

---

# *Análisis de factibilidad de la integración de los procesos de producción de azúcar y alcohol*

**Meilyn González Cortés\*, Yaillet Albornas Carvajal, Javier Feijoo**

**Caraballo, Rubén Espinosa Pedraja, Erenio González Suarez**

**\*1Centro 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**

---

*Feasibility analysis of integration of sugar and alcohol production processes*

*Anàlisi de viabilitat de la integració dels processos de producció de sucre i alcohol*

*Recibido: 20 de marzo de 2013; revisado: 20 de mayo de 2013; aceptado: 23 de mayo de 2013*

## **RESUMEN**

En el estudio se determinaron los consumos de agua y energía en las producciones de azúcar y alcohol analizando en detalle los circuitos de estos recursos con el objetivo de proponer un manejo eficiente de los mismos en los procesos integrados.

Para la integración energética se utilizó el software ASPEN PLUS 11.1, donde se realizó la modelación y simulación de las etapas de evaporación, cristalización y centrifugación del proceso de fabricación de azúcar y de fermentación y destilación del proceso de producción de alcohol técnico B. Se evaluaron alternativas de intercambio de calor entre corrientes calientes y frías en cada uno de los procesos con el ASPEN PINCH.

Se realizó la evaluación económica de las modificaciones propuestas considerando dos escenarios, con el fin de determinar la factibilidad de integración de los procesos de azúcar y alcohol.

**Palabras claves:** azúcar, alcohol, integración de procesos, minimización agua, Aspen Pinch.

## **SUMMARY**

In the study the consumptions of water and energy were determined in the productions of sugar and alcohol analyzing in detail the circuits of these resources with the objective of proposing an efficient handling of the same ones in the integrated processes.

For the energy integration the software ASPEN PLUS was used 11.1, where was carried out the simulation of the evaporation, crystallization and centrifugal separation stages in the sugar process and fermentation and distillation of the technical alcohol B process. Also were evaluated alternative of exchange of heat among hot currents and cold in each one of the processes with ASPEN PINCH.

An economic evaluation of the proposed modifications was carried out considering two scenarios, with the purpose of determining the feasibility of integration of the processes of sugar and alcohol.

**Key words:** sugar, alcohol, process integration, water minimization, Aspen Pinch.

## **RESUM**

En l'estudi es van determinar els consums d'aigua i energia en les produccions de sucre i alcohol analitzant en detall els circuits d'aquests recursos amb l'objectiu de proposar una gestió eficient dels mateixos en els processos integrats.

Per a la integració energètica es va utilitzar el programari ASPEN PLUS 11.1, on es va realitzar la modelització i simulació de les etapes d'evaporació, cristallització i centrifugació del procés de fabricació de sucre i de fermentació i destil·lació del procés de producció d'alcohol tècnic B. Es van avaluar alternatives d'intercanvi de calor entre corrents calentes i fredes en cada un dels processos amb l'ASPEN PINCH. Es va realitzar l'avaluació econòmica de les modificacions proposades considerant dos escenaris, per tal de determinar la viabilitat d'integració dels processos de sucre i alcohol.

**Paraules claus:** sucre, alcohol, integració de processos, minimització aigua, Aspen Pinch.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria azucarera se propone aumentar de forma gradual la producción de azúcar, avanzar en la creación y recuperación de las plantas de derivados y subproductos. En toda esta estrategia también se le está prestando especial atención al manejo eficiente del agua y energía en estos procesos, debido a que cada día se agotan más los combustibles fósiles y el agua, además un uso eficiente de estos recursos conduce a procesos más eficientes desde el punto de vista técnico y económico. (Alva-Argaez y Savulescu 2009); (Klemeš, 2007); (Martínez-Patiño et al., 2010).

Por esta razón, se han desarrollado métodos como la Integración de Procesos la cual se ha convertido en una herramienta muy útil y aplicable a la industria química para disminuir los consumos de energía y los vertimientos de residuales al medio ambiente; un adecuado control de los anteriores parámetros elevan la eficiencia de los procesos productivos en cualquier industria. (González et al., 2010); (Kemp, 2007); (Kim, 2009); (Matijašević et al., 2010); (Klemeš J et al. 2010).

