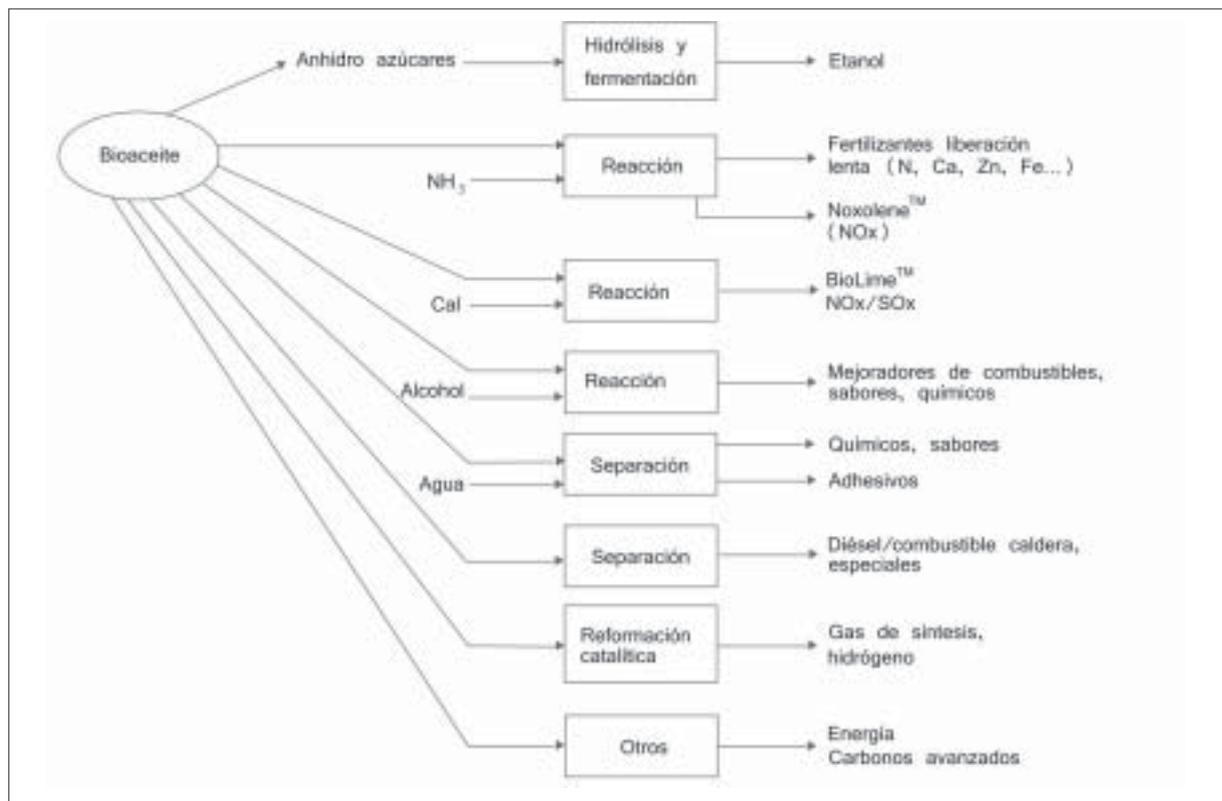


Figura 3. Productos de conversión de bioaceite (Radlein 1999).

Dynamotive Energy Systems con la turbina de gas OGT 2500 de Megellan Aerospace Orenda Division para producir electricidad.

Otro producto novedoso para aplicaciones de combustible fue desarrollado por RTI Inc. (Radlein 1999) y consta de bioaceite en reacción con alcoholes para formar compuestos secundarios que mejoran la estabilidad y el valor calorífico de los bioaceites y reducen la acción corrosiva y la viscosidad. La reacción del bioaceite con etanol resulta en un aumento significativo en la fracción de destilación del bioaceite. Las aplicaciones para estos productos incluyen: sabores, químicos, mejoradores de octano, solventes, resinas y barnices. Las reacciones del bioaceite con amoníaco, urea y otros aminoácidos han demostrado ser efectivas como fertilizantes de liberación lenta.

