

PROPUESTA DE REANIMACIÓN Y RECONVERSIÓN DE UNA INDUSTRIA DIVERSIFICADA DE LA CAÑA DE AZÚCAR A PARTIR DEL APROVECHAMIENTO DEL EQUIPAMIENTO INSTALADO

Marlén Morales Zamora,
Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química-Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
Leyanis Mesa Garriga, Erenio González Suárez,
Centro de Análisis de Procesos. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
Eulogio Castro Galiano, Cristóbal Caro,
Universidad de Jaén, España.

Recibido:

Aceptado:

En el trabajo se analizan las posibilidades de reconversión de una industria de la caña de azúcar, a partir de la utilización del bagazo en las producciones de furfural, tableros, bioetanol y otros coproductos, aprovechando las capacidades y los equipos instalados en dicha industria. Se evalúan experimentalmente, los mejores resultados obtenidos en la etapa de hidrólisis del bagazo de la tecnología de obtención de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos a escala piloto, logrando la obtención de furfural y un residual fibroso, que puede ser aprovechado para la producción de bioetanol y/o tableros. Se realiza una evaluación técnico-económica y ambiental de las posibilidades de reconversión de una industria diversificada de la caña de azúcar con la incorporación de nuevas producciones más limpias, que permitirán dar un aprovechamiento a las instalaciones existentes en la industria de derivados de la caña de azúcar.

Palabras claves: Bioetanol, furfural, reanimación, reconversión, tableros de fibra.

PROPOSAL OF REANIMATION AND REVAMP OF ONE INDUSTRY DIVERSIFIED OF THE SUGAR CANE FROM ADVANTAGE OF THE INSTALLED EQUIPMENT

In the work are analyzed the possibilities of revamp the sugar cane industry, starting from the use of the bagasse in the furfural productions, boards, bioetanol, and other co-products, taking advantage of the capacities and the equipment installed in this industry. They are evaluated experimentally the best results obtained in the bagasse hydrolysis stage of the bioetanol technology obtaining starting from residuals lignocelulósicos to scale pilot, achieving the furfural obtaining and a residual one fibrous that can be taken advantage for the bioetanol production and/or boards. It is carried out a technician-economic and environmental evaluation of the possibilities of revamp a diversified sugar cane industry with the incorporation of new cleaner productions that will allow giving a use to the existent equipment in the sugar cane industry.

Key words: bioethanol, fibred board, furfural, reanimation, revamp.

INTRODUCCIÓN

La disminución de recursos fósiles afecta también la fabricación de productos químicos, es por ello que resulta necesario considerar todas las posibilidades en la matriz de materias primas-productos químicos de cada país. Sin lugar a dudas, la aplicación de la ciencia y la técnica para intensificar las producciones industriales es un problema cardinal, que requiere acciones conjuntas en esta esfera del conocimiento y la actividad empresarial con mayor intensidad.

La Industria Azucarera para su desarrollo competitivo ha requerido y requiere de un esfuerzo innovador constante, toda vez que se fomenta la diversificación de la misma, a partir del uso integral de la caña de azúcar, y 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 objetivo del trabajo fue realizar un análisis preliminar de las posibilidades de reconversión de una industria de la caña de azúcar, a partir de la utilización del bagazo en las producciones de furfural, tableros, bioetanol y otros coproductos, aprovechando las capacidades y los equipos instalados en dicha industria.

MARCO TEÓRICO

1. Consideraciones generales sobre la utilización de la biomasa como fuente de productos de alto valor agregado.

Dada la crisis existente en el mercado del petróleo, el modelo energético mundial está tomando un nuevo rumbo hacia la búsqueda de nuevas alternativas ecoeficientes. Por otro lado, el manejo y reciclado de los desechos comienzan a ser muy costosos y problemáticos, y el paralelo crecimiento de la población requiere de mayor cantidad de energía y productos para el consumo. Por tanto, resulta meritoria la alternativa de pasar de la economía del petróleo a la de las fuentes renovables utilizando todas las posibilidades de las plantas de biomasa. (Octave S.; D. Thomas, 2009).