La reducción del consumo de agua y energía en las industrias azucareras y alcoholeras, es un tema de máxima prioridad, no se cuenta con una tecnología muy moderna, lo que dificulta el ahorro. En muchas fábricas de azúcar de Cuba debido a la antigüedad de los equipos tecnológicos (calentadores, vasos evaporadores, tachos, etc.) no se recupera la cantidad de condensado necesaria para mantener el proceso, por lo que se necesita reponer esa cantidad de agua faltante, aumentado así el consumo de la misma y de energía eléctrica. Por otra parte las destilerías consumen gran cantidad de energía, y si además hay un derroche de agua, el proceso se vuelve ineficiente, por lo que se trabaja en la fermentación de diferentes sustratos que ayuden a minimizar los consumos de agua.

Existe una gran problemática en los procesos en estudio en cuanto a la entrega del vapor a la destilería, debido a que no se está produciendo el vapor necesario para mantener en funcionamiento el proceso de producción de azúcar, no se está generando la cantidad de vapor vegetal necesaria para apoyar el vapor producido en la caldera. Como consecuencia de esto, el vapor que es enviado a la destilería se interrumpe para alimentar el proceso tecnológico del azúcar, lo cual afecta grandemente a la destilería, sin el suministro de vapor o una inadecuada presión de vapor en la columna las flemas alcohólicas se condensan y no alcanzan el tope de la columna saliendo todo el alcohol junto con la vinaza lo cual representa una gran pérdida para el proceso.

Por otro lado el manejo del agua en estos procesos, sobre todo en el proceso de fabricación de azúcar es otro aspecto que está deficiente en esta fábrica.

Es por lo anterior que el trabajo se propone realizar un análisis de factibilidad de las posibilidades de integración en los procesos de azúcar y alcohol con el objetivo de dar solución a las debilidades detectadas en cada uno y lograr una mayor eficiencia en los mismos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del estudio se tuvo en cuenta la metodología desarrollada por Savulescu, (Savulescu et al., 2005 a, b). Su enfoque combina el concepto del pinch térmico

con el análisis pinch para el reuso de agua. En principio los objetivos de minimización del consumo de agua son considerados en un primer análisis y luego se analiza el impacto y la relación del mejor uso de la energía térmica en el manejo total de agua en el proceso.

El análisis de la reducción del consumo de agua se analiza solamente tomando en consideración un solo contaminante, en este caso el contenido de azúcares en las corrientes acuosas identificadas, (Wang y Smith, 1994); (Urbaniec y Wernik, 2002). Los datos para la información de las redes de agua y energía térmica son extraídos del análisis del proceso para con ellos construir las curvas de composición correspondientes e identificar los requerimientos mínimos para cada uno de estos recursos. (Polley y Picón-Núñez, 2009); (Poplewski y Jezowski, 2009); (Matijašević, et al., 2010) y (Martínez-Patiño, et al. 2010).

Un esquema eficiente para el uso de la energía reduce el consumo de utilidades calientes y frías y consecuentemente disminuye el agua requerida para la alimentación a la caldera y el agua de enfriamiento respectivamente, es importante hacer notar que un nuevo esquema también implica cambios en el diseño y configuración del proceso. (Urbaniec et al., 2000).

El uso de menos agua fresca se refleja en una carga de calor para el proceso. Una reducción del agua debe afectar el esquema energético en diferentes formas dependiendo de la cantidad y calidad de la energía desplazada con la eliminación de los flujos de agua. Es frecuente que en las plantas que procesan alimento, cuando un flujo de agua fresca con alta calidad térmica es reemplazado esto es un gran potencial para la reducción del consumo de vapor. En este contexto se encuentran los flujos que están por encima del punto pinch en la curva de composición. Por otro lado, cuando el flujo que es reemplazado tiene baja calidad térmica el gasto de energía en el proceso se podría incrementar y consecuentemente los requerimientos de frío en el proceso. En este caso esto se corresponde con los flujos que se encuentran debajo del punto pinch.

El estudio se enmarca en el análisis de los procesos de fabricación de azúcar y alcohol durante el período de 2010-2012, se incluyen dos períodos de zafra. En esta empresa la fábrica de azúcar tiene una capacidad de molida de 150 t/h de caña y la destilería una capacidad de producción de 450 HL/d, y produce alcohol técnico B (93 °GL) o extrafino (96,3 °GL).

Es importante hacer notar que esta fábrica tiene la particularidad que en la mayor parte de su período de zafra, una parte del jugo, aproximadamente el 22%, se destina a la producción de alcohol, ya que aledaña al central se encuentra situada una destilería de alcohol. Es por esto que en la sección de molida se dividen los jugos destinados a la fabricación de azúcar y los que serán enviados a la destilería. Los jugos que se destinan a la fabricación de azúcar son los más ricos en sacarosa lo que representa alrededor de 1677,31 t/d (en caña) que se obtienen en la primera extracción, mientras que a la producción de alcohol en la destilería se envían 473,09 t/d (en caña) provenientes de la segunda extracción y de los filtros. Es necesario dividir estos jugos porque no llevan el mismo tratamiento de purificación.

