

CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO EN LA INTEGRACIÓN DE PROCESOS PARA LA CONVERSIÓN DE FÁBRICAS DE AZÚCAR EN BIOREFINERÍAS

CONSIDERATIONS FOR RISK ANALYSIS IN THE PROCESS INTEGRATION TO THE CONVERSION OF SUGAR FACTORIES IN BIOREFINERIES

Carlos Ernesto Gordis García^{1}, Meilyn González Cortés¹, Yaillet Albernas Carvajal¹, Rubén Espinosa Pedraja¹, Viviana Quintero Dallos² y Erenio González Suárez¹*

¹ Centro de Análisis de Procesos, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Desarrollo Sostenible en Industrias y Energía. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Recibido: Junio 25, 2014; Revisado: Julio 24, 2014; Aceptado: Agosto 30, 2014

RESUMEN

En la actualidad existe un gran esfuerzo para lograr la factibilidad económica del uso de la biomasa lignocelulósica como una nueva fuente de azúcares para la producción de etanol. La no factibilidad de estos procesos se debe fundamentalmente al costo de las enzimas y al no aprovechamiento de coproductos que se generan en el pretratamiento de la biomasa. La evaluación técnica, económica y ambiental de esquemas de biorefinería es complicada debido a la incertidumbre en aspectos como la materia prima, los precios de la energía y el producto final, costos de inversión, operación y riesgos de las tecnologías. En el trabajo, se dan las pautas para guiar el trabajo hacia la integración de procesos y la valoración de los coproductos en un esquema de biorefinería considerando en ellos los riesgos que la integración implica lo que conduce a la factibilidad de los procesos que emplean la biomasa para la obtención de biocombustibles. Se muestra un esquema de procesos integrados que intercambia recursos materiales y energéticos.

Palabras clave: Biomasa, integración de procesos, biorefinería, etanol, bagazo, caña de azúcar

ABSTRACT

There is currently an effort to achieve economic feasibility of using lignocellulosic biomass as a new source of sugars for ethanol production. The infeasibility of these processes is mainly due to the cost of enzymes and no use of co-products that are generated in the pretreatment of biomass. The technical, economic and environmental assessment of different biorefinery schemes is complicated by the uncertainty in areas such as raw material to be used, the prices of energy and the product, investment costs, operation and risks of new technologies.

In this paper, the guidelines show how process integration and assessment of co-products in the biorefinery scheme leads to the feasibility of the processes that use biomass for biofuels are given. A scheme of integrated processes that exchange materials and energy resources is displayed, the scheme refers to the cane industry sugar generated as major products juice, bagasse and molasses and other products derived processes in annexes found among torula, biogas, CO₂, furfural, lignin, and electricity on the basis of environmental management.

Key words: Biomass, process integration, biorefinery, ethanol, sugar cane

1. INTRODUCCIÓN

El esquema de una biorefinería se basa en el uso eficiente de la biomasa lignocelulósica como materia prima para la producción integrada de combustibles, energía y productos químicos. Una fábrica en la que se genere o procese biomasa lignocelulósica puede convertirse en una biorefinería teniendo en cuenta que las fracciones químicas principales de estos materiales son celulosa, hemicelulosa y lignina, y que en teoría, son susceptibles de separación en lo que se llama un esquema de fraccionamiento integral.

El fraccionamiento óptimo de la biomasa para lograr el máximo aprovechamiento de sus componentes presupone una integración eficiente en un complejo productivo de modo que esto conduzca a la factibilidad técnica, económica y ambiental de los procesos y productos involucrados; en esta investigación se crean los antecedentes para lograr esto.

A su vez, en el análisis de los procesos y tecnologías involucradas en el fraccionamiento están presentes diferentes riesgos que pueden presentarse de muchas formas intangibles, si se conocen, consideran y gestionan, se puede cubrir o minimizar el efecto negativo y en algunos casos verse beneficiado. Cada evento no deseado tiene un determinado factor de riesgo propio, el cual puede determinarse a través del Análisis de Riesgos.