Producción de hidrógeno

Estados Unidos y muchos otros países aspiran a que un día los principales sistemas de energía para hogares y transporte estén basados en hidrógeno.

Además, H₂ es una materia prima importante usada en la producción de fertilizantes agrícolas, lo que hace que su producción en forma sostenible a partir de una fuente renovable como biomasa sea muy atractiva. El hidrógeno puede ser producido a través de pirólisis o gasificación de biomasa (Evans *et al.*, 2003) seguido por la reformación de la fracción de vapor (Figura 4). La pirólisis seguida por la reformación de vapor permite la producción de carbón vegetal y H₂ (Evans *et al.*, 2003). En la actualidad, Eprida, Inc (<http://www.eprida.com>) una compañía privada, está llevando a cabo una demostración pre-comercial de tecnologías de pirólisis para la producción de carbón vegetal-H₂ en la Universidad de Georgia en Athens GA.

Conversión de carbón vegetal

La principal ventaja del carbón vegetal sobre el carbón fósil es que prácticamente no contiene azufre o mercurio, y tiene bajas concentraciones de nitrógeno y cenizas. Estas propiedades lo hacen atractivo para aplicaciones de gasificación y combustión. Debido a

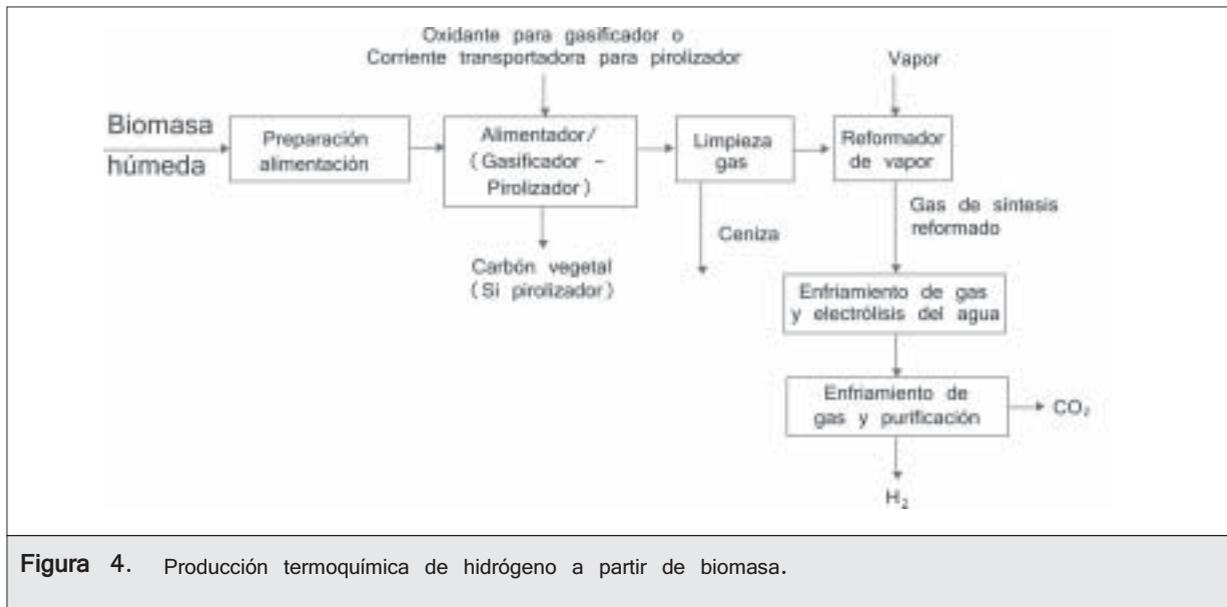


Figura 4. Producción termoquímica de hidrógeno a partir de biomasa.

su inherente porosidad, los bio-carbones producidos a partir de carbón vegetal normalmente tienen superficies más altas y son excelentes absorbentes para tratamiento de aire y agua (Dabrowski *et al.*, 2005).

