

## ***CONSIDERACIONES PARA LA INTEGRACIÓN MATERIAL Y ENERGÉTICA DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y PROCESOS DERIVADOS***

### ***CONSIDERATIONS FOR THE MASS AND ENERGY INTEGRATION IN THE SUGAR PROCESS PRODUCTION AND DERIVATIVE PROCESS***

*Dennis Abel Clavelo Sierra<sup>1\*</sup>, Meilyn González Cortés<sup>1</sup> y Rubén Espinosa Pedraja<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas; Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara. Cuba.

Recibido: Febrero 9, 2015; Revisado: Febrero 27, año; Aceptado: Marzo 18, 2015

---

#### **RESUMEN**

La sociedad actual necesita ahora más que nunca de industrias que creen nuevas formas y métodos donde el ahorro de la energía y de los materiales sea un aspecto primordial. Es por esto que en la presente investigación se plantean las consideraciones para la integración de los procesos de azúcar y otros productos derivados, en un esquema de biorefinería con miras a lograr procesos eficientes con un aprovechamiento adecuado de los recursos materiales y un uso eficiente de la energía, con costos de operación e inversión mínimos. En el esquema que se toma como base para el estudio se considera que el complejo integrado tiene como insumo básico la caña de azúcar, además se tienen en cuenta la variación de los precios de los productos en el mercado.

En el artículo se plantean los pasos a seguir para el desarrollo de una metodología que permita analizar los procesos involucrados en el esquema de biorefinería identificando los recursos materiales y energéticos comunes que los procesos intercambian. Se presenta un diagrama heurístico que guía la estrategia a seguir para ello.

**Palabras clave:** Integración de procesos, caña de azúcar, energía, bagazo, biorefinería

---

Copyright © 2015. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

---

\* Autor para la correspondencia: Dennis Clavelo, Email: [dclavelo@uclv.edu.cu](mailto:dclavelo@uclv.edu.cu)

## **ABSTRACT**

The current society needs now more than ever of industries that create new forms and methods where the saving of energy and materials is a fundamental aspect. For this reason, in the present investigation we present an outline with the considerations for the integration of the processes of sugar and other derived products, in an outline of bio refinery with the objective of achieving efficient processes with an appropriate use of the material resources and an efficient use of the energy, with minimum operation costs and investment. In the outline we take as base for the study, it is considered that the integrated complex has as basic input the sugarcane; it is also considered the variation of the prices of the products in the market.

In the article we make an outline with the precise steps for the development of a methodology that allows analyzing the processes involved in the biorefinery outline and in this way to identify the common material and energy resources that the processes exchange. A heuristic diagram is presented that guides the strategy to continue for it.

**Key words:** Integration of processes, cane of sugar, energy, trash, bio refinery

## **1. INTRODUCCIÓN**

La industria de la caña de azúcar tiene potencialidades para trabajar de forma integrada a otros procesos lo que conduce a un complejo productivo con mayor eficiencia técnica, económica y ambiental. De la integración del proceso de fabricación de azúcar a otros como son la producción de etanol, levadura torula, biogás, electricidad, así como otros productos que pueden generarse de los procesos antes mencionados, se pueden reducir los consumos de energía y agua, ya que de un análisis de estos procesos se puede comprobar que entre los mismos existen recursos comunes, como son el agua, la energía, la electricidad y el hecho de que productos o corrientes residuales de un proceso pueden constituir materias primas de otros. No obstante, a las potencialidades que esto ofrece a primera vista, no puede obviarse que la selección de los productos y las tecnologías para producirlos se traduce en un gran problema combinatorio; ya que se generan múltiples alternativas de integración. Es por lo anterior, que la selección del esquema óptimo de integración en la producción de azúcar y derivados se traduce en un problema combinatorio que refuerza las barreras a la integración de procesos, su aplicación es limitada en los procesos productivos, desechándose oportunidades de mejora en los mismos como son el aprovechamiento de recursos materiales y energéticos para la obtención de otros productos.

De aquí se deduce la necesidad de expresar con claridad las consideraciones que permitan desarrollar una metodología para lograr esquemas integrados sostenibles, con la aplicación de un procedimiento de optimización, que maximice las ganancias del complejo, a partir de la reducción de costos en el diseño de alternativas de integración entre las plantas para la obtención de varios productos, la optimización de las redes de intercambiadores de calor y de manejo y recirculación de agua en los procesos involucrados.