Existen diferentes herramientas o métodos para realizar un análisis de riesgos dentro de los métodos más exitosos se encuentra el HAZOP (Hazard and Operability Analysis) o AFO (Análisis Funcional de Operabilidad, en español), es un método de análisis de riesgo que se empezó a utilizar ampliamente en plantas industriales en 1963. A partir de ese momento la metodología se ha usado con éxito durante muchos años en una gran variedad de procesos y de aplicaciones. El HAZOP se basa en dos premisas fundamentales:

- El proceso funciona bien cuando sus parámetros de operación trabajan de acuerdo con los valores y normas establecidas.

- Los accidentes y problemas surgidos en su desarrollo son generados por las desviaciones de estos valores.

Por tanto, el método consiste en analizar, para cada parámetro de operación, las desviaciones que pueden realizarse, sus causas y consecuencias dentro de la integración de procesos así como interpretar y dar cumplimiento a los conceptos básicos relacionados con la gestión ambiental.

Atendiendo a lo anterior si se toma como caso de estudio una fábrica de azúcar a la que pueden integrarse diferentes procesos como los que se muestran en la figura más adelante, se pueden generar alternativas de integración las cuales se diferenciarán en aspectos tales como los recursos que intercambian, los productos que se obtienen, la factibilidad económica, así como el impacto ambiental que en cada una se genera y por ende los riesgos que en ellas puedan identificarse.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La integración de procesos es una herramienta que utilizada y aplicada de forma adecuada y sistemática en los procesos de fraccionamiento de la biomasa, debe conducir a un aprovechamiento integral de la misma, a través de esta se pueden identificar las oportunidades de aprovechamiento de los recursos materiales y energéticos del proceso en el propio proceso o en otros aledaños a los que puede integrarse el proceso principal. Esta herramienta permite identificar los objetivos globales de eficiencia y encontrar la estrategia óptima para llevarlo a cabo, estos objetivos pueden ser: minimización de los requerimientos energéticos, minimización de la generación de residuales, maximización de la eficiencia del proceso, optimización de un proceso ó de una etapa de éste, etc. Puede aplicarse durante el diseño de las plantas o en plantas que ya se encuentren funcionando y que no fueron diseñadas teniendo en cuenta los criterios de la integración de procesos.

Por lo general los métodos y herramientas de integración incluyen segregación, mezcla y reciclaje de flujos, intersección con equipos de separación, cambios en las condiciones de diseño y operación de los equipos, sustitución de materiales, así como cambios en la tecnología. En (Dunn, 2000) y (Garrison, 2000), pueden encontrarse varios métodos y herramientas a través de los cuales pueden integrarse los procesos y aprovechar sus recursos materiales y energéticos.

Las herramientas de integración pueden servir de guía para el análisis y diseño de una biorefinería, dado los elementos fundamentales que hay que cubrir en la biorefinería en los que juega un papel fundamental la selección y desarrollo de las tecnologías para lograr el fraccionamiento de la biomasa y obtener los productos.

En esta investigación, además se pretende realizar un análisis de riesgo y seguridad que muestre las potencialidades para mitigar limitaciones en la integración de procesos, en muchos casos, el riesgo no puede determinarse con exactitud. El análisis de riesgos es una parte importante de la valoración de riesgos, esta incluye el análisis y la evaluación del riesgo. El análisis suministra la información requerida para la evaluación del riesgo, que a su vez permite emitir juicios de valor sobre la seguridad de un producto o planta técnica.

La gestión ambiental es aquella parte de la gestión encaminada a lograr la máxima racionalidad en el proceso de decisión relativo a la conservación, defensa, protección y mejora del medio ambiente.

La gestión ambiental es por tanto una parte inherente de todos los Modelos de Excelencia ya que está relacionada con el impacto de las organizaciones con su Comunidad y con las partes interesadas. La gestión ambiental es también uno de los tres pilares de la gestión sostenible: resultados a largo plazo con respeto ambiental y responsabilidad social.

En el esquema de una biorefinería se involucran varios procesos para obtener diversos productos, con seguridad estos procesos comparten recursos comunes como son el agua, la energía térmica y de potencia, así como que en las etapas de un proceso se obtienen productos intermedios que constituyen materia prima para la obtención de otros; es de esta forma que los procesos están estrechamente vinculados y lograr un manejo eficiente de los recursos que ellos intercambian es lo que hace que estas tecnologías sean viables y sostenibles.

