

Estrategia de reconversión de la industria diversificada de la caña de azúcar para la producción conjunta de bioetanol y coproductos

Revamping strategy of diversified industry of sugar cane for combined production of bioethanol and co-products

*Marlén Morales-Zamora^{*1}, Erenio González-Suárez², Leyanis Mesa-Garriga², Eulogio Castro³*

¹ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química-Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuani km 5 ½. Santa Clara. CP: 54830. Villa Clara. Cuba.

²Centro de Análisis de Procesos. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuani km 5 ½. Santa Clara. CP: 54830. Villa Clara. Cuba.

³Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Jaén. Edif. B3, Campus Las Lagunillas s/n. España.

(Recibido el 12 de enero de 2012. Aceptado el 18 de enero de 2013.)

Resumen

Dada las condiciones actuales de la economía latinoamericana, los resultados científicos han mostrado notable interés en la determinación del efecto de la variación de las materias primas en la eficiencia tecnológica, energética y económica de los procesos, así como en la evaluación de alternativas para la intensificación y reconversión de instalaciones industriales para adaptarlas a los requerimientos y disponibilidades actuales de materias primas y portadores energéticos. El trabajo propone una estrategia para la reconversión de instalaciones en la industria de procesos ante la incorporación de nuevas producciones energéticas y ambientalmente eficientes, como es el caso de estudio de la producción de bioetanol y coproductos a partir del bagazo de la caña de azúcar, considerando el análisis de vida de útil de los equipos, así como la integración de los procesos. Se analiza la reconversión en una planta de furfural de bagazo con la incorporación de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos a partir de los mejores resultados obtenidos. Se realizan los balances de masa y energía en los procesos, se analiza económicamente el

* Autor de correspondencia: teléfono: 53 + 42 + 211 825, 211 826, fax: 53 + 42 + 281 100, correo electrónico: marlenm@uclv.edu.cu (M. Morales)

impacto de la reconversión con la incorporación de la producción de bioetanol y coproductos a partir del bagazo con el aprovechamiento de las capacidades y las instalaciones existentes en la industria de derivados de la caña de azúcar.

----- **Palabras clave:** reconversión, etanol, bagazo, furfural, integración

Abstract

Given the current conditions of Latin American Economy, scientific results have shown a marked interest not only to find out variation effects on raw material but also to find out technologic-energetic-economic efficiency of processes. They have also tried to asses alternatives so as to intensify and revamp industrial plants. These plants will be supposed to match the requirements and current availabilities of raw material and energy carriers.

The work proposes a strategy for revamping of facilities in process industry whit the incorporation of new energy and environmentally efficient productions like is study case of bioetanol production and co-products from bagasse of sugar cane considering the analysis of useful life of equipment as well as the integration of processes. The revamping is analyzed in furfural plant of bagasse with the incorporation of ethanol technology of lignocellulosic residual from the best results obtained. The mass and energy balances are determined in processes; the economic impact of revamping is analyzed whit the incorporation of bioetanol production and co-products from bagasse with the use of capacities and the existent facilities in the derived industry of sugar cane.

----- **Keywords:** Revamp, ethanol, bagasse, furfural, integration

Introducción

Para triunfar en un mundo tan competitivo como el actual, e incluso para sobrevivir las empresas no se deben considerar definitivamente instaladas en un mercado, ni en una tecnología determinada. Es por ello, que resulta de vital importancia, considerar sistemas de instalaciones; y no plantas aisladas, aspecto válido no solo para las nuevas instalaciones, sino también para la reconstrucción y modernización de las ya existentes. [1]

El estudio de los problemas operativos en las plantas de proceso; y la corrección de defectos y modernizaciones de las instalaciones, ha sido una práctica permanente en la industria de procesos. Si bien las grandes empresas proveedoras de ingeniería incorporan estos avances en sus propuestas, por lo general no trabajan en

actualizaciones, modernizaciones, puestas a punto y reconversiones del equipamiento existente, lo cual evidentemente trae la obsolescencia del equipamiento de las plantas de producción, por el simple paso del tiempo y por la superación tecnológica. [2- 4]