## **2. DESARROLLO**

En la literatura, pueden encontrarse numerosos artículos que abordan la integración de procesos de azúcar y otros productos derivados, (Bao et al., 2011); (Pham and El-Halwagi, 2011) y (Sadhukhana et al., 2002).

Por ejemplo en (Bao et al., 2011); se presenta un método corto para la síntesis y tamizado de una biorefinería integrada y si se tiene en cuenta que una biorefinería no es más que una fábrica que procesa biomasa para la obtención de productos químicos se puede extrapolar este caso a la industria azucarera, en la cual se procesa la biomasa caña de azúcar. El método se basa en una representación estructural de especies químicas y operadores de conversión que los relacionan. Se desarrolla un enfoque de optimización para seleccionar e identificar la configuración óptima para varias rutas de tecnologías usando datos simples. Por otro lado, un enfoque para la síntesis de procesos similares fue presentado en el mismo año; el mismo involucra un algoritmo de dos pasos. En el primer paso, un conjunto de posibles intermediarios se identifica dando una composición y relación de flujo material lignocelulósico, (material tratado en ese caso de estudio). En el segundo paso, dado un conjunto de productos deseados (entre ellos el etanol), se identifican las especies necesarias, las rutas líderes para esto y se analizan los productos intermedios en ambos pasos, (Pham and El-Halwagi, 2011).

En el artículo (Sadhukhana et al., 2002), se presenta una metodología a través de la cual se realiza la síntesis de un sistema industrial basado en un análisis que toma en consideración el valor de la producción. En ese caso la metodología se aplica a la evaluación de la factibilidad económica de una biorefinería. La metodología consiste en un mecanismo para el diseño sistemático de sistemas industriales basado en un enfoque comprensivo de los ingresos del proceso y el costo de producción, y aquí se analiza la contribución marginal de las rutas de procesos y productos individuales.

Un aspecto que distingue este estudio es que para suplir el consumo de vapor se optimiza el esquema integrado en cuanto al consumo de utilidades calientes y en base a ello se diseña un esquema de cogeneración que satisfaga los requerimientos de vapor y electricidad. Este análisis se realiza con el objetivo de tener en cuenta la nueva realidad, que prevé vender excedentes de electricidad por las fábricas, así como el empleo del bagazo como materia prima para otros procesos, por lo que se requiere buscar un compromiso entre estos factores (bagazo para obtención de otros productos, (etanol, furfural, lignina) o bagazo para producción de electricidad).

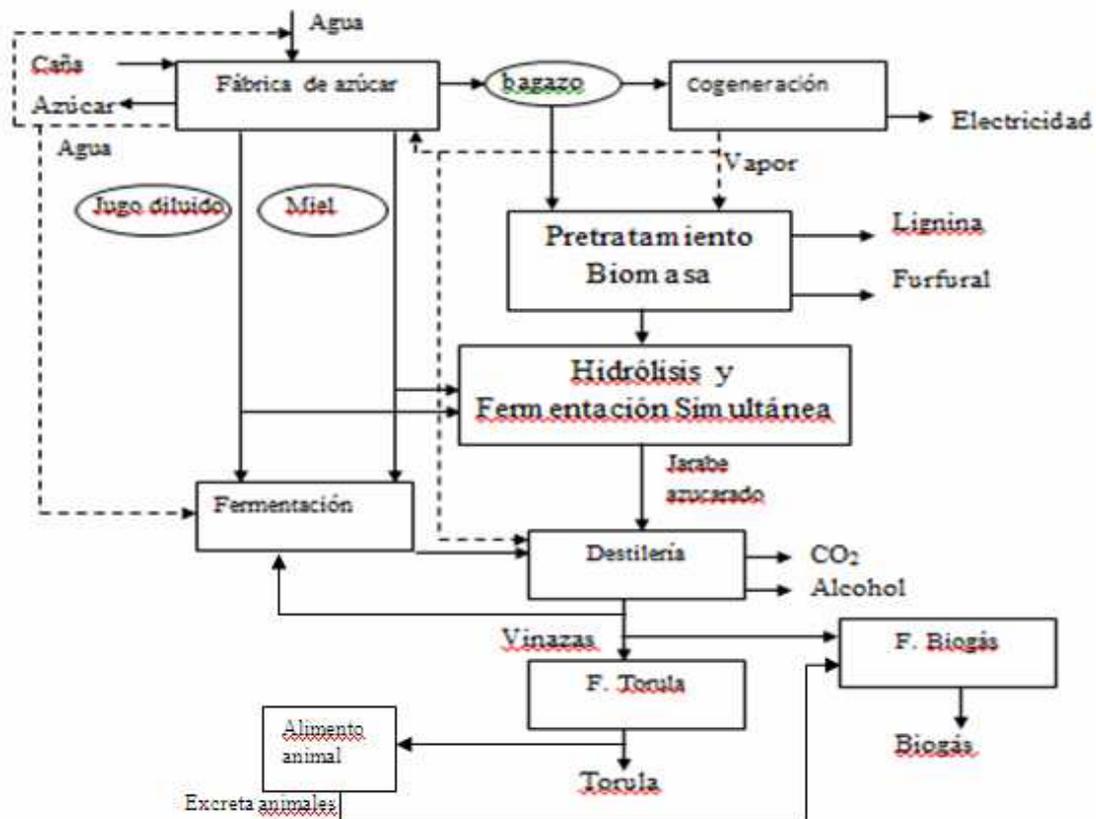
Como se explica anteriormente, no obstante a las oportunidades que pueden representar los procesos integrados existen inconvenientes como son qué producto o proceso debe ser el líder, hacia dónde destinar un recurso material o energético que dentro del complejo es materia prima para varios productos, y cómo esto afecta cada proceso, así como la incertidumbre en la flexibilidad del esquema integrado ante variaciones en la demanda, los precios de la materias primas y productos, entre otros.