El esquema de evaporación de la fábrica de azúcar consiste de dos pre- evaporadores con extracciones a calentadores, tachos y destilería y un triple efecto con extracción en el primer vaso para los calentadores. Con más detalles este esquema se explica a continuación:

- Dos pre- evaporadores que trabajan con vapor de escape de la línea de 20 lbf/plg<sup>2</sup>. De los pre- evaporadores se extrae vapor vegetal para tachos, destilería, calentadores 3, 4 y para el primer vaso del múltiple.
- Tres vasos evaporadores que trabajan con vapor vegetal, los cuales tienen extracciones para calentadores 1 y 2.
- Siete calentadores tipo Webre.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de estudio. Uso y manejo del agua en el proceso de fabricación de azúcar.

En las fábricas de azúcar existe un excedente de agua de modo que el agua fresca a incorporar en el proceso sea mínima, (Urbaniec et al., 2000), pero en el proceso en estudio no sucede así, se pudo constatar en el estudio realizado que la fábrica durante el período de zafra se mantuvo con un déficit de agua, por lo que continuamente requirió de un suministro de agua tratada lo cual repercutió de forma negativa en la economía del proceso. Esta problemática está muy relacionada a las deficiencias del sistema de manejo de las corrientes térmicas en el proceso, estos dos elementos agua y energía están estrechamente ligados por lo que un mal manejo de uno de estos, repercute en un ineficiente uso del otro y viceversa.

Del análisis de la tabla 1 se puede observar que en los dos escenarios evaluados del proceso de producción de azúcar, el proceso debe ser suficiente para suplir sus requerimientos de agua y de hecho aportar agua para otros circuitos como es el circuito de agua de enfriamiento de equipos.

Es importante hacer notar que en este proceso se puede recuperar agua como condensado en los calentadores de jugo, pre- evaporadores y tachos. Esta agua en dependencia de sus características puede ser recirculada a diferentes etapas del proceso.

En un caso de estudio similar para un ingenio que muele 48 t/h se determinó que las pérdidas en este sistema están alrededor de los 271 m<sup>3</sup>/d por lo que considerando en este caso que se trata de una fábrica cuya norma de molienda es de 150 t/h se estiman unas pérdidas de 813 m<sup>3</sup>/d. El balance del proceso tecnológico aporta 1276 m<sup>3</sup>/d de agua de buena calidad. El agua necesaria de reposición en otros circuitos es de 813 m<sup>3</sup>/d, por tanto el agua sobrante en el ingenio es de 463 m<sup>3</sup>/d.

En cuanto al consumo de energía térmica se hizo un estudio del consumo de vapor en el proceso de fabricación de alcohol, el mismo se muestra a continuación:

**Tabla 1. Resultados del balance de agua por bloques tecnológicos**

	Sin desvío de jugo a destilería t/h	Con desvío de jugo a destilería t/h
Equivalente en caña molida	89,6	69,88
Azúcar producida	8,62	6,71
Rendimiento (t caña /t azúcar)	10,41	
<b>Molienda</b>		
Jugo de caña	77,95	60,79
Agua de imbibición	26,88	20,96
Agua en bagazo	5,82	4,54
Jugo mezclado	99,01	77,21
Agua de limpieza	0,458	
Agua consumida en molienda	27,31	21,41
<b>Purificación</b>		
Agua en alcalización	2,97	2,31
Jugo alcalizado	101,98	79,52
Jugo de los filtros	20,39	20,39
Agua de lavado en los filtros	3,67	3,67
Agua cachaza	3,36	3,36
Jugo clarificado	102,29	79,82
Agua consumida en purificación	6,64	5,98
<b>Múltiple efecto</b>		
Masa de vapor calentador jugo clarificado	2,31	1,81
Masa de vapor calentador jugo mezclado (calentador 1)	3,38	2,63
Masa de vapor calentador jugo mezclado (calentador 3)	1,69	1,32
Masa de vapor calentador jugo mezclado (4)	3,72	2,90
Jugo a destilería	-	17,16
Masa de vapor calentador de jugo a destilería	-	0,52
Condensado de los calentadores	11,10	9,18
Agua generada (masa de agua generada producto de la evaporación)	78,76	61,46
<b>Tachos</b>		
Consumo de vapor en tachos	17,02	13,28
Agua condensada en tachos	16,50	12,88
<b>Dilución de mieles</b>		
toneladas de meladura	9,23	7,20
agua para dilución de miel A	2,03	1,58
toneladas de miel B	5,73	4,47
agua dilución miel B	1,26	0,98
Agua total consumida para dilución de mieles	3,29	2,56
Centrifugación	0,40	
<b>Balance de agua del proceso de extracción</b>		
Generada en evaporación	78,76	61,46
Condensados calentadores	11,1	9,18
Generada en tachos	16,50	12,88
Consumida en molienda	27,34	21,41
Consumida en purificación	6,64	5,98
Consumida en dilución de mieles	3,29	2,56
Consumida en centrifugación	0,40	
Sobrante, t/h	69,09	53,17