El análisis de procesos es una vía para lograr la intensificación de los procesos tecnológicos en las viejas plantas de procesos y en las modernas instalaciones, logrando elevar la disponibilidad y aprovechamiento de las capacidades de las plantas. Es por ello que resulta importante considerarlo, ante la necesidad de reconversión, reordenamiento, ampliación y reconstrucción de instalaciones industriales, en función de fundamentar los estudios sobre el aprovechamiento de los fondos básicos, los

recursos materiales y energéticos, así como la calidad de los productos y la contaminación ambiental. [3, 4]

El objetivo del trabajo se enmarca en: proponer una metodología para la reconversión en la industria, aplicada a un caso de estudio, que permita lograr un aprovechamiento de las capacidades instaladas en la industria de derivados de la caña de azúcar y las posibilidades de emplear las instalaciones existentes, de forma integrada en las nuevas producciones de bioetanol y coproductos, considerando el análisis de la vida útil de los equipos y la integración de los procesos.

Experimentación

Estrategia propuesta para la reconversión en la industria de procesos

Una modernización, reordenamiento o reconversión en una instalación industrial debe concentrarse en tres tópicos u objetivos esenciales para las inversiones en un país en desarrollo:

- Incrementar la capacidad de la planta, con una calidad estable del producto y una disminución de los consumos, especialmente los importados.
- Una disminución del tiempo de retorno de la inversión destinada a la modernización de las plantas.
- Un incremento de la disponibilidad de la instalación.

En la Industria de Procesos a nivel internacional se acometen métodos y/o prácticas de trabajo como son:

- Eliminación de cuellos de botella operativos en plantas de proceso. (Debottlenecking)
- Remodelación de un equipo o instalación, por cambio parcial de componentes. Por lo general, es requerido cuando se deben eliminar cuellos de botella, aumentar

capacidad y/o mejorar especificaciones de productos. (Revamping)

- Estudio y solución de problemas operativos en equipos e instalaciones de proceso. (Troubleshooting)

El Debottlenecking de una instalación obliga a un estudio de los problemas que tiene el proceso para su operación, apareciendo en ese momento distintos problemas asociados, que deben ser corregidos. La práctica del Troubleshooting y eventualmente el Revamping de las instalaciones y equipos, es una práctica constante en la industria de procesos continuos a nivel internacional. [5, 6]

Partiendo de la base de la necesidad de desarrollar con efectividad la reconversión de las industrias ante la asimilación e incorporación de nuevas producciones, se propone una estrategia para la reconversión y/o inversión en la industria de procesos. La estrategia permitirá lograr un aprovechamiento de las capacidades instaladas en la industria de sus derivados y las posibilidades de emplear las instalaciones existentes en las nuevas producciones. Ante nuevos productos, mercados y tecnologías, la metodología propuesta analiza los siguientes criterios paso a paso:

- I. Búsqueda de información. Vigilancia tecnológica de las nuevas producciones y tecnologías que se desean incorporar. Si la tecnología que se desea incorporar es adquirida por una planta instalada se pasa a II, sino es necesario diseñar nuevos equipos para la nueva planta.
- II. Comparación de la tecnología instalada con la nueva tecnología a adquirir. Si las capacidades instaladas satisfacen las nuevas capacidades a incorporar se analiza si la nueva tecnología requiere otros equipos de proceso, sino se pasa a III.
- III. Búsqueda de compromisos de capacidad Mercado-Capacidad instalada-Capacidad nueva. Estudios previo inversionistas para las propuestas de alternativas de reanimación y reconversión.

- IV. Análisis técnico de los equipos de procesos instalados. Valoración del estado técnico del equipamiento y su posible reutilización.
- V. Control de las variables operacionales contra criterios de calidad de diseño de los equipos en operación. Si la nueva tecnología a incorporar requiere de cambios operacionales se pasa a VI. Si no requiere cambios operacionales se pasa a VIII.
- VI. Definición de las nuevas modificaciones necesarias en las variables y parámetros operacionales. Evaluación de las modificaciones a las diferentes escalas.
- VII. Analizar el riesgo operacional de utilizar el equipo con la nueva tecnología.
- VIII. Análisis de la obsolescencia y vida útil de los equipos instalados para su adaptación a la nueva tecnología. Se define si es posible reutilizar el equipo par la nueva tecnología o si es necesario diseñar o adquirir los equipos de proceso para la nueva tecnología.
- IX. Integración de los procesos de producción. Se analiza si es posible integrarla o no con otros plantas de producción. Se definen

las corrientes intermedias que pueden ser utilizadas.