Para atenuar los inconvenientes que se han mencionado, este trabajo toma como base resultados de Corso (2011), en el que se estudian las posibilidades de integración de los procesos de fabricación de azúcar y alcohol. Este estudio se distingue porque en el mismo se incluyen otros procesos derivados como son la obtención de alcohol de segunda generación, levadura torula, furfural, lignina y la electricidad como un nuevo producto. La inclusión de nuevos procesos amplía las posibilidades de integración y la

evaluación de escenarios. El estudio debe incluir un análisis detallado de los procesos, así como un estudio de sensibilidad para las producciones de azúcar, alcohol, electricidad y otros productos involucrados con relación a los precios de los mismos en el mercado internacional. El análisis debe considerar los siguientes aspectos:

1. Caracterizar tecnológicamente los procesos involucrados en el caso de estudio.
2. Identificar las potencialidades materiales y energéticas de intercambio de recursos en los procesos de estudio.
3. Síntesis del esquema de integración con mayores potencialidades.
4. Plantear el modelo de optimización para la obtención de la alternativa de integración óptima que incluya la valoración económica.
5. Proponer el esquema óptimo de integración de agua y energía de los procesos individuales como un sitio total.

Para ejemplificar se toma como caso de estudio el siguiente esquema de biorefinería, figura 1. En este esquema la caña de azúcar constituye el insumo básico la cual es la materia prima de la fábrica y a partir de su procesamiento se derivan varios productos.



**Figura 1.** Esquema de biorefinería a partir de caña de azúcar

En la fábrica de azúcar se produce como producto principal el azúcar, también se obtienen otros subproductos como la miel, jugo diluido y bagazo. Estos dos primeros son enviados directamente a la destilería y el último es utilizado en la cogeneración para la obtención de vapor y/o electricidad y así abastecer todas las producciones. También el bagazo puede ser utilizado en la elaboración de alcohol, para ello es sometido a un pretratamiento en dos etapas en donde se generan la lignina y el furfural, productos de alto valor agregado, para los cuales en la literatura se reportan varios usos, Albernas (2014), Morales (2012). Una vez que el bagazo ha sido pretratado se somete a la etapa

de hidrólisis y fermentación para incorporarse a la destilación junto a los fermentos de los jugos y mieles con el objetivo de obtener etanol y otros compuestos como el CO<sub>2</sub> y las vinazas, estas últimas pueden utilizarse en los procesos de obtención de torula y/o biogás.