El carbón vegetal también puede ser procesado para formar un gas de síntesis bajo en alquitrán por medio de un proceso convencional de gasificación. Como se dijo, este gas de síntesis limpio se puede usar en muchas aplicaciones, como la conversión catalítica de químicos. El carbón vegetal también tiene muchas aplicaciones en la agricultura. Por ejemplo, la investigación y la práctica han demostrado que, aplicado al suelo, puede mejorar las propiedades de éste, mejorar el crecimiento de la planta, y servir como una forma de secuestro de carbono del suelo a largo plazo (Glaser *et al.*, 2002).

Brasil, el mayor productor de carbón vegetal del mundo, con 28% de la producción global, lo usa como reductor en su industria siderúrgica. Ese país ha conservado sus industrias basadas en carbón vegetal en gran parte debido a sus grandes depósitos de hierro y pocas minas de carbón. El carbón vegetal representa entre 60% y 70% de los precios de producción del hierro fundido (Muyler *et al.*, 1999). Se obtiene mayor valor cuando se usa como combustible para cocina, especialmente en la cocción lenta de carnes.

Ejemplo de biorefinería forestal

La industria de pulpa y papel en Norteamérica ha comenzado una transformación hacia el desarrollo de una biorefinería forestal como la siguiente fase evolutiva del complejo de pulpa y papel (Thorpe y Raymond, 2004). Actualmente, los aserraderos toman la madera y producen pulpa y papel dejando residuos de madera y licor negro (un subproducto líquido rico en químicos y lignina) como subproductos. La mayoría de los residuos de madera se queman en el sitio para producción de calor y energía. Los químicos del licor negro se recuperan antes de quemarlo en las calderas de recuperación. La gasificación del licor negro es un avance que está comenzando a ser implementado.

En una biorefinería forestal habrá tres programas novedosos: [1] Productividad forestal sostenible, [2] Extracción de valor antes de producción de pulpa, y [3] Nuevas secuencias de valor de residuos y licores gastados en producción de pulpa. La extracción de valor antes de la producción de pulpa incluye la extracción de agua caliente a baja presión y la separación de azúcares y ácido acético. Los azúcares se pueden fermentar para producir químicos de alto valor o etanol combustible (valor total estimado de US\$ 3.300 millones anualmente) (Thorpe y Raymond, 2004). Después de convertir la madera en pulpa, los licores residuales se gasifican y se usan para generar



energía eléctrica (valor de US\$ 3.800 millones anualmente) o se procesan más para la producción de combustibles y químicos (valor de US\$ 5.500 millones anualmente). En esta biorefinería forestal, además de la pulpa convencional (valor de US\$ 5,5 millones anualmente), se lograrían ingresos adicionales de US\$ 8.800 millones (\$3.300+\$5.500 millones mencionados anteriormente) conduciendo a una utilización completa de toda la biomasa al valor actual más alto posible (Thorp y Raymond, 2004). Una forma de producción similar a esta se puede lograr dentro de la industria del aceite de palma.

Investigación hacia el desarrollo de una biorefinería termoquímica de aceite de palma

La industria del aceite de palma está buscando activamente usos para los subproductos de las plantas de beneficio, incluyendo el tratamiento de efluentes de planta de beneficio para producir metano para recuperación de energía, compost a partir de racimos vacíos combinados con efluentes y certificados de créditos de carbono por el uso de renovables. Estimativos del valor económico de estos productos para una planta que procesa 30 toneladas de racimos vacíos por hora, muestran que los ingresos superarían los US\$ 2 millones al año (Schuchardt *et al.*, 2006).

