

RECONVERSIÓN Y SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FURFURAL CON LA TECNOLOGÍA DE ETANOL DE BAGAZO

REVAMPING AND SIMULATION OF FURFURAL PRODUCTION WITH ETHANOL TECHNOLOGY OF BAGASSE.

Harry Verelst¹, Marlén Morales Zamora², Leyanis Mesa Garriga³, Erenio González Suárez³.

¹Departamento de Ing. Química, Vrije Universiteit Brussel. Belgium

²Departamento de Ing. Química. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

³Centro de Análisis de Procesos. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

E-mail: marlenm@uclv.edu.cu; marlenmz@yahoo.es

RESUMEN

El uso integral de la caña de azúcar así como la evaluación de alternativas para la intensificación y reconversión de instalaciones industriales resulta imprescindible para el desarrollo competitivo de esta industria. El bagazo es un subproducto utilizado para la cogeneración y en la producción de furfural, tableros y etanol de residuos de lignocelulósicos.

La etapa de hidrólisis de furfural, coincide con la primera etapa de pretratamiento ácida de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos. A partir de los mejores resultados obtenidos de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos¹, y variando las condiciones de operación de la hidrólisis de furfural, con menor tiempo de reacción², se obtuvo un residual aprovechable, y un condensado de furfural con una composición adecuada.

El trabajo tiene como objetivo realizar la simulación del proceso de producción de furfural para la reconversión de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos utilizando el software ASPEN PLUS 11.1. Se determinan los balances de masa y energía en las etapas de hidrólisis ácida del bagazo y destilación del furfural. Se analizan diferentes alternativas técnico-económicas de producción a partir de los resultados de la simulación. Se obtiene que existen posibilidades de reanimación de una planta de furfural para la reconversión con la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos.

Para ello es necesario aprovechar y adecuar las capacidades instaladas a las nuevas condiciones tecnológicas, a partir del equipamiento existente en la planta, y adecuar la disponibilidad de materias primas y los portadores energéticos en el complejo azucarero.

Palabras clave: bagazo, furfural, reconversión, simulación.

ABSTRACT

The integral use of sugar cane, evaluation of alternatives for intensification and revamping of industrial facilities is necessary for the competitive development of this industry. Bagasse is a by-product used for cogeneration and furfural production, boards and ethanol of lignocellulosic residuals.

The furfural hydrolysis stage coincides with the first acid stage of pretreatment of ethanol technology of lignocellulosic residuals. From the best obtained results in the ethanol technology of lignocellulosic residuals¹ and changing the operation conditions of furfural hydrolysis, with smaller reaction time² obtained a usable residual and condensed of furfural with an appropriate composition.

The work has as objective to carry out simulation of furfural production process for revamping whit ethanol technology of lignocellulosics residuals using the software ASPEN PLUS 11.1. The balances of mass and energy are determined in the acid hydrolysis stages of the bagasse and furfural distillation. Different economic alternatives technical from production from the results of the simulation are analyzed. It is obtained that possibilities of reanimation a furfural plant exist for revamping with the ethanol technology of lignocellulosic residuals. For them it is necessary to take advantage and to adapt the capacities installed to the new technological conditions from the equipment in the plant and to adapt the power availability of raw materials and carriers in the sugar complex.

Key words: bagasse, furfural, revamping, simulation.

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.

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.

Precisamente, toda vez que se deseen incorporar tecnologías más limpias, una modernización, reordenamiento o reconversión en una instalación industrial debe concentrarse en tres objetivos esenciales para las inversiones en un país en desarrollo, los cuales se basan en: incrementar la capacidad de la planta, con una calidad estable del producto y una disminución de los consumos, especialmente los importados, disminuir el tiempo de retorno de la inversión destinada a la modernización de las plantas e incrementar la disponibilidad de la instalación.

El bagazo constituye el mayor subproducto de la Industria Azucarera y se usa fundamentalmente en la generación de energías térmica y eléctrica, para el consumo de los ingenios y plantas de derivados, como materia prima para la producción de tableros, alimento animal, furfural, y más reciente para la producción de bioetanol.

La etapa de hidrólisis de furfural, coincide con la primera etapa de pretratamiento ácida de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos. A partir de los mejores resultados obtenidos de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos¹, y variando las condiciones de operación de la hidrólisis de furfural, con menor tiempo de reacción², se obtuvo un residual aprovechable, y un condensado de furfural con una composición adecuada.

El objetivo del trabajo consiste en evaluar el impacto de la reconversión de la producción de furfural con los mejores resultados obtenidos de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos, a partir de la utilización de las herramientas de análisis de procesos y la simulación del proceso con ayuda del ASPEN PLUS 11.1

DESARROLLO

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

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. Por tanto, 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.

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.^{1,3}

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^{1,4}. 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 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

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. 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 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 sustancias poliméricas de alto peso molecular (resinas)⁵.

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 furfurílico, que a su vez se ocupa para producir resinas y como solvente en la preparación de nylon. Sirve de relleno y extensor en madera laminada, y también se usa para la producción de tetrahydrofurano, 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 %.

