

# Impacto de la integración de los procesos de azúcar y derivados

## *Impact of Process Integration in the Sugar and Derivatives Processes*

Dra. Meilyn González-Cortés, [mgonzalez@uclv.edu.cu](mailto:mgonzalez@uclv.edu.cu), Dr.Sc. Erenio González-Suárez,  
MSc. Víctor González-Morales, MSc. Yaillet Albornas-Carvajal

Facultad de Química Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu", Las Villas, Cuba

*Se realiza la modelación y simulación de la integración de los procesos de fabricación de azúcar, etanol y levadura torula, identificando las posibilidades de intercambio de recursos materiales y energéticos, logrando con ello un complejo integrado de mayor eficiencia técnica, económica y ambiental. Se simula el impacto de la extracción del jugo de los filtros y secundarios del proceso de fabricación de azúcar para su empleo en la producción de etanol, obteniéndose mejoras en la calidad del azúcar y la agotabilidad de las mieles y rendimientos alcohólicos y eficiencias fermentativas superiores al compararlas con los procesos tradicionales. A través de la modelación se pronostica una mejor redistribución del agua y se obtiene una mayor eficiencia energética en los procesos integrados, se disminuye el consumo de vapor del proceso y se obtienen mayores sobrantes de bagazo. Se logra una mejor distribución de los recursos acuosos y energéticos en el sistema integrado.*

**Palabras clave:** modelación, simulación, integración de procesos, azúcar, etanol, levadura torula.

*Modeling and simulation of process integration in the production of sugar, ethanol and yeast is carried out. The possibilities of exchange mass and energy resources are identifying, achieving with it an integrated complex of technical, economic and environmental bigger efficiency. The impact of juice extraction from the filters and from last milling is simulated. In order to use them in the ethanol production, obtaining improves in the quality of sugar and the molasses so that the alcoholic yields and fermentative efficiencies higher when comparing them with the traditional processes. Through the modeling a better redistribution of the water is predicted and an energy bigger efficiency is obtained in the integrated processes, that diminishes the steam consumption and bigger bagasse surpluses are obtained. A better distribution of water and energy resources is achieved in the integrated system. The economic efficiency of the process is favored with the integration alternatives simulated.*

**Key words:** modeling, simulation, integration of processes, sugar, ethanol, yeast.

## Introducción

La situación por la que actualmente atraviesa la industria química a nivel mundial es compleja. La escasez de capital y las legislaciones en materia ambiental son cada vez más severas, es por ello que la industria está obligada a hacer eficientes sus procesos, utilizando materias primas alternativas, aprovechando los recursos que brindan los propios procesos, y de esa forma optimizar el aprovechamiento y la protección de los recursos naturales y ser más competitiva en el mercado internacional.

La industria de la caña de azúcar y sus derivados no se encuentra exenta de esta situación, se ha

comprobado que en la mayoría de los casos, las producciones relacionadas con la misma provocan un efecto negativo hacia el medio ambiente, dado principalmente por el vertido de residuos materiales y energéticos al medio, no existe un aprovechamiento adecuado de los recursos en estos procesos lo que ha traído como resultado procesos con una baja eficiencia técnica y económica.

En este trabajo se exponen los resultados de un estudio realizado en los procesos de producción de bioetanol y azúcar a partir del cual se proponen alternativas de integración material y energética con lo cual se logran producciones más eficientes no sólo desde el punto de vista técnico y económico sino también ambiental.

---

## Fundamentación teórica

### Integración material y energética en la Industria azucarera y derivados

En los últimos años se han desarrollado y aplicado en la industria de procesos químicos, considerables técnicas de diseño para minimizar el consumo de masa y energía a través de la integración de procesos. La aplicación de las mismas ha traído como resultado considerables mejoras en la eficiencia de los procesos tanto en lo tecnológico, como en lo económico y lo ambiental.

