

# *La integración de procesos en el esquema de una biorrefinería*

Meilyn González Cortés\*<sup>1</sup>, Lilisbet Castellanos Gallo<sup>1</sup>, Yaillet Albernas Carvajal<sup>1</sup>, Erenio González Suárez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas; Carretera a Camajuani Km 5 ½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.

*Process integration in a biorefinery scheme*

*La integració de processos en l'esquema d'una biorrefineria*

Recibido: 3 de febrero de 2014; revisado: 27 de marzo de 2014; aceptado: 1 de abril de 2014

## RESUMEN

En la actualidad existe un gran esfuerzo para lograr la viabilidad económica del uso de la biomasa lignocelulósica como una nueva fuente de azúcares para la producción de etanol. La no viabilidad 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 biorrefinería 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 que muestran como la integración de procesos y la valoración de los coproductos en un esquema de biorrefinería conduce a la viabilidad 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, dicho esquema se refiere a la industria de la caña de azúcar en la que se generan como productos principales jugo, bagazo y miel, así como otros en procesos anexos entre los que se encuentran la torula, el biogás, CO<sub>2</sub>, el furfural, la lignina y electricidad.

**Palabras clave:** Biomasa; integración de procesos; biorrefinería; etanol; bagazo; caña de azúcar

## SUMMARY

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 end 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 molasse and other products derived processes in annexes found among torula, biogas, CO<sub>2</sub>, furfural, lignin, and electricity.

**Key words:** Biomass; process integration; biorefinery; ethanol; sugar cane.

## RESUM

Actualment hi ha un gran esforç per aconseguir la viabilitat econòmica de l'ús de la biomassa lignocel·lulòsica com una nova font de sucres per a la producció d'etanol. La no viabilitat d'aquests processos es deu fonamentalment al cost dels enzims i al no aprofitament dels coproductes que es generen en el pretractament de la biomassa.

L'avaluació tècnica, econòmica i ambiental d'esquemes de biorrefineries és complicada a causa de la incertesa en aspectes com la matèria primera, els preus de l'energia i el producte final, costos d'inversió, operació i riscos de les tecnologies.

En el treball, es donen les pautes que mostren com la integració de processos i la valoració dels coproductes en un esquema de biorrefineries condueix a la viabilitat dels processos que empren la biomassa per a l'obtenció de biocombustibles. Es mostra un esquema de processos integrats que intercanvia recursos materials i energètics, aquest esquema es refereix a la indústria de la canya de sucre en la qual es generen com a productes principals suc, bagàs i mel, així com altres en processos annexos entre els quals es troben la torula, el biogàs, CO<sub>2</sub>, el furfural, la lignina i electricitat.

**Mots clau:** Biomassa; integració de processos; biorrefineria; etanol; bagàs; canya de sucre.

\*Autor para la correspondencia: [mgonzalez@uclv.edu.cu](mailto:mgonzalez@uclv.edu.cu)

---

## INTRODUCCIÓN

El esquema de biorrefinería 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 biorrefinería 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 para la obtención de otros productos como etanol, biopolímeros y otros compuestos químicos.

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 viabilidad técnica y económica de los procesos y productos involucrados; en el trabajo se dan las pautas para lograr esto.

## 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 biorrefinería, dado los elementos fundamentales que hay que cubrir en la biorrefinería 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 el esquema de una biorrefinería 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).

De las hemicelulosas y sus azúcares monoméricos derivados, (pentosas), pueden también derivarse medios fermentables, pero en este caso y dada la mayor variedad de monómeros y oligómeros constituyentes, las posibilidades de obtención de diversos productos químicos se amplía en un gran espectro. Pueden obtenerse productos para cosmética, farmacia, productos para alimentación animal y humana (principalmente relacionados con alimentos dietéticos y funcionales), algunos tan conocidos como el xilitol, el ácido acético, el furfural y productos poliméricos de síntesis (resinas furánicas) de interesantes propiedades dado su carácter biodegradable en contraste con los plásticos derivados del petróleo.