Del fraccionamiento de la biomasa pueden obtenerse varios productos, por ejemplo de la celulosa pueden derivar polímeros celulósicos, como los que se utilizan diariamente con el uso del papel de diferentes tipos. Además, la celulosa es susceptible de hidrolizarse hasta sus monómeros constituyentes para obtener medios fermentables para la producción de etanol, el cual a su vez tiene múltiples usos (Hamelinck y Faaij, 2006); (Clark, 2007).

En la literatura se han publicado una recopilación de métodos para el fraccionamiento de la biomasa que, atendiendo a la principal fracción del material que se degrada, distingue entre métodos de deslignificación (solubilizan lignina) y métodos de hidrólisis (solubilizan polisacáridos), (Huang et al., 2008).

Es fundamental discernir entre cuales y cómo han de ser las etapas de fraccionamiento integral en función de los productos que se deseen obtener, de esto también dependerá los niveles de integración que podrán lograrse en el esquema completo.

La evaluación técnica, económica y ambiental de diferentes esquemas de biorefinería es complicada debido a la incertidumbre que existe en aspectos como la materia prima a emplear, los precios de la energía y el producto final, costos de inversión, operación y riesgos de las nuevas tecnologías.

Es por lo anterior que algunos métodos y enfoques han sido desarrollados para mejorar la decisión estratégica. Algunos ejemplos importantes son:

- Tamizado sistemático de esquemas de biorefinería que trabajen con procesos integrados.
- Evaluación de la cadena de mando y suministro.
- Síntesis óptima del esquema de biorefinería integrada.
- Evaluación y análisis del ciclo de vida del esquema de biorefinería.
- Evaluación de escenarios futuros de biorefinería considerando la integración de procesos.
- Decisión bajo incertidumbre de acuerdo a los precios y demanda futura de materias primas y productos.
- Análisis de los riesgos tecnológicos y operacionales en la biorefinería.

Debido a que los grados de libertad en el diseño de la biorefinería y la selección de los componentes son numerosos, las características energéticas de los diferentes esquemas varían. La selección de la materia prima, los procesos y productos finales determinarán las características energéticas de cada esquema. La selección de todos estos parámetros es una tarea compleja con más grados de libertad que las propias situaciones de diseño.

En relación a la materia prima, como se ha explicado existe una gran variedad de biomasa que puede ser empleada como materia prima en estos procesos, lo que a su vez genera una plataforma de tecnologías con una variedad de productos también con diverso rendimiento. La combinación de productos que se pueden obtener en una biorefinería depende del tipo de materia prima, su composición y consistencia, la localización de la planta y los precios y demandas del producto.

En este campo se ha realizado un amplio trabajo experimental a nivel de laboratorio, y en la literatura científica se puede encontrar información que puede guiar al ingeniero de procesos en el análisis, síntesis, diseño y optimización de un esquema de biorefinerías y tener en cuenta sus posibilidades de integración material y energética eficiente, (Wright et al., 2007); (Piccolo y Bezzo, 2009); (El-Halwagi et al., 2013). Un esquema de biorefinería integrada debe responder a las siguientes cuestiones:

- Estado actual de las biorefinerías.
- Oportunidades estratégicas para una biorefinería si se parte de varias disponibles.
- Características principales (químicas, biológicas, térmicas, mecánicas) de las varias plataformas de procesos que se incluyen en la biorefinería.
- Análisis y diseño del esquema de biorefinería para que puedan ser maximizadas las posibilidades de integración y minimizados los riesgos asociados.
- Análisis de incertidumbre que incluya los cambios futuros en el mercado en el análisis y diseño del esquema de biorefinería y realizar la selección del esquema óptimo.
- Impacto del uso del agua y la energía térmica y de potencia, así como otras políticas en el diseño y selección del esquema de biorefinería.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un esquema que de forma general muestra la integración e intercambio de recursos entre los procesos aparece en la figura 1. En la misma se muestra un esquema integrado para la obtención de etanol y otros productos a partir de biomasa lignocelulósica. Se muestra que a partir de la caña se obtienen como productos principales jugo que puede ser empleado en la fabricación de azúcar y etanol; bagazo que puede ser empleado en la producción de electricidad y etanol y miel que es destinada también a la obtención de etanol, así como otros productos que se derivan en procesos anexos entre los que se encuentran la torula, el biogás, CO₂, el furfural y la lignina. (González et al., 2013).