Estas herramientas responden a la tendencia actual de buscar soluciones que garanticen la obtención de una tecnología más limpia donde se aprovechen corrientes intermedias de los procesos dentro del propio proceso, en el caso de la integración material con vistas a minimizar el flujo residual a tratar al final del proceso y en el caso de la integración energética para disminuir el consumo de utilidades en el proceso /1-3/.

Las corrientes de agua son un recurso que a menudo está sujeto no solo a restricciones de niveles de concentración, sino también a niveles de temperatura. Cuando el proceso que emplea agua la requiere caliente para una operación implica cambios de los niveles de concentración a través de la transferencia de masa entre las corrientes del proceso y las de agua; así como cambios en los niveles de temperatura resultantes de la transferencia de calor entre procesos. Bajo estas circunstancias ambos, los contaminantes y las condiciones de temperatura deben ser consideradas simultáneamente si se quieren minimizar los consumos de agua y energía /4-6/.

Por otra parte la síntesis de los sistemas de recuperación de calor maximiza el potencial de calor residual recuperado e identifica la cantidad de agua y energía a ser intercambiada entre las corrientes calientes y frías y su configuración.

Los métodos de diseño desarrollados apuntan a explotar los potenciales de reuso de agua y energía, reduciendo las pérdidas resultantes en la disposición de estas.

En general, la reducción del consumo de agua a través de su reciclaje también ahorra energía en las fábricas, por lo cual es imprescindible comprender bien la interacción entre estos elementos /7-8/.

Según puede resumirse, que los principales factores que han dado ímpetu a lograr una economía en el uso del agua han sido:

1. Reducción de costos por compra o procesamiento de agua fresca.
2. Reducción de pérdidas de azúcar en los residuales de la industria azucarera.
3. Reducción de costos por calentamiento de flujos de procesos.
4. Reducción de costos por disminución del volumen a tratar al final de los procesos.

Sin embargo, la acción para resolver estos problemas requiere un análisis global y sistemático del consumo de agua y energía.

En general, la integración de procesos en la industria azucarera hasta el momento se ha estudiado con vista a obtener ciclos termodinámicos más eficientes que los aplicados, disminuir los consumos de vapor a través de la transferencia de calor entre corrientes frías y calientes.

Con la aplicación de la Tecnología Pinch en la industria azucarera, se obtienen buenos resultados en los procesos de calentamiento y enfriamiento, no así cuando se intenta hacer lo mismo en evaporadores y cristalizadores, debido a que el jugo de caña al ser sometido a evaporación aumenta su Brix disminuyendo su temperatura en algunos casos, además de la existencia de un cambio de fase.

Hasta el momento se han mostrado las ventajas de la aplicación de la integración de procesos una vez que se aplica a las instalaciones, pero la experiencia adquirida en la utilización de estas herramientas ha logrado identificar también las principales barreras y obstáculos que se pueden encontrar. Entre los factores que impiden la implementación y aceptación de la integración de procesos se destacan:

1. La afectación en la producción por problemas de escasez de materias primas o corrientes intermedias intercambiadas.

2. Incertidumbre en las plantas químicas por problemas operacionales o de mantenimiento.

Las variaciones en las materias primas de entrada al proceso, específicamente la caña de azúcar es uno de los factores que afecta la integración de procesos, cuando entra un flujo de caña menor que el de diseño se tienen como es lógico, menores generaciones de vapor vegetal, y se deben suplir las necesidades tecnológicas con vapor generado en las calderas lo que trae como consecuencia aumento en el consumo de bagazo y de agua fresca y por tanto también se producen variaciones en la obtención del producto final y por ende en su eficiencia.