- X. Análisis de factibilidad técnico-económico de adaptación de la tecnología. Se obtiene si es factible o no la adaptación e incorporación de la nueva tecnología en las condiciones reales de la empresa.

La metodología de análisis permite, establecer un procedimiento para la reconversión y/o inversión en un proceso tecnológico, a partir de la incorporación de nuevas producciones.

Caso de estudio

El caso de estudio analizado en este trabajo es una industria diversificada de la caña de azúcar en Cuba. Esta empresa cuenta en su estructura empresarial con el ingenio azucarero, unidades de cooperativas de abastecimiento de caña y diferentes plantas de derivados, entre las que se encuentran: la planta de producción de alcohol, la planta de tableros de fibras de bagazo y la planta de furfural, encontrándose estas últimas paralizadas desde hace varios años. La estructura general del proceso de producción con las posibilidades de incorporación e integración de las producciones se muestra en la figura 1.

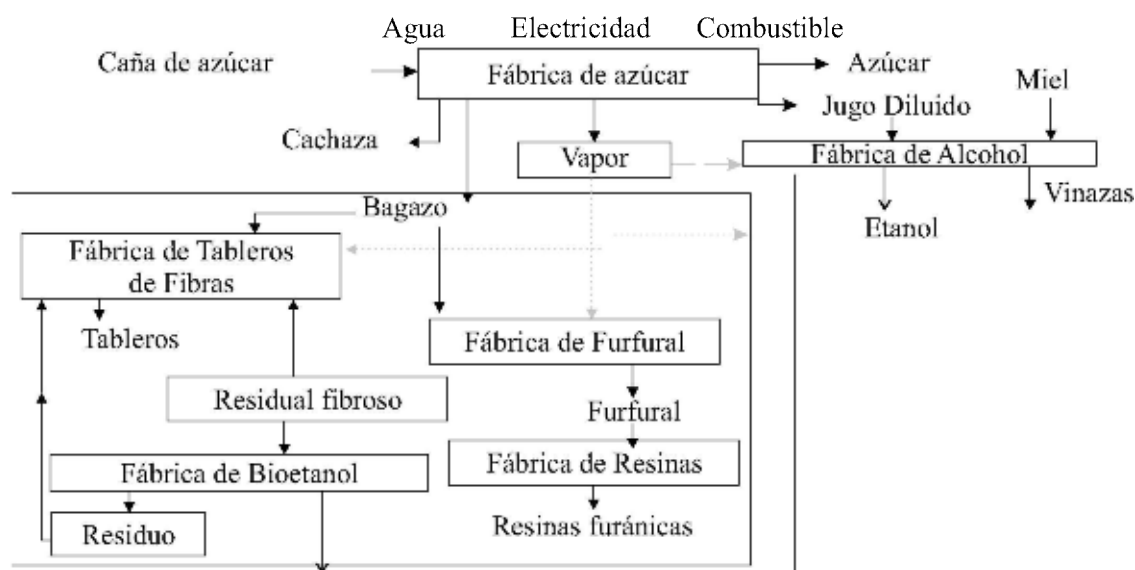


Figura 1 Diagrama de procesos en el complejo azucarero caso de estudio

Consideraciones de la tecnología de etanol de lignocelulósicos para la reconversión

Entre una de las alternativas que hoy exhibe el proceso de diversificación azucarera está lo relacionado con los diferentes usos que se le puede dar al bagazo, sobre todo en la obtención de biocombustibles, como es el caso de la obtención del bioetanol a partir de su hidrólisis ácida.

El estudio detallado de esta tecnología y de las etapas que la conforman ha despertado el interés en el análisis de los coproductos que se obtienen en cada una, sobre todo los obtenidos en la primera etapa (hidrólisis ácida del bagazo), como parte del pretratamiento que debe recibir el mismo para ser empleado en la producción de bioetanol.