Los productos energéticos (generación de energía eléctrica y producción de biodiésel) generalmente son de alto volumen, con valor moderado a bajo por unidad. Muchas plantas de beneficio ya están usando estas tecnologías como lo indican Husain *et al.* (2003), quienes reportaron plantas de beneficio generando entre 0,4 y 1,1 MW_e. El uso de energía para las necesidades de la planta y la exportación a la red eléctrica puede generar ingresos significativos para la operación. El biodiésel es un combustible ampliamente usado y se puede producir a partir de aceite de palma a través de la transesterificación. Típicamente, el costo de su producción se ve en gran parte afectado por el costo del aceite vegetal que se usa como materia prima. Estimativos en Estados Unidos indican que a precios de aceite de palma de US\$ 410/tonelada (MYR 1470/tonelada o ACP 985,000/tonelada), el costo total de producción de biodiésel sería aproximadamente \$2,40/gal (US\$ 0,63/L) (Coltrain, 2002). A medida que el precio del diésel

de petróleo siga aumentando, el biodiésel proporcionará una fuente importante de ingresos para las plantas de beneficio. Ejemplos de productos de alto valor y bajo volumen incluyen agentes tensoactivos y nutracéuticos, como el caroteno (Hama y Ohbu, 2006).

En el año 2005 los autores comenzaron a explorar la pirólisis de subproductos de plantas de beneficio de aceite de palma para generar productos con valor agregado (García-Núñez, 2005). Se sabe que en una planta de beneficio típica los productos que se tienen como objetivo, o sea aceite de palma y palmiste, representan aproximadamente 20% y 4,5% (peso húmedo) de racimos de fruta fresca (RFF) respectivamente. Esto implica que más del 75% de la masa que ingresa permanece como residuos sin usar. El residuo sólido consta principalmente de racimos vacíos (RV) o tusas (20% - 24% de RFF), fibra (13% de RFF), y cáscaras (4% - 5% de RFF). Una planta de beneficio de capacidad promedio (60 toneladas de RFF/h) puede producir hasta 100.000 toneladas de residuos sólidos anualmente. La fibra normalmente se usa como combustible en calderas que producen vapor, y las cáscaras se usan como cobertura de bajo valor en las vías internas de la plantación. Después de usar toda la fibra requerida para producir vapor, una planta de beneficio típica todavía tiene un 30% de biomasa disponible como RFF, que puede tener usos de mayor valor.

El trabajo inicial ha caracterizado a la biomasa residual generada en una planta de beneficio típica en Colombia y se ha encontrado que los contenidos de celulosa varían entre 30 y 45% (Tabla 1). En fibra y RFF, el total de celulosa y hemicelulosa representa 50% y 65% de la masa total, respectivamente. La conversión de estas puede conducir a un muy alto rendimiento de bioaceite mediante la pirólisis. En contraste, por su alto contenido de lignina, las cáscaras son una excelente fuente de energía. El valor calorífico de los subproductos está alrededor de 1.600 kCal/kg para RFF, 2.700 kCal/kg para fibra y 4.000 kCal/kg para cáscaras. Las cáscaras se pirolizan para formar matrices de carbón vegetal que pueden ser activadas para producir absorbentes de alta calidad para aplicaciones industriales. Otras propiedades químicas de la biomasa se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina (lignina detergente ácida) (libre de ceniza) en muestras

	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)
Cáscaras	49.58 ± 0.15	30.28 ± 0.14	12.72 ± 0.05
RV	10.23 ± 0.08	44.97 ± 0.44	19.92 ± 0.40
Fibra	21.79 ± 0.01	33.21 ± 0.02	16.58 ± 0.06

Fuente: García-Núñez, 2005.