## Materiales y métodos

Se desarrolla una estrategia para la Integración de Procesos, herramienta de análisis de procesos que permite identificar las oportunidades de intercambio de recursos materiales y energéticos en los procesos, así como las necesidades de cambios tecnológicos en los procesos de producción de bioetanol y azúcar. La estrategia desarrollada incluyó los siguientes puntos:

1. Aplicación de las herramientas de análisis e integración material y energética de procesos para la identificación de oportunidades de aprovechamiento de recursos materiales y energéticos en los procesos /12/. La aplicación de estas herramientas incluye el análisis de las debilidades técnicas, económicas y ambientales de los procesos de bioetanol y azúcar y permitió concluir que las herramientas de integración de procesos factibles de aplicar en este caso son:
2. Integración de masa para el aprovechamiento del recurso material de un proceso en otro con resultados previstos superiores. En este caso la herramienta utilizada se conoce en la literatura como: "Cambio de la ruta de reacción", /2, 17, 18/, la misma se empleó para el estudio del impacto del empleo de los jugos de los filtros y secundarios del proceso de fabricación de azúcar en la producción de bioetanol y en el propio proceso azucarero. Estos jugos son los de peor calidad en contenido de azúcares para la fabricación de azúcar, por otro lado, sobre

todo el de los filtros introduce muchas impurezas al proceso, no obstante a esto tienen potencialidades de ser empleados en la producción de bioetanol, además, aunque en nuestro país no existe experiencia en la producción de bioetanol con estas materias azucaradas en otros como Brasil, existe un basto conocimiento en este sentido /7/.

3. Integración de masa, (Diagrama fuente sumidero, modelación matemática y optimización), para la reducción del consumo de agua fresca y el vertido de residuales acuosos en los procesos en estudio, /6/. El planteamiento matemático de una estrategia para reducir el consumo de agua fresca en estos procesos garantiza la obtención de una solución óptima, la cual tiene en cuenta la demanda en las diferentes partes del proceso, los límites de asimilación de contaminantes en los procesos y las normas para el vertido de residuos /9-11/. En este caso la función planteada fue la siguiente:

· Función objetivo:

$$\min = L_{N_{fuente}} = \sum_{j=1}^{N_{sumidero}} I_{N_{fuente}}, j$$

siendo  $j = 1, 2, \dots, N_{sumidero}$ ,

siendo  $L_{N_{fuente}}$ : Flujo de agua fresca y  $N_{sumidero}$ :

los equipos que demandan agua. La función objetivo está sujeta a restricciones de segregación, reciclaje e intersección.

- Integración energética, (tecnología pinch y optimización), para la reducción del consumo energético y recuperación de energía térmica en los flujos de efluentes en los procesos por separado primero y después en el complejo integrado /9, 12-14/.

En este caso la función objetivo para la integración energética se planteó de la siguiente forma:

Función objetivo:  $\min = Fu_{N_{fuente}}$

$$Fu_{N_{fuente}} = \sum_{i=1}^n Fu_{N_{fuente}, j}$$

donde:

$Fu_{N_{fuente}}$  = flujo de utilidades de la  $N_{fuente}$ , en este caso esta fuente es la planta de fuerza.

n= número de plantas, m= fuentes, j= sumideros; sujeta a las restricciones del balance energético.

- Evaluación del impacto de la aplicación de las herramientas descritas en el paso 1, en los procesos y en el complejo integrado /15-16/.

El estudio se realizó en una empresa mielera en la cual se encuentran enclavadas una fábrica de azúcar cuya molida horaria es de 105 toneladas y una fábrica de bioetanol de 550 HL por día. La fábrica de azúcar consta de 4 unidades de molida, el jugo del primer molino se considera como jugo primario y el de los restantes tres molinos como jugo secundario.

En la fábrica de bioetanol se adecuaron condiciones para el enfriamiento en los fermentadores, la prefermentación se realiza con miel final y el sustrato necesario para completar el volumen de los fermentadores fue el jugo diluido proveniente de la fábrica de azúcar, logrando en los fermentadores el 85 % de los azúcares vía jugo.