Entre los coproductos que se destacan, se encuentran residuales aprovechables como materias primas en la conformación de tableros, así como un condensado con contenido de furfural.

Antes de iniciar el análisis de la metodología de trabajo propuesta con la incorporación de la tecnología de etanol de bagazo es importante analizar los estudios previos del pretratamiento de la biomasa para la producción de bioetanol. [7 - 10]

Para el caso específico del bagazo de caña de azúcar se han utilizado varios sistemas de pretratamiento, y en particular se ha empleado con resultados esperanzadores el pretratamiento organosolv en dos etapas (una ácida y otra básica), así como un análisis de los costos de producción para diferentes alternativas de tratamiento con las dos etapas [11 - 15].

Se evaluó el pretratamiento en 2 etapas, la primera (ácida) para separar la fracción xilano del bagazo y obtener pentosas para etanol u otros usos; la segunda (organosolv) para separar la lignina (buena calidad) e incrementar la eficiencia de la hidrólisis enzimática (HE). Los principales resultados obtenidos resumen que:

Para una etapa: concentración de glucosa en el hidrolizado por la HE del sólido insoluble en agua ($C(\text{glucosa})=13,68 \text{ g/L}$), y el rendimiento de glucosa ($\text{g de glucosa} / 100 \text{ g de bagazo inicial}$) de 16,48.

Para dos etapas: glucano=78,2%, xilano=3,83%, lignina= 20,90%, recuperación =51,45%, para un rendimiento de glucosa en HE de 54,92, y rendimiento de glucosa ($\text{g de glucosa} / 100 \text{ g de bagazo inicial}$) de 22,30.

- El uso del H_2SO_4 presenta resultados mejores, en la región experimental analizada, sobre los parámetros respuestas estudiados.
- El uso de dos etapas significa un incremento en todos los resultados, así como, un incremento en el número de equipos y del valor de la inversión, por lo que se impone un análisis de alternativas técnico económicas.
- De acuerdo con los fines que se quieran utilizar las pentosas, por ejemplo: en la producción de furfural, xilitol, etanol, se requieren cambios en las conducciones de operación del pretratamiento ácido. Para el caso de obtención de furfural: Temperatura 175-185 °C; Relación sólido - líquido 1:1.
- Se requiere profundizar en la utilización de la lignina recuperada y en los desechos sólidos de la HE.

Criterios a tener en cuenta en la reconversión en el caso de estudio

El bagazo sometido a una digestión ácida a alta temperatura hidroliza la celulosa, obteniéndose furfural, alcohol metílico, acetona y ácido acético, así como ácido levulínico y furfurílico.

La tecnología para la obtención del furfural incluye la hidrólisis y un proceso de refinación. El furfural se forma como consecuencia de la descomposición de las pentosas.

La cinética de descomposición de la xilosa durante un calentamiento en ampulas en solución

acuosa a temperatura entre 140°C y 220°C. En este caso la reacción de descomposición de la pentosa es catalizada por los propios productos ácidos formados en el proceso. La descomposición del furfural que origina principalmente ácido fórmico y sus sustancias poliméricas de alto peso molecular. (resinas). [12- 16]

Del diagnóstico realizado en la planta de furfural se detectaron varios puntos débiles que limitan un buen desarrollo del proceso tecnológico, siendo más crítica, el área de la etapa de hidrólisis del bagazo. De esta etapa de hidrólisis, se reportan algunos regímenes de obtención de furfural de las últimas producciones de trabajo de la fábrica, según se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Regímenes de producción de furfural reportados de producciones anteriores

<i>Índices</i>	<i>Regímenes</i>			
	1	2	3	4
Consumo de H ₂ SO ₄ (%)	3	3	1	0
Temp. inicial (°C)	140	140	140	170
Temp. final (°C)	180	180	180	180
Tiempo de digestión (min)	60	70	80	70
Módulo de recolección	3,8	4,2	4,7	4,4
Conc. prom. de furfural en el cond. (%)	3,1	2,8	2,3	1,4
Rend. de furfural (%)	12,1	11,8	10,9	5,9
Rend. de furfural del teórico (%)	68,7	66,8	62,2	33,7
Rend. de ácidos orgánicos (%)	8,07	8,4	5,6	5,5

De estos resultados se puede observar que, a medida que existe un elevado tiempo de cocción del bagazo para diferentes módulos de recolección, disminuye el rendimiento de furfural en el condensado, así como se obtiene un residual fibroso prácticamente quemado, sin posibilidades de ser reutilizado.