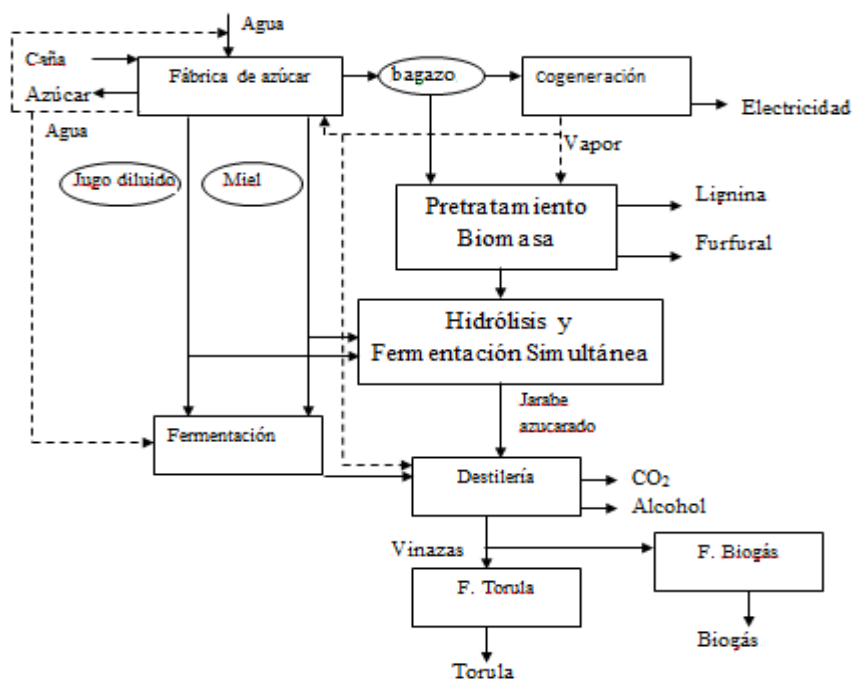


Figura 1. Esquema de biorefinería que produce azúcar, etanol, electricidad y otros productos a partir de biomasa

Una de las principales barreras económicas para el desarrollo de la “biorrefinería lignocelulósica” es la resistencia de la matriz lignocelulósica a su degradación. La investigación en este campo es muy amplia y diversa y se genera con rapidez, pero suele centrarse en aspectos particulares, aunque diversos autores postulan esquemas más o menos complejos para fraccionamientos por etapas de distintos tipos de biomasa, (Pavlecic et al., 2010); (Cardona et al., 2010).

Cuando se trata la temática de la biorefinería existen varios elementos que deben considerarse y que guardan una estrecha relación con las oportunidades de integración de procesos que pueden identificarse en cualquier caso de estudio. Estos elementos se muestran a continuación y en la figura 2, se resumen de forma esquemática las posibilidades de una biorefinería (Kamm, 2004); (Sanders et al., 2007). Los elementos son los siguientes:

- **Biomasa como materia prima:** puede ser diversa la materia prima empleada entre las que se encuentran biomasa forestal, residuos agrícolas y orgánicos, flujos de residuos agrícolas como algas, plantas lignocelulósicas, árboles de madera blanda y dura.
- **Procesos de conversión:** el proceso de conversión de la biomasa a producto final involucra varios pasos y tecnologías que hacen la biorefinería a gran escala una industria en sí misma. Como ejemplos se pueden citar la gasificación, fermentación, hidrólisis, evaporación, destilación, catálisis, pirólisis, torrefacción y secado (Rijkens, 1984); (Huang et al., 2008). Esto significa que el diseño y optimización de una biorefinería tiene un alto impacto en las características energéticas y por ende en las oportunidades para la integración de procesos.

- **Producto final:** Como se explicó anteriormente, existe una gran variedad de productos que pueden obtenerse en una biorefinería. Algunos son nuevos productos para los cuales el mercado futuro es aún desconocido. A su vez, pueden obtenerse productos en grandes cantidades o en pequeña escala (productos de alto valor agregado o productos químicos especiales). Ejemplos de productos que se obtienen en grandes cantidades son el metanol, hidrógeno, etanol, furfural, fibras de carbón, polietileno, electricidad y calor.