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 H., 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 biorrefinería 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 biorrefinería que trabajen con procesos integrados.
- Evaluación de la cadena de mando y suministro.
- Síntesis óptima del esquema de biorrefinería integrada.
- Evaluación y análisis del ciclo de vida del esquema de biorrefinería.
- Evaluación de escenarios futuros de biorrefinería considerando la integración de procesos.
- Decisión bajo incertidumbre de acuerdo a los precios y demanda futura de materias primas y productos.

Debido a que los grados de libertad en el diseño de la biorrefinería 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 biorrefinería 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 biorrefinerías 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 biorrefinería integrada debe responder a las siguientes cuestiones:

- Estado actual de las biorrefinerías.
- Oportunidades estratégicas para una biorrefinería si se parte de varias disponibles.
- Características principales (químicas, biológicas, térmicas, mecánicas) de las varias plataformas de procesos que se incluyen en la biorrefinería.
- Análisis y diseño del esquema de biorrefinería para que puedan ser maximizadas las posibilidades de integración y crear ventajas competitivas.
- Análisis de incertidumbre que incluya los cambios futuros en el mercado en el análisis y diseño del esquema de biorrefinería 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 biorrefinería.

## 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, CO<sub>2</sub>, el furfural y la lignina. (González et al., 2013).

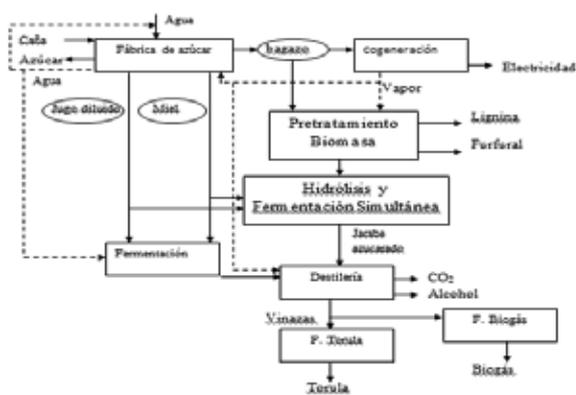


Figura 1. Esquema de biorrefinería que produce azúcar, etanol, electricidad y otros productos a partir de biomasa.

De la fracción polifenólica o lignina, existe el uso tradicional como combustible que se aplica en el sector de la pasta celulósica, el papel y que supone una valorización energética de la fracción residual. Sin embargo, cobran cada vez más auge las posibilidades de uso en el sector de materiales (tableros), derivados de esteroides con aplicaciones en farmacia o alimentación funcional, antioxidantes, materiales poliméricos y aditivos de betunes y asfaltos.

No obstante lo anterior, es importante hacer notar que es difícil la separación de los principales componentes de la biomasa sin degradar su estructura química. Dada la complejidad en composición y enlaces químicos y físicos, no es posible la separación mediante tecnologías convencionales. 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 M. et al, 2010); (Cardona C.A. et al, 2010).

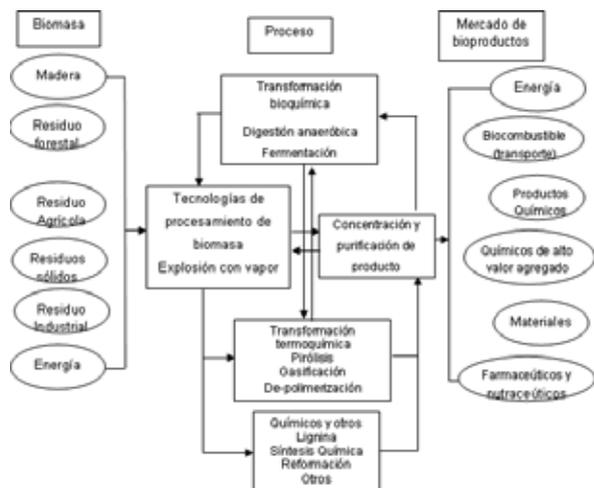
Cuando se trata la temática de la biorrefinería existen varios elementos que deben considerarse y que guardan una estrecha relación con las oportunidades de integración de procesos que pueden identificarse en cualquier caso de estudio. Estos elementos se muestran a continuación y en la figura 2, se resumen de forma esquemática las posibilidades de una biorrefinería (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 biorrefinería 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 biorrefinería 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 biorrefinería. 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 3 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.