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

Las tareas de la investigación se desarrollan aplicando las herramientas de análisis de procesos y la simulación, de manera que permitan lograr un análisis integral, como se describe a continuación:

1. Descripción y diagnóstico de la etapa de

hidrólisis de bagazo y de la planta de furfural.

2. Propuesta y evaluación de cambios operacionales en la etapa de hidrólisis del bagazo, a partir de los mejores resultados obtenidos en la tecnología de bioetanol de bagazo.
3. Simulación de la etapa de hidrólisis y de destilación con los datos de diseño del equipamiento instalado, a partir de los resultados obtenidos de la reconversión en la etapa de hidrólisis del bagazo.
4. Análisis económico del impacto de la reconversión en la etapa de hidrólisis y destilación para la reanimación de la planta de furfural.

Condiciones en las tareas de la investigación:

1. La etapa de hidrólisis de furfural, coincide con la primera etapa de pretratamiento ácida de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos. Por tanto, resulta factible analizar preliminarmente la hidrólisis ácida del furfural, a partir de los mejores resultados obtenidos de la tecnología de etanol de² 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 siguientes, descritos en la tabla 1.

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

1. Para la simulación de las etapas del proceso de producción de furfural, a partir de los resultados obtenidos de la propuesta de reconversión y con los datos de diseño del equipamiento instalado, se toman en cuenta las consideraciones siguientes:

Etapa de hidrólisis del bagazo (Figura 1)

Reactor discontinuo

Componentes: Bagazo, H₂SO₄, xilosa, furfural, agua.

T reactor = 175 °C; P = 9 atm; Fases válidas: Vapor-Líquido; treacción = 2 400 s;

Alimentación continua: Vapor; Reacción: Conversión de la xilosa.

Método utilizado: VANL-HOC

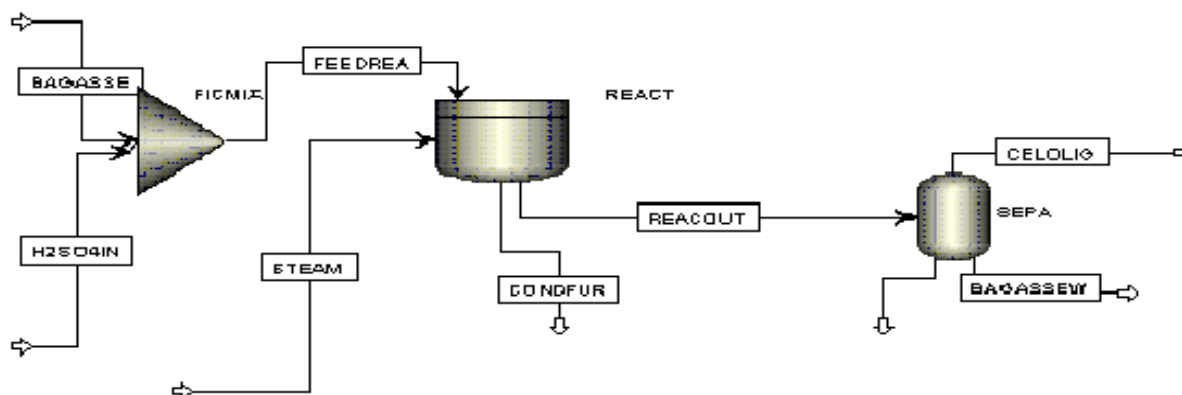


Figura 1. Diagrama de la etapa de hidrólisis de bagazo

Etapa de destilación de furfural (Figura 2)

Método utilizado: UNIF-LL; UNIFAC

Componentes: Furfural, agua.

Columna 1

Número de etapas = 30; Alimentación = 3

Condensador total; Fases válidas: Vapor- Líquido; Relación de reflujo (masa) = 5; Relación masa de la alimentación de destilado = 0,08

Columna 2

Número de etapas = 24; Condensador total; Fases válidas: Vapor- Líquido-Líquido; Convergencia:

Azeotrópica; Relación de reflujo (masa) = 9; Relación masa de la alimentación de destilado = 0,08;