La etapa de hidrólisis de bagazo, coincide con la primera etapa de pretratamiento ácido de la tecnología de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos. Por tanto resulta, factible analizar la hidrólisis ácida del bagazo, a partir de los mejores resultados obtenidos de

la tecnología de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos y de variar las condiciones operacionales, con menor tiempo de reacción, que permitan obtener un residual aprovechable, y un condensado de furfural con una composición adecuada.

A continuación en la figura 2 se muestra la propuesta de reconversión en el caso de estudio. Esta propuesta sin lugar a dudas, permitirá una mejor eficiencia en las condiciones operacionales de dicha etapa, brindando un mayor valor agregado a los residuales del proceso, así como un menor consumo de vapor en la etapa de hidrólisis.

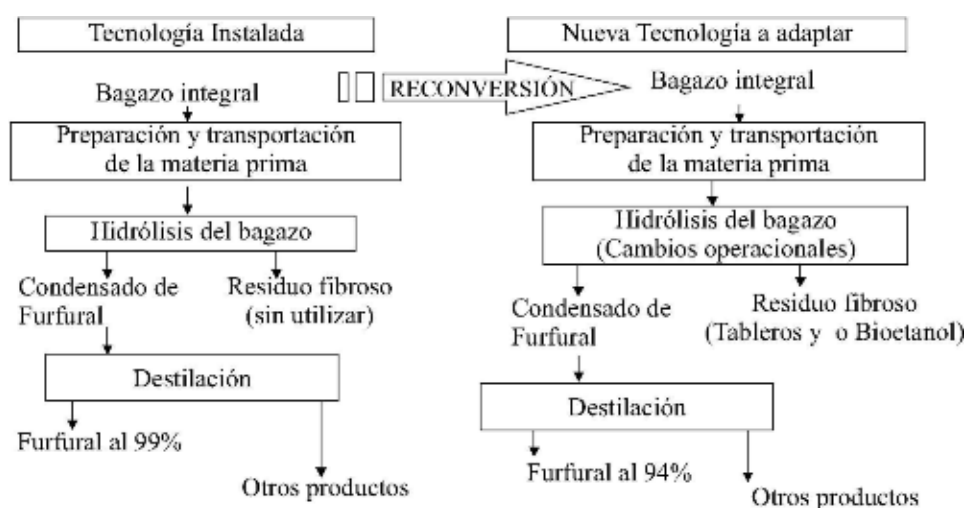


Figura 2 Diagrama tecnológico de la propuesta de reconversión en la planta de furfural

Para el estudio se utilizó un reactor piloto de 10 L de capacidad acorde con criterios de similitud geométrica del reactor industrial, con el propósito de analizar de manera experimental dos puntos experimentales de regímenes de trabajo, según los mejores resultados obtenidos por [8, 12, 15]. A continuación se describen las principales consideraciones:

Base de trabajo	100 gramos de bagazo seco
Ácido sulfúrico	1% y 4%
Tiempo de cocción	40 min
Relación sólido-líquido	4:1 y 1:1
Temperatura	120°C y 175°C

Para todas las caracterizaciones evaluadas, tanto en la materia prima, como en los resultados de los residuales sólidos pretratados se utilizó el método PULS de análisis, el cual es un método general empleado, para la determinación del contenido de azúcares, lignina y cenizas. [16]

Resultados y discusión

Como resultado del análisis experimental, según la propuesta de reconversión planteada en la etapa de hidrólisis acida del bagazo, con la incorporación de la tecnología de etanol de bagazo se obtienen los siguientes resultados resumidos en la tabla 2.