## Resultados y discusión

Como se ha explicado en cada uno de los procesos y luego en el complejo integrado se

evaluaron los impactos que para el logro de producciones más limpias en los procesos se obtuvieron como resultado de la aplicación de las herramientas de integración material y energética. Estos resultados se pueden cuantificar en los siguientes aspectos:

Máxima utilización de jugos diluidos de la fábrica de azúcar durante la etapa de zafra en la destilería de etanol.

En esta propuesta se analizan los resultados beneficiosos que se obtienen en el ingenio y en la destilería. Como primer paso se ejemplificará sobre los beneficios en la destilería.

En este caso suponiendo una destilería de capacidad, 500HL/d, esta demanda de 25-30 m<sup>3</sup>/d de jugo diluido (jugo de los filtros y jugo secundario) para suplir la necesidad de sustrato en el proceso productivo. Esta medida determina una reducción sustancial de la demanda orgánica de las vinazas, lo cual puede observarse en la siguiente tabla, en la que se muestra la caracterización de los residuales generados en los procesos de fermentación empleando mieles y jugo diluido respectivamente.

Tabla 1  
Caracterización de las vinazas en dependencia de la alimentación

<i>Aspecto</i>	<i>Mieles</i>	<i>Jugo y miel</i>	<i>Jugos</i>
ph	4,1- 5,0	4,4- 4,6	3,7- 4,6
DBO (mgO <sub>2</sub> /L)	25000	19800	6000-16500
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	65000	45000	15000-33000
Sólidos Totales	81500	52700	23700
Nitrógeno (mg N/L)	450-1610	480-710	150-700
Fósforo (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /L)	100-290	9-200	10-210
Potasio (mg K <sub>2</sub> O/L)	3740- 7830	3340-4600	1200-2100
Calcio (mg CaO/L)	450-5180	1330-4570	130-1450
Magnesio(mg MgO/L)	420-1520	580-700	200-490
Sulfato (mg SO <sub>4</sub> /L)	6400	3700-3730	600-760

Como puede verse, se logra una reducción de la carga orgánica del 30 %, además se logra menor volumen y agresividad de los fondajes de los fermentadores, la utilización de los jugos provoca un cambio notable en el carácter de estos últimos en las cubas de fermentación, en cuanto a cantidad, color y consistencia. Esto sugiere que hay una mayor proporción de levaduras, y que además está libre de lodos.

También se pueden lograr ventajas sustanciales en la reducción del agua de dilución para alcanzar la concentración de trabajo de los reactores de biogás, los que como se conoce requieren un residual con una carga de aproximadamente 25 kg/m<sup>3</sup>.

Haciendo un análisis de esto se tiene que, en la destilería se genera un volumen de 800m<sup>3</sup>/ día de vinazas con una carga orgánica promedio de 65 kg/m<sup>3</sup> cuando se utiliza miel en la fermentación, el índice de consumo de agua de dilución en este caso es de 1,6 m<sup>3</sup> de agua/m<sup>3</sup> vinaza; por otro lado, cuando se utilizan jugos diluidos este índice se vería reducido hasta 0,8 m<sup>3</sup> de agua/m<sup>3</sup> vinazas (50 %), es importante hacer notar que este comportamiento se refiere al tiempo de zafra (120 d).

Lo expuesto, permite inferir una reducción en los volúmenes de trabajo en la Planta de Biogás, en 640 m<sup>3</sup>/día, revirtiéndose en facilidades para la disposición al fertirriego por concepto de reducción de área, así como un beneficio directo en relación al consumo del agua utilizada en la etapa de dilución.

Impacto en el balance energético y de aguas de la integración de los procesos de fabricación de bioetanol y azúcar

En este caso el análisis se centró en la influencia de la extracción de los jugos mencionados en el balance energético, la disponibilidad de bagazo, la generación de energía eléctrica y la redistribución del agua en el complejo integrado. En la tabla 2 se muestran los resultados de los análisis realizados en tres variantes, las cuales consisten en lo siguiente:

Variante 1: Sin extracción de jugos y tres masas (esquema doble semilla).