**Tabla 2. Resultados de los consumos de vapor en el proceso para los escenarios evaluados**

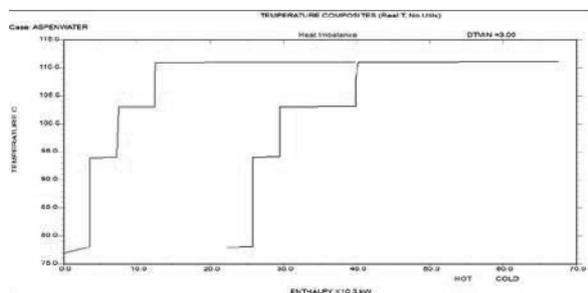
Equipo	Tipo de vapor	Con desvío a destilería, Kg/h	Sin desvío a destilería, Kg/h
Calentador rectificador	escape	1763	1961
Calentador 1 y 2	escape o vegetal	2558	2880
Calentador 3	escape o vegetal	1279	1540
Calentador 4	escape o vegetal	2814	3008
Calentador 1y 2 destilería	escape	1918	-
Pre-evaporador 1	escape	22530	23502
Pre-evaporador 2	escape	20903	22973
Vaso 1	vegetal	16745	21472
Vaso 2	vegetal	6461	8285
Vaso 3	vegetal	5261	6746
Tachos	vegetal	13276	17024
Destilería	vegetal	5793 (vapor disponible a la destilería)	2577 (vapor disponible a la destilería)
Total Consumo de vapor escape	-	49930(*)	49977 (**)
Total consumo de vapor vegetal	-	50702	61996

Para determinar el valor de (\*) se consideró que el calentador 4 es el único que consume vapor de escape de los calentadores que pueden trabajar con ambos vapores y para el valor de (\*\*) se consideró que el calentador 3 es el único que consume vapor de escape de los calentadores que pueden trabajar con ambos vapores. Como resultado de los cálculos realizados se comprobó que cuando no existe desvío de jugo a la producción de alcohol, los pre-evaporadores no producen el vapor necesario para suplir los requerimientos de vapor en la destilería, debido a que aunque aumenta la masa de jugo a tratar y se produce una mayor evaporación todo el vapor producido se consume en el proceso de producción de azúcar.

### Integración energética en la estación de evaporación. Análisis Pinch.

El análisis pinch se realizó para determinar los verdaderos requerimientos de energía de la etapa de evaporación, para ello se identifican y caracterizan en cuanto a flujo y temperatura, las corrientes frías y calientes en el esquema energético en estudio.

Con la aplicación del software, ASPEN PINCH 11.1, se comprueba que no existen en las curvas de composición una verticalidad entre las corrientes que conforman los perfiles de temperatura caliente y fría, lo que significa que no se está aprovechando adecuadamente el área de transferencia de calor en estos equipos, figura 1.



**Figura 1. Curvas de composición corrientes frías y calientes**

De acuerdo al análisis pinch este proceso tiene un requerimiento mínimo de utilidades de 37620 Kg/h de vapor y de acuerdo al balance de energía realizado en el proceso cuando hay desvío de jugo se tiene un consumo de vapor aproximado de 47000 Kg/h, o sea en el proceso hay un sobreconsumo de 9380 Kg/h de vapor.

Lo anterior demuestra que pueden existir otras combinaciones en el proceso que contribuyan a disminuir el consumo de vapor y el mejor aprovechamiento del área instalada lo cual conduciría a un proceso de mayor fiabilidad en cuanto al envío de vapor para la destilería. El valor del pinch se encuentra a 109,5°C, lo que también demuestra que se pueden proponer configuraciones para tratar de desplazar este punto hacia un valor más cercano a la temperatura del vapor alimentando a los pre-evaporadores.