Para el desarrollo de este estudio se plantean las siguientes consideraciones deben tenerse en cuenta para el análisis de los procesos con vistas a su integración en un complejo de biorefinería:

- Análisis y caracterización tecnológica de los procesos involucrados que son: producción de azúcar, cogeneración, alcohol de primera y segunda generación, fabricación de torula y biogás; es posible identificar las oportunidades de intercambio de recursos materiales entre los procesos tales como: bagazo, jugo, miel, vinazas, agua y recursos energéticos tales como el vapor y la energía eléctrica. Identificación de las potencialidades materiales y energéticas de intercambio de recursos; se obtienen diferentes escenarios de productos y procesos para la obtención de los mismos, por ejemplo: en el primer caso las mieles y el jugo que produce el central es utilizado posteriormente en la producción de etanol (que en este caso sería el de primera generación) puede ser complementado con el de segunda generación a partir del bagazo; esto permite un aumento en la disponibilidad de sustrato azucarado; también puede incorporarse como sustrato parte de las vinazas generadas en el proceso de destilación. Otra potencialidad material sería el empleo de las vinazas que se generan como residual en el proceso de alcohol para la producción de torula y biogás. En la producción de torula pudiera vincularse la cría de ganado porcino y la excreta mezclarla con la vinaza para la producción de biogás, de esta forma se cierra el ciclo.
- En relación a las potencialidades energéticas, la fábrica de azúcar con su sistema de cogeneración abastecería de vapor y electricidad a los demás procesos con miras a un ahorro con factibilidad económica y energética.
- En la identificación de los productos y coproductos con potencialidad de obtenerse en los procesos de estudio se tienen: azúcar, mieles, jugos diluidos, bagazo, furfural, lignina, alcohol, CO<sub>2</sub>, vinazas, biogás y torula.
- Integración material y energética de los procesos individuales (agua y energía); con la aplicación de la misma se garantiza que los procesos tengan el consumo de utilidades mínimo y por tanto mayor eficiencia energética, la extensión de este análisis al recurso agua, también condicionará un consumo mínimo de este recurso para las plantas por separado y para el esquema integrado.
- Planteamiento del modelo de optimización para la obtención de la alternativa de integración óptima; el modelo de optimización se planteará en función de la maximización de la rentabilidad del proceso o minimización de los costos de producción o inversión, sujeto a restricciones de balances de masa y energía, restricciones para el cumplimiento de normas ambientales y restricciones en cuanto a la incertidumbre de determinados parámetros que caracterizan el modelo.
- Planteamiento de alternativas de integración material y energética en el sitio total: se analizan los resultados del modelo e identifican los escenarios más probables para las condiciones evaluadas (incertidumbre en demandas y precios de materias primas y productos; períodos de trabajo (zafra o no zafra), entre otros)

#### **4. CONCLUSIONES**

Para la integración material y energética de los procesos de producción de azúcar y procesos derivados se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las biorefinerías tienen un gran potencial para aumentar la eficiencia de los procesos involucrados en ella, en este caso la biomasa empleada, la caña de azúcar, a partir de ella se procesan productos con diferentes usos, 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, promueve la obtención de unidades de biorefinería con posibilidades de aplicarse a la industria de la caña de azúcar.
- La integración de procesos favorece una mejor utilización de la materia prima, una eficiencia energética mayor y como resultado la aparición de procesos más sostenibles desde el punto de vista ambiental y también del económico.

#### **REFERENCIAS**

- Albernas, Y., Procedimiento para la síntesis y el diseño óptimo de plantas discontinuas de obtención de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar., Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química, Santa Clara, Cuba, 2014.
- Bao, B.; NG, D.K.S.; TAY, D.H.S.; Jiménez-Gutierrez, A. and El-Halwagi, M.M. A Shortcut method for the preliminary synthesis of process-technology pathways: An optimization approach and application for the conceptual design of integrated biorefineries., *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 35, No. 8, 2011. pp. 1374-1383.
- Corso Calviño, Y., González Cortés, M., González Morales, V., González Suárez, E., Factibilidad de la integración energética entre los procesos de fabricación de azúcar y alcohol., *Centro Azúcar*, Vol. 38, No. 1, 2011, pp. 87-94.
- Morales, M., Estrategia para la reconversión de una industria integrada de azúcar y derivados para la producción de etanol y coproductos a partir del bagazo., Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química, Santa Clara, Cuba, 2012.
- Pham, V. and El-Halwagi, M., Process synthesis and optimization of biorefinery configurations., *AIChE Journal*, Vol. 58, No. 4, 2011, pp. 1212-1221.
- Sadhukhan, J., A novel value analysis method for process network optimisation., Ph.D. Dissertation, UMIST, Manchester, UK, 2002.