Tabla 2 Resultados de la conversión de xilosa en las condiciones en la etapa de hidrólisis

<i>Temp</i>	<i>Tiempo Minutos</i>	<i>% de Ácido</i>	<i>S/L</i>	<i>Tipo Reactor</i>	<i>Rend Final</i>	<i>%Potencial Recuperación</i>	<i>%Real Recuperado</i>
120-130	40	4	4:1	Laboratorio	6,755*	72,89	72,89
120-130	40	4	4:1	Piloto	7,626	69,50	42,51
175-185	40	1	1:1	Piloto	12,547	49,81	4,52

Como resultado del experimento, se obtuvo un condensado con un 2% de furfural para la relación S/L: 1:1, para un rendimiento final de 12,54 lo

cual favorece la conversión de la xilosa en menor tiempo de reacción comparado con los resultados de la tabla 2.1. (Rendimiento de 12,1 en 60 min).

En la figura 3 se muestra un resumen esquemático de los resultados promedios obtenidos en la etapa de hidrólisis ácida del bagazo y en la evaluación final de la hidrólisis enzimática si se utiliza el residual fibroso. Se obtiene como promedio una relación de 6,73 kg de furfural/100 kg de bagazo y 8,38 kg de bagazo/ litro de etanol. Estos resultados son comparables con los obtenidos por [8, 12, 13].

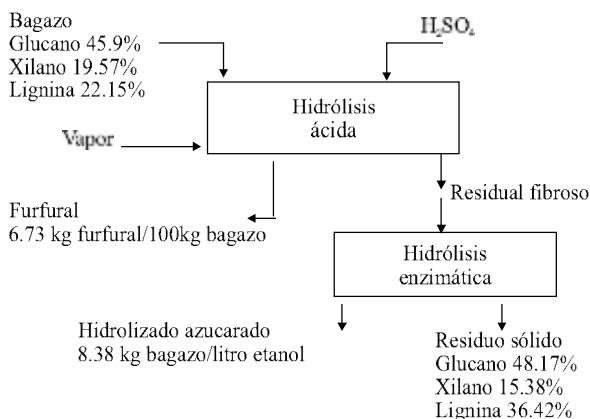


Figura 3 Resumen esquemático de los resultados obtenidos de la reconversión

Para el análisis económico, se procedió a la determinación de los balances de masa y energía y la defectación de todos los equipos de la planta. De la defectación de la planta se observó que los equipos principales del proceso de producción de furfural se encuentran, hidrolizadores, tanques de almacenamiento y columnas de destilación; no encontrándose equipos auxiliares de motores y bombas, rompe bultos de bagazo, así como sistemas de instalaciones eléctricas y luminarias. Estos equipos serán cargados al costo de inversión para la reconversión y reanimación de la planta.

En el análisis económico se valoran dos variantes: utilizando los tres digestores instalados y utilizando 2 de los digestores.

Se analiza primeramente utilizando la máxima capacidad de producción, donde 1 digestión equivale a la utilización de los 3 digestores. En cada digestor se alimentan, 4 t de bagazo con 50% fibra. Se obtiene, 1 t de furfural por cada 40 t o de bagazo, lo que representa, para las condiciones,

144 t de bagazo/día. Si se conoce que cada digestor de trabajo admite una capacidad de 4 t de bagazo/ digestión, y se supone 6 digestiones/ turno de trabajo, para 3 turno de trabajo/ día, es posible obtener 1,8 ton de furfural esperada en la planta de producción, bajo las condiciones actuales, sin analizar la reconversión.

Para los balances de masa y energía con la propuesta de reconversión se utilizan las expresiones generales en cada etapa como sigue a continuación, y con ayuda de un simulador se obtienen los resultados en la tabla 3.

$$Mb * Cpb(tf - ti) + Mcond * \lambda_{vcp} = Mv * \lambda_v \quad (1)$$

Mb : masa de bagazo a hidrolizar.

Cpb : calor específico del bagazo.

$(tf - ti)$: temperatura final e inicial del bagazo a hidrolizar.

$Mcond$: masa de condensado de furfural obtenido de la hidrólisis.

λ_{vcp} : entalpía del vapor de furfural al 2% fracción masa obtenido de la reconversión.

Mv : masa de vapor alimentado en la hidrólisis.