Tabla 2. Composición elemental y análisis aproximado de cáscaras y fibra de palma de aceite

Análisis elemental	Cáscara	Fibra
Carbono (%)	52,5 - 55,4	48,7
Hidrógeno (%)	5,7 - 6,4	6,3
Nitrógeno (%)	0,37 - <1	<1
Oxígeno (%)	37,9 - 44,4	44,4
<i>Análisis aproximado</i>		
Humedad (%)	8,40 - 11,2	5,2
Materia volátil (%)	68,9 - 80,8	79
Ceniza (%)	1,9 - 2,6	5,2
Valor calorífico bruto (MJkg ⁻¹)	19,10 - 22	18

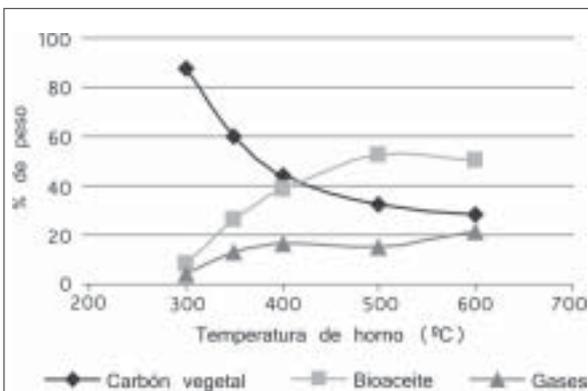
Fuentes: Gómez *et al.*, 2004; Guo y Lua, 2000; Guo y Lua, 2001; Islam *et al.*, 1999; Lua y Guo, 1998; Kawser y Ani, 2000.

Figura 5. Distribución de productos de la pirólisis de cáscaras de palma de aceite en un reactor a escala piloto.

La pirólisis de la biomasa residual a varias temperaturas entre 300°C y 600°C muestra que la producción de bioaceites se maximiza a 500°C (Figura 5). Los productos se caracterizaron en detalle y los resultados se presentan en García-Núñez *et al.* (2006). Estos resultados están siendo usados, además, para incrementar sistemas de conversión basados en pirólisis, a escala piloto y a escala completa, en o cerca de una planta de beneficio en operación.

CONCLUSIONES

La conversión de operaciones de aceite de palma existentes a biorefinerías integradas que producen una amplia variedad de productos de alto valor, eliminando al mismo tiempo subproductos que consumen ingresos, es una oportunidad que puede convertirse en realidad. Los autores creen que la industria está lista para explotar esta oportunidad con base en la variedad de investigación, desarrollo e implementación de novedosas tecnologías disponibles en la actualidad. Creemos que un esfuerzo conjunto dentro de la industria que evalúe el impacto económico en los nuevos productos ayudaría a guiar los desarrollos futuros. Se espera que los productos desarrollados a corto plazo sean una combinación de productos de bajo valor y alto volumen y de alto valor y bajo volumen. Utilizando un modelo similar al de la Biorefinería Forestal (Thorp y Raymond, 2004), la biorefinería de aceite de palma podría implementar una refinería termoquímica que produzca aceite de palma, palmiste, biodiésel, combustibles Fischer-Tropsch, calor y energía, y productos avanzados como agentes tensoactivos y químicos.