1.1 Estudios sobre el pretratamiento de la biomasa para la producción de bioetanol.

La abundancia y relativo bajo costo de los materiales lignocelulósicos los han hecho atractivos como materias primas para la producción de etanol en suficientes cantidades de fuentes renovables y razonable bajo costo. Desechos no aprovechados de la industria forestal y residuos agroindustriales pueden ser utilizados como materias primas; en particular, el bagazo de caña de azúcar es un desecho de las producciones de la industria de la caña de azúcar de gran potencial para la fabricación de etanol de residuos lignocelulósicos.

Dada la resistencia de la matriz lignocelulósica al ataque de enzimas, se considera necesario un sistema de pretratamiento previo, y la mejor forma de evaluar la calidad del mismo, en un material lignocelulósico, será sin duda la eficacia de una hidrólisis enzimática en condiciones normalizadas.

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.^{4,5} (Mesa, L.; 2008, González E., 2009). 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(gluc) = 13,68 g/L), y el rendimiento de glucosa (g de glucosa /100 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 (g de glucosa /100 g de bagazo inicial) de 22,30.

- el uso del H₂SO₄ 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 con 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.

1.2 Generalidades sobre la utilización de la biomasa en la producción de furfural y tableros.

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 furfurfílico. Otras materias primas para la obtención de furfural son la madera, el olote de maíz, la cascarilla de arroz, la borra de algodón y otras.

La tecnología para la obtención del furfural incluye la hidrólisis y un proceso de refinación. Se forma como consecuencia de la descomposición de las pentosas. La cinética de descomposición de la xilosa durante un calentamiento en ámpulas 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 sustancias poliméricas de alto peso molecular. (resinas).

El catalizador más generalizado en la práctica industrial es el ácido sulfúrico por su aceptable actividad catalítica y bajo costo.

El furfural, furfuraldehído o fural es un solvente selectivo para productos petroquímicos. Desde 1996, casi la mitad del consumo mundial de furfural se destina a la producción de alcohol furfurfílico, que a su vez se usa para producir resinas y como solvente

en la preparación de nailon. Sirve de relleno y extensor en madera laminada, y también se usa para la producción de tetrahidrofurano, en la extracción del butadieno y en la fabricación de insecticidas amigables con el ambiente y nematicidas. El derivado 2-metilfurano se emplea como solvente orgánico, pesticida e intermediario farmacéutico.

Los principales resultados de la composición de la celolignina obtenidos en el residual fibroso, como resultado de la hidrólisis ácida son: humedad: 55-60 %, sustancias solubles: 5.5 %, pentosana residual: 2.0 %, lignina: 30-40 %, cenizas: 9 %.

Por otro lado, las aplicaciones de los tableros han experimentado un continuo ascenso debido, fundamentalmente, a su adaptabilidad para sustituir elementos de la madera maciza, sobre todo como material en la industria de la construcción. Además favorece la disminución de la tala indiscriminada de árboles haciendo uso de producciones limpias, y por otra parte destacando los múltiples usos del bagazo de caña.

Estos tableros son fabricados a partir de fibras de madera o bagazo húmedas sometidas a gran presión y elevada temperatura. Para unir las fibras se utilizan resinas naturales contenidas en las mismas.

En nuestro país, se producen tableros de fibras y de partículas, en diferentes lugares, con una disminución notable en las producciones, ya que algunas de ellas se encuentran paralizadas, de aquí la importancia de su reanimación.