λ_v : entalpía del vapor de agua.

$$Mv = 318,29 \frac{kgv}{h}$$

$$F_{furf} * x_f = Re_s * x_r + Destf * x_d \quad (2)$$

F_{furf} : flujo de condensado de furfural alimentado a la columna de destilación.

x_f : composición de furfural en la alimentación (2%).

Re_s : flujo de residual obtenido en la columna de destilación.

x_r : composición de furfural salida del residuo de la columna de destilación

$Destf$: flujo de destilado de furfural obtenido.

x_d : composición de furfural en el destilado a la salida de la columna de destilación. (94%)

Tabla 3 Resumen de los balances de masa y energía en la planta de furfural

<i>Variables</i>	<i>Variante 3 digestores</i>	<i>Variante 2 digestores</i>
Consumo de bagazo (t/día)	144	96
Consumo de vapor (t/día)	11,45	7,64
Producción de furfural (t/día)	4,11	2,74

En dependencia del esquema energético de un complejo azucarero y su eficiencia, es posible obtener de un 10-15% de bagazo sobrante, que se utiliza como combustible y como fuente de otras producciones. En la empresa estudiada, el esquema energético esta ineficiente, por tanto requiere de un análisis posterior para lograr un aprovechamiento adecuado del bagazo, que permita cumplir con las disponibilidades y suministros a las plantas de derivados.

Para el análisis económico del impacto de la reconversión en la planta de furfural con la incorporación de la tecnología de etanol de bagazo, se considera un precio de furfural de 1150\$/t [17]. A continuación en la tabla 4, se muestran los resultados de los indicadores económicos de factibilidad de la propuesta de reconversión para las dos variantes analizadas.

Tabla 4 Principales resultados de los indicadores económicos de factibilidad.

<i>Variables</i>	<i>Variante 3 digestores</i>	<i>Variante 2 digestores</i>
VAN (\$)	574025,21	363927,07
TIR (%)	33	25
PRD (años)	4,5	5

De los resultados de los indicadores económicos, se demuestra que aún, disminuyendo la capacidad de producción por baja disponibilidad de la materia prima, se logran resultados prometedores de los indicadores económicos. Para la variante de 3 digestores, el VAN es de 574025,21 \$/año para una PRD de 4.5 años y para la variante de 2 digestores, el VAN es de 363927,07 \$/año para una PRD de 5 años, lo cual justifica el análisis inversionista para la posible reanimación de la planta de furfural con la reconversión hacia la producción conjunta de etanol de bagazo.

Los resultados del proceso de reconversión bajo estudio son preliminares, ya que se parte de los estudios previos inversionistas de la adaptación de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos en un caso de estudio donde existe una planta de furfural anexa a un central azucarero, lo

cual disminuye los costos de inversión toda vez que se utilicen los equipos instalados. Para continuar con la adaptación de la misma los estudios económicos deben seguir un proceso más integral en todo el complejo azucarero, para valorar el impacto de la adaptación en el esquema global.

Conclusiones

En la actualidad, un enfoque integral de una nueva agroindustria azucarera o de una nueva cadena productiva, requiere no sólo de ideas innovadoras, sino de la visión para instrumentar nuevos modos de pensar y de hacer para encontrar nuevos productos con un valor añadido que compitan favorablemente en el mercado. La estrategia propuesta para la reconversión y/o inversión en la industria de procesos, permitirá lograr un aprovechamiento de las capacidades instaladas en la

industria de sus derivados y las posibilidades de emplear las instalaciones existentes en las nuevas producciones. A partir de la reconversión en la etapa de hidrólisis ácida del bagazo, es posible obtener un residual fibroso aprovechable para la etapa de hidrólisis enzimática, de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos y un condensado de furfural con una composición adecuada, para la destilación en la tecnología de producción de furfural. Del análisis técnico – económico en la planta de furfural se obtienen resultados satisfactorios de factibilidad económica para las dos variantes analizadas, en función de la disponibilidad de materia prima, brindando mejores resultados, la variante de utilizar la capacidad total instalada, con un PRD de 4,5 años.