Variante 2: Con extracción de jugo diluido, dos masas y sin vapor a la destilería.

Variante 3: Con extracción de jugo diluido, dos masas y vapor a la destilería.

Tabla 2  
Resultados de la integración energética

Indicador	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Consumo de Vapor Escape (t/h)	50,34	35,66	43,27
Consumo de Vapor Directo (t/h)	53,85	48,18	48,18
Vapor que se destina a la destilería (t/h)	0	0	7,26
Sobrante de vapor de escape con máxima generación, (th)	0	10,18	2,57
Sobrante de bagazo, t/h	4,64	10,63	10,63

En todas las variantes se observa un sobrante de bagazo, incluyendo aquella en que se entrega vapor a la destilería.

Otro de los aspectos evaluados en el estudio energético fue el hecho de que por el concepto de paralizar las centrifugas de tercera, bomba de azúcar

y de miel, cuando se trabaja con un sistema de dos masas cocidas se dejan de consumir 149,6 kW/h y se incrementa la carga en 45 kw/h por la utilización de una bomba de jugo diluido, una de diluido-clarificado y el movimiento del clarificador dando como resultado final un ahorro de 104,56 kW/h.

Tabla 3  
Resultados de la redistribución de agua en la fábrica de azúcar

Indicador	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Consumo de agua en la fábrica de azúcar, t/h (caldera y proceso)	89,96	72,77	72,77
Agua disponible ingenio, t/h	98,02	63,77	63,75
Agua de reposición necesaria en la fábrica de azúcar, t/h	0	9,02	9,02
Agua necesaria Destilería, t/h (batición + vapor)	47,28	17,95	10,47
Agua total de reposición necesaria, t/h (ingenio – destilería)	39,22	26,97	19,79

Con la extracción del jugo diluido de la fábrica se afecta el balance de agua de la misma, por lo que el análisis se enfoca al resultado del balance integral ingenio–destilería. En el caso de la destilería sólo se toma en cuenta el agua utilizada para producir sus necesidades de vapor y el agua de las baticiones. En el caso del balance de agua sólo en la fábrica de bioetanol es importante hacer notar que cuando se ajusta la batición en la fermentación a 110 g/L se logra un ahorro de 29, 33 t/h por el concepto de sustitución de jugo por miel en la fermentación.

## Conclusiones

1. La integración de los procesos de producción de bioetanol y azúcar considerando los aspectos concernientes a las nuevas tecnologías en los estudios de integración material y energética, son una vía idónea para favorecer la introducción de una tecnología más limpia en la industria de la caña de azúcar y sus derivados.
2. Con la aplicación de las herramientas de integración de masa y energía se logra una mejor redistribución del agua y se obtiene una mayor eficiencia energética en los procesos integrados, se disminuye el consumo de vapor del proceso y se obtienen mayores sobrantes de bagazo. Con la extracción de jugos diluidos para la fermentación alcohólica se disminuye el consumo de vapor del proceso en un 22 % con el sistema de tres masas cocidas y de un 28 % con el sistema de dos masas cocidas.

3. La extracción de los jugos pobres del proceso de fabricación de azúcar favorece la calidad del jugo clarificado de la fábrica de azúcar, así como se obtiene una mayor eficiencia en el proceso de fabricación de alcohol, dado que se logra una mayor disponibilidad de materia prima, se reduce el consumo de agua fresca y se obtienen residuales con índices más bajos de contaminación.