**Figura 2.** Posibilidades de materia prima, procesos y productos en la Biorrefinería.

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

La complejidad tecnológica y de funcionamiento integrado que se genera en las biorrefinerías 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 CO<sub>2</sub>. 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 biorrefinería de forma separada.
2. Integración de procesos solo en el proceso principal de la biorrefinería.
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 biorrefinería, 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, deber 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 biorrefinería, 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.

## CONCLUSIONES

Las biorrefinerías 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 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 biorrefinerías 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.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dunn, R; Bush, G. E. (2000). Using process integration technology for cleaner production. *Journal of cleaner production*, 8, 1-23.
2. Garrison, G. W; El-Halwagi, M. M., (2000). A Global Approach to Integrating Environmental, Energy, Economic, and Technological Objectives" American Chemical Society. Spring Meeting Session.
3. Hamelinck, C.H.; Faaij, A.P.C. (2006). Outlook for advanced biofuels. *Energy Policy* 34, 3268-3283.
4. Clark, J.H. (2007). Perspective Green Chemistry for the second generation biorefinery sustainable chemical manufacturing based on biomass. *J. Chem Technol Biotechnol*, 82, 603-617.
5. Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U.W. and Ramarao, B.V., (2008). A review of separation technologies in current and future biorefineries. *Separation and Purification Technology*, 62, 1-21.

- 
6. Wright, M.M.; Brown, R.C. (2007). Comparative economics of biorefineries based on the biochemical and thermochemical platforms. *Biofuels, Biorefining and Bioprocess Engineering*, 1, 49-56.
  7. Piccolo, C y Bezzo, F. (2009). A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biomass and Bioenergy* 33, 3, 478-491.
  8. El-Halwagi, A. M., Rosas, C., Ponce-Ortega, J. M., Jiménez-Gutiérrez, A., Mannan, M. S. and El-Halwagi, M. M. (2013). Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives. *AIChE J.* doi: 10.1002/aic.14030
  9. González M., et al. (2013). Análisis de factibilidad de la integración de los procesos de producción de azúcar y alcohol. *AFINIDAD LXX*, 564, 284-288.
  10. Pavlecic M. et al. (2010). Ethanol from Sugar Beet Intermediates, *Food Technol. Biotechnol.* 48, 3, 362-367.
  11. Cardona C.A. et al. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology* 101, 4754-4766
  12. Kamm, B.; Kamm, M. (2004). Principles of biorefineries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 64:137-145.
  13. Sanders, J.; Scott, E.; Weusthuis, R.; Mooibroek, H. (2007). Bio-refinery as the Bio-inspired Process to Bulk Chemicals. *Macromol Biosci*, 7, 105-117.
  14. Rijkens, B.A. (1984). Hydrolyses processes for lignocellulosic material. Presentado en: CECD Workshop Cellulose Programme. Brunschweig.
  15. Cardona, C.A. and Sánchez, Ó.J., (2007). Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98, 2415-2457.
  16. Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Lozano, M.A. and Serra, L.M., (2007). Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, 48: 2978-2987.
  17. Ensinas, A.V., (2008). Thermal integration and thermoeconomic optimization applied to sugar and ethanol industrial process, PhD Thesis (School of Mechanical Engineering, State University of Campinas (in Portuguese)).