### Evaluación económica

En este sentido se realizó una evaluación económica de las modificaciones necesarias para llevar a cabo la integración de los procesos de azúcar y alcohol (desvío de jugo y suministro de vapor al proceso de producción de alcohol) y como se aprecia en la tabla siguiente es factible desde el punto de vista económico realizar la integración de los procesos en estudio.

Para resumir se debe plantear que los principales beneficios técnicos que se obtienen en el proceso dado las modificaciones propuestas son:

- Reducción del consumo de agua fresca
- Mayor aprovechamiento del vapor vegetal
- Mayor eficiencia energética
- Reducción de los costos totales del proceso

**Tabla 3. Resultados de la evaluación económica**

Indicador	Valor
VAN, \$	2 272 118,42
TIR, %/año	54,5
PRD, año	1,54

### CONCLUSIONES

1. En el proceso en estudio existe un manejo inadecuado del agua y energía lo cual repercute de manera negativa en los procesos de obtención de azúcar y alcohol.
2. El vapor generado en el área de evaporación no es aprovechado eficientemente lo que trae consigo un sobreconsumo de vapor de escape y un mal funcionamiento del central y por ende de la destilería.
3. Mediante el análisis pinch se demostró que pueden existir otras combinaciones en el proceso que contribuyan a disminuir el consumo de vapor y el mejor

- 
- aprovechamiento del área de evaporación, lo cual conduciría a un sistema de mayor fiabilidad en cuanto al envío de vapor para la destilería.
4. A través de cálculos y herramientas utilizadas se verificó la factibilidad técnica y económica de la integración material y energética entre los procesos de producción de azúcar y alcohol.
  5. Al incluir los beneficios de la integración material y energética en la evaluación económica, se produjeron reducciones en los costos de los diferentes parámetros, influyendo de manera favorable en los indicadores económicos dinámicos.
14. Poplewski G. and Jezowski J., (2009), Optimisation based approach for designing flexible water usage network. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 409-414.
  15. Urbaniec K, Zalewski P and Klemeš J (2000) Application of process integration method to retrofit design for Polish sugar factories, *Zuckerindustrie*, 125(4), 244-247.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alva-Argaez A., and Savulescu L., (2009), Process integration for sustainable development water reuse project selection – a retrofit path to water and energy savings. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 403. AIDIC. ISBN 978-88-95608-04-4; ISSN 1974-9791
2. Klemeš J, Smith R, and Kim J. (2007) *Handbook of water and energy management in food processing*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
3. Martínez-Patiño J., Picon Nunez M., Hernández Figueroa M. A., Verda V. and Serra L. M., (2010), On the integration of power, heat and water in industrial processes, *Chemical Engineering Transactions*, 21, 253-258 DOI: 10.3303/CET1021043
4. González Cortés M., Verelst H. and Gonzales E., (2010), Energy integration of multiple effect evaporators in sugar process production, *Chemical Engineering Transactions*, 21, 277-282 DOI: 10.3303/CET1021047
5. Kemp I (2007) *Pinch Analysis and Process Integration*, 2nd edn, Oxford, Butterworth Heinemann.
6. Kim J. K., (2009), Process integration and conceptual design with process simulators. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 833 - 838.
7. Matijašević L., Spoja D. and Dejanovic I., (2010), Water system integration by the process superstructure development, *Chemical Engineering Transactions*, 21, 373-378 DOI: 10.3303/CET1021063
8. Klemeš J, Friedler F, Bulatov I., Varbanov P. (2010) *Sustainability in the Process industry – Integration and Optimization*. McGraw-Hill, New York.
9. Savulescu L, Kim J and Smith R (2005a) Studies on simultaneous energy and water minimisation – Part I: systems with no water re-use, *Chemical Engineering Science*, 60(12), 3279–3290.
10. Savulescu L, Kim J and Smith R (2005b) Studies on simultaneous energy and water minimisation – Part II: systems with maximum re-use of water, *Chemical Engineering Science*, 60(12), 3291–3308.
11. Wang Y P and Smith R (1994) Wastewater minimisation, *Chemical Engineering Science*, 49, 981–1006.
12. Urbaniec K and Wernik J (2002) Identification of opportunities to save water in a beet sugar factory, *Sugar Industry/Zuckerindustrie*, 127, 439–443.
13. Polley G. and Picon-Nunez M.,(2009), Design of water and heat recovery networks for the simultaneous minimization of water and energy consumption, *Chemical Engineering Transactions* 18, 899-904, doi: 10.3303/CET0918147.