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 y que, desde luego, tengan un mejor precio, así como, de un aprovechamiento adecuado de las capacidades e instalaciones existentes en las fábricas de derivados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se enmarca en la Empresa Azucarera

Amancio Rodríguez de la provincia de Las Tunas, partiendo de la base de las necesidades de reanimación y reconversión de dos plantas de derivados, furfural y tableros de fibras, con el objetivo de lograr una sostenibilidad en el mercado y una recuperación financiera de la empresa, a partir del aprovechamiento de las capacidades y las instalaciones existentes en las mismas.

Las tareas de la investigación vienen dadas por dos estudios de análisis de proceso, de manera que permitan lograr un análisis integral, como el descrito a continuación:

Caso 1. Analizar las posibilidades técnico-económicas de reanimar la planta de furfural, a partir de los mejores resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento ácida de la tecnología de etanol de residuos lignocelulosicos.

Caso 2. Analizar las posibilidades técnico-económicas de reanimación y reconversión de la planta de tableros de fibras, para su posterior inclusión con los residuales fibrosos de la producción de furfural y/o etanol de bagazo.

Para ello, se valoran las siguientes condiciones en cada estudio:

Condiciones Caso 1

1. La etapa de hidrólisis de furfural, coincide con la primera etapa de pretratamiento ácida de la tecnología de etanol de residuos lignocelulosicos. Por tanto, resulta factible analizar preliminarmente la hidrólisis ácida del furfural, a partir de los mejores resultados obtenidos de la tecnología de etanol de residuos lignocelulosicos⁵ 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.
2. Al evaluar experimentalmente los mejores resultados obtenidos a escala piloto, se obtuvo un condensado con un 2 % de furfural, y con los resultados descritos en la tabla 1.
3. Analizar las posibilidades técnico-económicas de producción de furfural, a partir de la defecación de todos los equipos de la planta, y de un análisis de demanda-capacidad de materia prima (bagazo). Para ello, se valoran dos variantes: utilizando los tres digestores instalados y utilizando 2 de los digestores.

Tabla 1. Impacto de las condiciones de primera etapa de pretratamiento en la xilosa recuperada. Base: 100 g de bagazo seco

Temp	Tiempo Minutos	% de Ácido	S/L	Tipo Reactor	Xilosa Final	% Potencial Recuperación	% Real Recuperado.
120-130	40	4	4/1	Laborat	6,755*	72,89	72,89
120-130	40	4	4/1	Piloto	7,626	69,50	42,51
175-185	25	1	1/1	Piloto	12,547	49,81	4,52

Condiciones Caso 2

1. Analizar la propuesta de eliminar el secadero de túnel continuo (alto consumidor de vapor y demolido actualmente) y utilizar la prensa de vapor (discontinua). Esta propuesta, sin lugar a dudas, obtendrá un tablero de fibra con calidad inferior a los obtenidos en esa planta en producciones anteriores, pero permitirá reconvertir y aprovechar el equipamiento instalado en esta planta de derivados en producciones que aportarán a la matriz económica de la empresa. Esta

propuesta requiere un análisis de la llamada Ingeniería Inversa, en función del ciclo de prensado y de la capacidad que admite la prensa discontinua. El esquema se muestra a continuación en la figura 1.

2. Se determinó que considerando un ciclo de prensado total (carga, exprimido, secado, descarga) de 15 min, es posible una producción de 14,6 m³ de tableros por día, para una capacidad de producción de 62 % con respecto a la capacidad real instalada.

3. Se realizó la defectación de todos los equipos de la planta, y la determinación de los balances de masa y energía en todo el proceso, determinando las principales corrientes de proceso, así como el análisis económico de la propuesta