La selección de la materia prima, así como el proceso de conversión y los productos finales tampoco pueden ser evaluados de forma separada. Estos tres elementos deben ser estudiados de conjunto. Algunas alimentaciones son sostenibles solo para algunos productos, y algunas tecnologías y procesos de conversión pueden ser usados solo o preferiblemente para algunos tipos de alimentaciones y/o productos finales.

Todos los esquemas de biorefinería que resulten interesantes deben ser evaluados en términos de oportunidades y posibilidades de integración para mejorar las características energéticas en la biorefinería.

La complejidad tecnológica y de funcionamiento integrado que se genera en las biorefinerías conduce a un interesante y complicado problema de optimización que es difícil de resolver debido a la incertidumbre en los precios futuros de la energía, los costos de inversión y los niveles de CO₂.

Es por esto, que los estudios de optimización en diferentes niveles de estos parámetros deben ser realizados en el orden de identificar soluciones robustas que signifiquen en los aspectos técnicos, económicos y ambientales (Cardona y Sánchez, 2007); (Ensinas et al., 2007); (Ensinas, 2008). En este sentido el proceso debe ser integrado en dos grandes partes y esto puede ser hecho en varios niveles:

1. Integración de procesos en la biorefinería de forma separada.
2. Integración de procesos solo en el proceso principal de la biorefinería.
3. Análisis del complejo productivo completo (detallado y global).
4. Análisis de integración de procesos de todos los flujos como parte de un gran proceso.

De experiencias de estudios de integración realizados se ha comprobado que su aplicación en biorrefinerías donde los procesos que la componen no han sido integrados pueden convertirse en procesos con mayores aptitudes para la integración que un proceso que ya haya sido integrado previamente de forma individual.

Lo anterior significa que si una industria en un futuro cercano tiene posibilidades de convertirse en una biorefinería, cualquier medida o plan de ahorro de energía debe ser pospuesta o cuidadosamente evaluada ya que podrían perderse las posibilidades de una buena integración en el complejo total. Esto quiere decir que de las cuatro opciones referidas anteriormente, la que refiere al análisis de todos los flujos como partes de un gran proceso, o sea la 4, debe ser siempre llevada a cabo como primer paso para la integración, lo cual resultará en una mejor integración.

No obstante, la tercera opción de tratar los flujos de forma separada en cada uno de los procesos también debe ser ejecutada, ya que la diferencia entre los resultados muestra las oportunidades de ahorro de energía, a través de la integración corriente a corriente, esto como es lógico establece un compromiso entre la solución más complicada y la solución más simple al tratar la situación como dos sistemas separados.

Es importante resaltar que en muchos casos en este tipo de estudio las restricciones prácticas pueden complejizar las soluciones pero no pueden perderse de vista los objetivos de la integración. Otra experiencia de los estudios de integración es que las oportunidades para ello muchas veces dependen de los resultados que se visualizan en las curvas compuestas de composición, donde en ocasiones se presentan situaciones de intercambio de calor en la zona debajo del pinch en procesos individuales o en el caso que se esté analizando la biorefinería, lo que se traduce en el empleo de una cantidad de calor y niveles de temperatura en exceso y finalmente en un proceso ineficiente desde el punto de vista energético.

3.1. Impacto y posibilidades de aplicación

1. Alternativas de integración de producciones de azúcar y alcohol considerando que las demandas de electricidad y vapor de los procesos son atendidas por el consumo de bagazo de caña generado.
2. Estimación de los excedentes de electricidad y bagazo en los escenarios de integración obtenidos para diferentes perfiles de consumos de utilidades atendiendo a la situación del mercado.
3. Procedimiento para la reducción de los consumos de energía térmica y agua en los procesos de producción de azúcar y alcohol, elevando la eficiencia de los procesos dado las posibilidades de ser implantadas en las industrias de este tipo.
4. Procedimiento de optimización cuya función objetivo puede ser minimización del costo de producción (en los que está incluido el costo de inversión), para la evaluación de escenarios de integración, dando como resultado: número de intercambiadores involucrados en el análisis, área de transferencia térmica necesaria, identificación de corrientes a integrar, consumo mínimo de utilidades, entre otros aspectos.
5. Aumento en las producciones excedentes de electricidad y/o bagazo, lo que reduce también la demanda de otros materiales y servicios en las producciones involucradas.