## Bibliografía

1. DUNN, R.; BUSH, G. E. "Using Process Integration Technology for Cleaner Production". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 8, 2000, págs. 1-23.
2. EL-HALWAGI, M. M; SPRIGGS, H. D. "Solve Design Puzzles with Mass Integration". *Chemical Engineering Progress*. August, 1998, págs. 25-42.
3. 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.
4. GONZÁLEZ, M.; VERELST, H.; ESPINOSA, R. AND GONZÁLEZ, E. "Simultaneous Energy and Water Minimization Applied to Sugar Process Production", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 25. Págs. 177-182. ISSN 1974-9791 DOI: 10.3303/CET1125030. 2011.
5. \_\_\_\_\_. "Water and Wastewater Management in a Sugar Process Production". *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 25. Págs. 839-844, ISSN 1974-9791. DOI: 10.3303/CET1125140, 2011 b.
6. GONZÁLEZ, C., M., ACEVEDO, L., GONZÁLEZ S. E. La Integración de Procesos en la

- 
- minimización del impacto ambiental. Congreso de Química. México. septiembre (b), 2002.
7. \_\_\_\_\_ (c). Aplicación de la Integración de Procesos a la reducción del consumo energético en una industria. Conferencia Científica internacional de Ingeniería Mecánica, Noviembre. 2002.
  8. [www.emcentre.com/unepweb/tec\\_case/food\\_15/newtech/n8.htm](http://www.emcentre.com/unepweb/tec_case/food_15/newtech/n8.htm). Rationalization of Water Use at a Sugar Mill in Mexico. Francisco Lopez Fierros. Ingenio San Francisco Ameca. Ameca, Jalisco. Mexico.
  9. [www.sagarpa.gob.mx/forma//documentos/ingenio03.htm#PROCESOS](http://www.sagarpa.gob.mx/forma//documentos/ingenio03.htm#PROCESOS) ¿Representa el etanol una alternativa viable para la agroindustria de la caña de azúcar ing. Manuel Enríquez Poy (C.N.I.A.A. Revista Ingenio Octubre de 1998).
  10. [www.cpp.org.pk/etpibrchr/brochure-sugar.pdf](http://www.cpp.org.pk/etpibrchr/brochure-sugar.pdf). Responding to the Environmental Challenge Pakistan's Sugar Industry. Technologies of Change Recommendations for Pakistan's Sugar Sector
  11. [www.deh.gov.au/industry/corporate/eecp/case-studies/nwsugar.html](http://www.deh.gov.au/industry/corporate/eecp/case-studies/nwsugar.html). Waste Minimisation and Energy Efficiency - NSW Sugar Milling. Bruce Lamb Manager, Technical Services NSW Sugar Milling Cooperative Ltd. Harwood Island, NSW 2465.
  12. WNC 27:99 Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. NC 27:99. 1999. Comité Estatal de Normalización. Nivel Central.
  13. WILSON, S. D.; MANOUSIOUTHAKIS, V. I. "Heat/Mass exchange network. Synthesis with stream mixing: a linear program formulation". Annual meeting session 199. AICHE, 1997.
  14. [www.cedrl.mets.nrcan.gc.ca](http://www.cedrl.mets.nrcan.gc.ca): Heat recovery opportunities at the Smurfit –Stone mill in La Tuque. 2002. Bajado 30/1/2003.
  15. [www.ipst.edu/epri/new\\_pubs.htm](http://www.ipst.edu/epri/new_pubs.htm): Minimizing Mill Water Use with Water Pinch Technology Energy and Water Successive Design Methodologies. 2002. Bajado 26/01/03.
  16. [www.oit.doe.gov/bestpractices.html](http://www.oit.doe.gov/bestpractices.html) /thermal pinch in paper mill.pdf. Georgia –Pacific Palatka plant usus termal pinch análisis evaluates water reduction in plant-wide energy assessment. December 2002. Bajado 9/12/02.
  17. [www.oit.doe.gov/bestpractices.html](http://www.oit.doe.gov/bestpractices.html). Boise Cascade Mill Energy Assessment. December 2000. Bajado 29/01/03.
  18. [www.oit.doe.gov/bestpractices.html/inlandpaper1.pdf](http://www.oit.doe.gov/bestpractices.html/inlandpaper1.pdf) Inland paperboard and packaing.