BIBLIOGRAFÍA

- Coltrain, D. 2002. Biodiesel – is it worth considering. Report from Kansas Cooperative Extension Service, Kansas State University, Manhattan, KS 66506.
- Dabrowski, A; Podkoscielny, P; Hubicki, Z; Barczak, M. 2005. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon – A critical review. *Chemosphere*, 58(8): 1049–1070. February, 2005.
- Diebold J.P; Czernik S. Additives to Lower and Stabilize the Viscosity of Pyrolysis Oils during Storage. *Energy & Fuels*, 11, 1997, p. 1081–1091.
- Elliot D.C; Baker E. Hydrotreating Biomass Liquids to Produce Hydrogen Fuels. In: *Energy from Biomass and Wastes*. X. Klass D. Ed. IGT Chicago, 1987, p. 765–784.
- Evans R; Boyd L; Elam C; Czernik S; *et al.* 2003. Hydrogen from biomass–catalytic reforming of pyrolysis vapors, FY 2003 Progress Report, National Renewable Energy Laboratory.
- Fagernas L. 1995. Chemical and Physical Characterization of Biomass–Based Pyrolysis Oils. Literature Review, *VTT Research Notes*.
- Fernando, S; S. Adhikari, C; Chandrapal; N. Murali. 2006. Biorefineries: Current status, challenges, and future direction. *Energy and Fuels*, 20: 1727–1737.
- García–Núñez, J.A. 2005. Determination of kinetic constants and thermal modeling of pyrolysis of palm oil mill solid wastes. Unpublished MS Thesis, The University of Georgia, Athens GA 30602, USA.
- García–Núñez, J.A; M. García–Perez; K.C. Das. 2006. Determination of kinetic parameters of thermal degradation of palm oil mill by products using thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry. *Transactions of the ASABE* (In review).
- Glaser, B; J. Lehmann; W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biol Fertil Soils*, 35: 219–230.
- Gómez, A; *et al.*, Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción de la palma de aceite: Tecnologías y perspectivas (Thermochemical transformation of residual biomass from palm oil extraction process: Technologies and prospects). *Palmas* (Colombia), 2004. 25. (Especial): p. 388 –397.
- Guo, J. and A.C. 2000. Lua, Kinetic study on pyrolysis of extracted oil palm fiber. Isothermal and non–isothermal conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 59: p. 763–774.
- Guo, J; A.C. Lua. Preparation and characterization of adsorbents from oil palm fruit solid wastes. *Journal of Oil Palm Research*, 2000. 12(1): 64 – 70.
- Hama, I; K. Ohbu. 2006. New technology and development on the use of palm oil in oleochemical industries. International Oil Palm Conference, Nusa Dua, Bali, Indonesia. June 19–23, 2006.
- Higman C; der Burgt M. 2003. *Gasification GPP* Elsevier.
- Husain, Z; Z.A. Zainal; M.Z. Abdullah. 2003. Analysis of biomass–residue–based cogeneration system in palm oil mills. *Biomass and Bioenergy* 24 (2003) 117 – 124
- Ikura M; Slamak M; Sawatzky H. 1998. Pyrolysis Liquid in Diesel Oil Microemulsions. *U.S.Patent* 5.820.640.
- Islam, M.N; R. Zailani; F.N. Ani. 1999. Pyrolytic oil from fluidized bed pyrolysis of oil palm shell and its characterization. *Renewable Energy*. 17: 73–84.
- Kawser, Md., J; F.N. Ani. 2002. Oil palm shell as a source of phenol. *Journal of Oil Palm Research*. 12(1): 86 – 94.
- Lua, A.C; J. Guo. 1998. Preparation and characterization of chars from oil palm waste. *Carbon*. 36(11): 1663 – 1670.
- Muylaert, M. S; Sala, J; de Freitas, M.A. V. 1999. Charcoal's production in Brazil – process efficiency and environmental effects. *Renewable Energy*, 16(1–4) pt 2, Jan–Apr, 1999. 1037–1040
- Radlein D. The Production of Chemicals from Fast Pyrolysis of Bio–Oils. *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*. Eds. Bridgwater *et al.* 1999, 164–188, CPL Press.
- Rahman, S.H.A; J.P. Choudhury; *et al.* 2006. Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. *Bioresource Technology* (Article in Press).
- Schuchardt, F; K. Wulfer; D. Darnoko; T. Herawan. 2006. Sustainable wastewater (POME) and waste (EFB) management in a palm oil mill by a new process. International Oil Palm Conference, Nusa Dua, Bali, Indonesia. June 19–23, 2006.
- Spath P.L; Dayton D.C. 2003. Preliminary Screening–Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with emphasis on the potential for Biomass–Derived Syngas, National Renewable Energy Laboratory 2003 available on line at: <http://www.osti.gov/bridge>.
- Thorp, B; D. Raymond. 2004. Forest biorefinery could open door to bright future for P&P industry. *Paper Age*, Oct 2004, 16–18.