Referencias

1. E. González. *Asimilación (Adopción) y reconversión de tecnologías para la producción de Biocombustibles*. Ediciones cooperativas. CYTED. 2008. pp. 30-40.
2. E. Rosa. “Análisis de alternativas de inversión en la industria química considerando la fiabilidad de los equipos”. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara. 1996. Cuba. pp. 25-32.
3. J. Campbell. “The Reliability Hand Book. Plant Engineering and Maintenance”. A Clifford/Elliot Publication. Vol. 23. 1999. pp. 23-27.
4. M. Yañez, H. Gómez de la Vega, G. Valbuena. *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilística de Riesgo*. Reliability & Risk Management CA. 2004. pp. 309-340.
5. Z. Spekujljak, H. Monella. *Troubleshooting y Revamping nuevas herramientas para mejorar la producción en equipos de procesos*. S I T Ingeniería S. R. L. C. 11no Congreso Argentino Petroquímica. Buenos Aires. Argentina. 1998. pp. 1-2.
6. Y. Bin, C. Wymann. “Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol”. *Society of chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd/ Biofuels, bioproduct.Bioref*. Vol. 2. 2007. pp. 26-40.
7. L. Mesa, E. González, C. Cara, M. González, E. Castro, S. Mussatto. “The Effect of Organosolv Pretreatment Variables on Enzymatic Hydrolysis of Sugarcane Bagasse”. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 168. 2011. pp.1157-1162.
8. B. Lavarack, D Rodman. “The acid hydrolysis of sugarcane bagasse hemicellulose to produce xylose, arabinose, glucose and other products”. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 23. 2002. pp. 367-380.
9. T. López, P. Rathi, E. Ramírez, M. Sales. “Acid pretreatment of lignocellulosic biomass: Steady state and dynamic analysis”. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 21. 2010. pp. 445-450.
10. S. Uppal, R. Gupta, R. Dhillon, S. Bhatia. “Potential of sugarcane bagasse for production of furfural and its derivatives”. *Sugar Tech*. Vol. 10. 2008. pp. 298-301.
11. L. Mesa, González, C. Cara, M. González, E. Castro, I. Solange. “Mussatto, An approach to optimization of enzymatic hydrolysis from sugar cane bagasse based on organosolv pretreatment”. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 85. 2010. pp. 1092-1098.
12. D. Montané, J. Torras, X. Farriol. “High-temperature dilute-acid hydrolysis of olive stones for furfural production.” *Biomass and Bioenergy*. Vol. 22. 2002. pp. 295 - 304.
13. M. Vázquez, M. Simón. J. Téllez, L. Ramírez. “Hydrolysis of sorghum straw using phosphoric acid: Evaluation of furfural production”. *Bioresource Technology*. Vol. 98. 2007. pp. 3053-3060.
14. L. Mesa, E. González, E. Ruiz, I. Romero, C. Cara, F. Felissia, E. Castro. “Preliminary evaluation of organosolv pretreatment of sugar cane bagasse for glucose production”. Application of 2³ experimental design. *Appl. Energy*. Vol. 87. 2010. pp. 109-114.
15. H. Mansillahl, J. Baeza, S. Urzúa, G. Maturanah. “Acid catalyzed hydrolysis of rice hull: evaluation of furfural production”. *Bioresource Technology*. Vol. 66. 1998. pp. 189-193.
16. J. Puls, J. Stork, J. Schuseil. “Reactions of isolated cellulases, hemicelluloses and ligninases with fibrous materials and isolated components of woods”. *Papier*. Vol. 47. 1993. pp. 719-728.
17. Quiminet. *Furfural product*. 2012. <http://www.quiminet.com>
18. R. Smith. *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley & Sons Ltd. University of Manchester. West Sussex, England. ISBN: 0-471-48681-7. pp. 17-30, 58-76, 236-256
19. K. Ogawa. *Chemical Engineering a new perspective*. Elsevier B.V. Books. Tokyo Institute of Technology. Amsterdam, The Netherlands. 2007. pp. 143-147.
20. K. Zeitsch. “The chemistry and technology of furfural and its many by products”. ELSEVIER Book. *Sugar Series*. Vol. 13. 2000. pp. 20-40, 56-70.