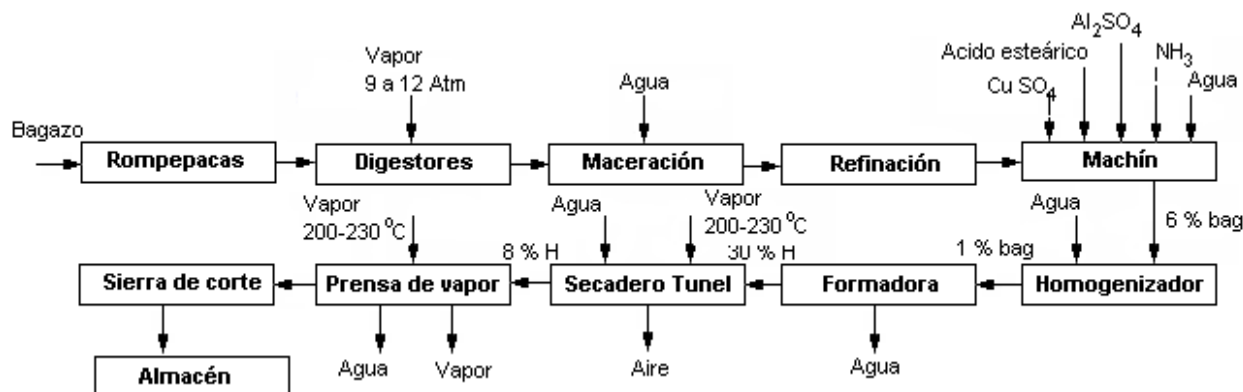


Figura 1. Diagrama tecnológico del proceso de producción de tableros de fibras de bagazo en la planta de la EA Amancio Rodríguez

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados Caso 1

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 % de fibra. Se obtiene, 1 ton de furfural por cada 40 t de bagazo, lo que representa, para las condiciones, 144 t de bagazo/día.

En dependencia del esquema energético de un complejo azucarero y su eficiencia, es posible obtener un 10-15 % de bagazo sobrante, que se utiliza como combustible y como fuente de otras producciones. En la empresa estudiada, el esquema energético

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.

En dependencia de la disponibilidad de la materia prima (bagazo) se obtienen los resultados de los balances e indicadores económicos analizando la utilización de 3 digestores y 2 digestores en el proceso de producción; de los mismos, se demuestra que aun disminuyendo la capacidad de producción por baja disponibilidad de la materia prima, se lograron resultados prometedores de los indicadores económicos, lo cual justifica el análisis inversionista para la posible reanimación de la planta.

Consumo de vapor en la destilación = 60,88 Kgv/h

Tabla 2. Principales resultados de los balances e indicadores económicos

Variables	Variante 3 digestores	Variante 2 digestores
Consumo de bagazo (t/día)	144	96
Producción de furfural (t/día)	3,6	2,4
Consumo de vapor en la hidrólisis (Kg/digestión)	948,72	632,48
Consumo total de vapor (tw/año)	3853,34	2716,23
Costo de inversión (\$/año)	460317,492	460317,492
Costo total de producción (\$/año)	1080308,475	749951,537
VAN (\$)	1,209,325,37	475,939,95
TIR (%)	53	29
PRD (años)	2,3	4,2

Resultados Caso 2

Como resultado de los balances de masa y energía, en la tabla 3 se muestran los flujos de las corrientes principales del proceso de producción de tableros.

Como resultado de los balances de masa y energía en las principales corrientes del proceso de producción, se obtuvo que los mayores consumidores de vapor fueron la prensa y los digestores y las etapas mayores consumidoras de agua fueron la homogenización y maceración.

Como se observa, durante el proceso de fabricación de tableros se consumen y se vierten grandes volúmenes de agua, por lo que resulta importante recircularla, para lograr un aprovechamiento en el

proceso. Por otro lado, esta instalación no cuenta con una planta de tratamiento de las aguas residuales, es por ello que se recomienda valorar estos análisis para posteriores estudios.

Del diagnóstico técnico realizado a la planta de tableros de fibras se detectaron que existen los principales equipos de procesos, no siendo así los equipos auxiliares (motores eléctricos y bombas) de todas las etapas. Se realizó la defectación y los costos de todos los equipos.