4. CONCLUSIONES

Las biorefinerías tienen un gran potencial para incrementar la eficiencia de los procesos involucrados en ella a través de la diversificación y explotación de los productos y materias primas empleados pero para lograr esto el concepto de integración y minimización de riesgos, debe aplicarse como un elemento importante dentro del diseño del esquema final.

El uso de herramientas de síntesis y análisis de procesos para la modelación y optimización, así como para el manejo de la complejidad invariable asociada con la integración promueve la obtención de unidades de biorefinerías innovativas en materia de procesos y cadena de suministros.

La integración de procesos debe conducir a una mejor utilización de la materia prima, una eficiencia energética mayor, menor uso de agua fresca y vertido de residuos, favoreciendo la obtención de procesos más sostenibles desde el punto de vista ambiental; también la integración de procesos conduce a menores costos de producción lo que implica sostenibilidad económica y una mejor gestión ambiental.

REFERENCIAS

- Cardona, C.A., and Sánchez, Ó.J., Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities., *Bioresource Technology*, Vol. 98, 2007, pp. 2415–2457.
- Cardona C.A. et al. Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives., *Bioresource Technology*, Vol. 101, 2010, pp. 4754–4766.
- Clark, J.H., Perspective Green Chemistry for the second generation biorefinery sustainable chemical manufacturing based on biomass., *J. Chem Technol Biotechnol*, Vol. 82, 2007, pp. 603-617.
- Dunn, R., Bush, G. E., Using process integration technology for cleaner production., *Journal of cleaner production*, Vol. 8, 2000, pp.1-23.
- El-Halwagi, A. M., Rosas, C., Ponce-Ortega, J. M., Jiménez-Gutiérrez, A., Mannan, M. S. and El-Halwagi, M. M. Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives. *AIChE J.* doi: 10.1002/aic.14030, 2013.
- Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Lozano, M.A. and Serra, L.M., Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane., *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, 2007, pp. 2978–2987.
- Ensinas, A.V., Thermal integration and thermoeconomic optimization applied to sugar and ethanol industrial process, PhD Thesis, School of Mechanical Engineering, State University of Campinas (in Portuguese), 2008.
- Garrison, G. W., El-Halwagi, M. M., A Global Approach to Integrating Environmental, Energy, Economic, and Technological Objectives, American Chemical Society. Spring Meeting Session, 2000.
- González, M., Albernas, Y., Feijoo, J., Espinosa, R y González, E., Análisis de factibilidad de la integración de los procesos de producción de azúcar y alcohol., *Afinidad*, Vol. 70, No. 564, Oct-Nov, 2013, pp. 284-288.
- Hamelinck, C.H.; Faaij, A.P.C. Outlook for advanced biofuels., *Energy Policy*, Vol. 34, 2006, pp. 3268-3283.
- Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U.W. and Ramarao, B.V., A review of separation technologies in current and future biorefineries., *Separation and Purification Technology*, Vol. 62, 2008, pp. 1–21.
- Piccolo, C y Bezzo, F., A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 33, No. 3, 2009, pp. 478-491.
- Pavlecic M., et al. Ethanol from Sugar Beet Intermediates, *Food Technol. Biotechnol.* Vol. 48, No. 3, 2010, pp. 362–367.
- Kamm, B.; Kamm, M., Principles of biorefineries., *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 64, 2004, pp. 137-145.
- Rijkens, B.A., Hydrolyses processes for lignocellulosic material. Presentado en: CECD Workshop Cellulose Programme. Brunschweig, 1984.
- Sanders, J., Scott, E., Weusthuis, R., Mooibroek, H., Bio-refinery as the Bio-inspired Process to Bulk Chemicals., *Macomol Biosci*, Vol. 7, 2007, pp. 105-117.
- Wright, M.M., Brown, R.C., Comparative economics of biorefineries based on the biochemical and thermochemical platforms., *Biofuels, Biorpod Bioref*, Vol. 1, 2007, pp. 49-56.