En las tablas 4 y 5 se muestran los principales resultados económicos obtenidos en el análisis de la reconversión con la propuesta analizada, para 14,6 m³ de tableros/día, lo que equivale a 4382 m³ de tableros/año.

Tabla 3. Principales consumidores en las etapas de proceso

Flujos de los consumidores	Cantidad
F agua entrada en la cascada (m ³ /día)	1 43,
F agua entrada en la maceración (m ³ /día)	194,
F agua entrada machin (m ³ /día)	0,2
F agua entrada total (m ³ /día)	1 38,2
F agua salida formadora (m ³ /día)	1 52,8
F agua salida prensa (m ³ /día)	5,
F agua salida total (m ³ /día)	1 57,
Consumo de vapor prensa (tw/día)	4,3
Consumo de vapor digestores (tw/día)	2,8

Tabla 4. Costo de las materias primas en el proceso

Productos	Precio (\$/kg)	Consumo (g/año)	Costo (\$/año)
Bagazo integral	8.0500E-03	10 200,000	82,11
Sulfato de aluminio	0,81	17 520,000	14191,20
Sulfato de cobre	4,65	65 700,000	305505,00
Parafina	1,20	43 800,000	52453,13
Acido esteárico	1,33	1 752,000	2328,41
Costo total			374559,85

Tabla 5. Costos e indicadores económicos

Elementos	Costos (\$/año)
Costo equipamiento	175 664,5
Costo total de inversión	767082,780
Costo total de producción	1286453,180
VAN (\$)	973.598,76
TIR	33 %
PRD	3,8 años

CONCLUSIONES

1. Existen posibilidades de reanimación y reconversión de las plantas de derivados de furfural y tableros en la EA Amancio Rodríguez, toda vez que se logren aprovechar y adecuar las capacidades instaladas a las nuevas condiciones tecnológicas, a partir del equipamiento existente en la planta, y de una adecuada disponibilidad de materias primas y los portadores energéticos en el complejo azucarero.
2. A partir de la reconversión en las condiciones de operación de la etapa hidrólisis ácida de la producción de furfural, 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 etapa de destilación en la tecnología de producción de furfural.
3. Del análisis técnico-económico en la planta de furfural se obtienen resultados satisfactorios y prometedores 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 instalada, con un PRD de 2,3 años.
4. Del análisis técnico-económico en la planta de tableros se obtienen resultados satisfactorios de factibilidad económica, un costo de producción de la planta a reconvertir es de 1 290 298,805 \$/año, con ganancias de 1 569 707,62 \$/año, recuperando la inversión en un período de 3,8 años.
5. FERNÁNDEZ, J. M.: Tratamiento de aguas residuales de las industrias de tableros de fibra. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, 1994.
6. GONZÁLEZ, E., M. MORALES; L. MESA; D. ACOSTA Y CASTRO: Posibilidades de la inclusión del etanol lignocelulósico en la reconversión de una instalación de la industria, de la caña de azúcar. II Taller Nacional de etanol de Residuos lignocelulosicos, Ciudad de la Habana, Cuba, 2009.
7. MESA, L.; E. GONZÁLEZ; Y. ALBERNAS; M. GONZÁLEZ; M. DÍAZ Y E. CASTRO: *Economic Evaluation of Pretreatment Alternatives for Ethanol Production from Sugar Cane Bagasse*, Hamburg, 2009.
8. YANG, BIN, AND C.E. WYMANN: *Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol*. Society of chemical Industry and John Wiley & Sons, LTd/Biofuels, bioproduct. Bioref.2:26-4, 2007.

BIBLIOGRAFÍA

1. COLECTIVO DE AUTORES: *La integración de procesos en la producción de biocombustibles en condiciones energéticamente sustentable y ambientalmente compatible*. Ediciones Cooperativas. CYTED. ISBN: 987-1246-30-0, 2006.
2. _____: *Asimilación (Adopción) y reconversión de tecnologías para la*