Decantador: fracción del 1er líquido de retorno = 1; Tsubenfriamiento = 50 °C

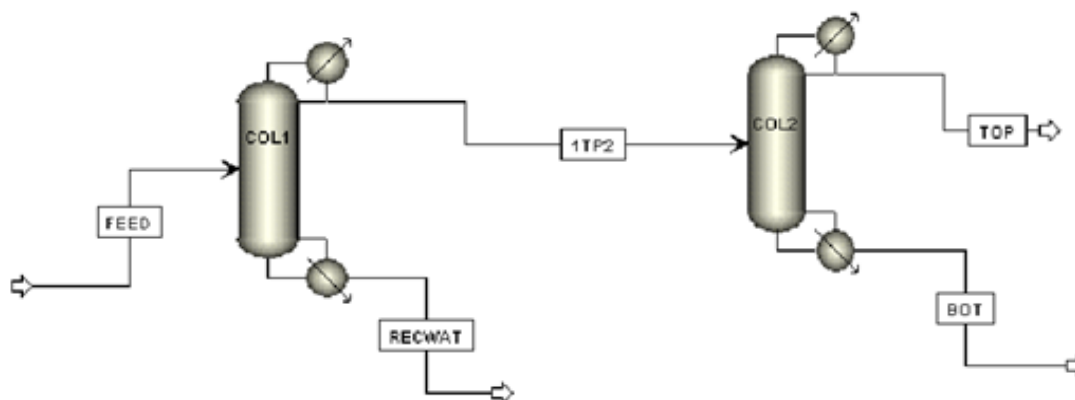


Figura 2. Diagrama de la etapa de destilación de furfural

4. Para el análisis económico, a partir de: la defectación de todos los equipos de la planta, y de un análisis de demanda-capacidad de materia prima (bagazo), se valoran dos variantes: utilizando los tres digestores instalados y utilizando solo dos digestores.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, en las tablas 1 y 2, se resumen los resultados de los balances de masa y energía de las etapas de hidrólisis del bagazo y de destilación, correspondientes a los principales flujos de procesos, así como las composiciones de los componentes principales en cada etapa del proceso.

Tabla 1. Resumen de los balances de masa y energía en la etapa de hidrólisis ácida del bagazo, así como la composición en cada corriente

FraccMasa/ Corrientes	Bagazo	H ₂ SO ₄ in	Feedrea	Vapor	CondFur	Reacout	Celolig
H ₂ O	0,2346	0,99	0,242	1	0,7369	0,992	0,992
H ₂ SO ₄	0	0,01	9,90E-05	0	3,69E-05	1,48E-05	1,48E-05
Xilosa	0,2966	0	0,2936	0	0,056	0	0

Furfural	0	0	0	0	0,0339	0,00747	0,00747
Sucrosa	0,4688	0	0,4641	0	0,1727	4,01E-06	4,01E-06
Ftotal kg/s	0,5555	0,0055	0,5611	0,9461	1,005	7,19E-05	7,19E-05
Ftotal kg/h	1999,8	7999,92	9999,72	3405,96	8938,51	0,2588	0,2588

Leyenda: Bagazo: Bagazo alimentado; H₂SO₄ in: Ácido sulfúrico alimentado; Feedrea: Mezcla de entrada al reactor; Vapor: Vapor alimentado al reactor; CondFur: Condensado de furfural salida del reactor; Reacout: Torta de bagazo residual salida del reactor; Celolig: celolignina.

Tabla 2 Resumen de los balances de masa y energía en la etapa de destilación de furfural, así como la composición en cada corriente

FracMasa/ Corrientes	Feed	1TP2	Recwat	Bot	Top
H ₂ O	0,98	0,7499	1	0,810	0,0597
Furfural	0,02	0,25	8,64E-10	0,1899	0,9403
Ftotal kg/s	2,4827	0,1986	2,284	0,1827	0,0158
Ftotal kg/h	8938,00	715,037	8222,96	657,835	57,203

Leyenda: Feed: Condensado de furfural alimentado a la columna 1; 1TP2: Vapores salida de la columna 1; Recwat: Flujo salida columna 1; Bot: Flujo salida residual columna 2; Top: Flujo salida furfural columna 2. 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 t de furfural por cada 40 t 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 turnos de trabajo/día, es posible obtener 1,8 t de furfural esperada en la planta de producción, bajo las condiciones actuales, sin analizar ninguna modificación.

Ahora bien, si se analiza el impacto de la propuesta de reconversión en la etapa de hidrólisis de bagazo, bajo las condiciones experimentales analizadas y como resultado de la simulación de las etapas del proceso, es posible obtener 1,37 t de furfural, lo cual favorece los resultados finales esperados.

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 es 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, a partir de la defecación de todos los equipos de la planta y de un análisis de demanda-capacidad de materia prima (bagazo), en la tabla 3 se presentan 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.

Tabla 3. Principales resultados de los balances e indicadores económicos

Variables	Variante	
	3 digestores	2 digestores
Consumo de bagazo(tv/día)	144	96
Producción de furfural (t/día)	4,11	2,74
VAN (\$)	574025,21	363927,07
TIR (%)	33	25
PRD (años)	4,5	5

Conclusiones

1. 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 de etapa de destilación en la tecnología de producción de furfural.
2. Se logra la simulación del proceso de producción de furfural para la propuesta de reconversión estudiada utilizando el ASPEN PLUS 11.1 y se obtienen resultados prometedores.
3. 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 instalada, con un PRD de 4.5 años.

Bibliografía

1. Mesa, L.; E. González; Y. Albernas; M. González y otros: Economic Evaluation of Pretreatment Alternatives for Ethanol Production from Sugar Cane Bagasse, Hamburg, Hungary, 2009.
2. Morales, M.; L. Mesa; E. González; M.E. Ofarril y otros: La reconversión de la industria diversificada de la caña de azúcar en la búsqueda de tecnologías más limpias, VI Internacional Conference XXI Century Environment. MAS XXI, Cuba, 2009.
3. 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.
4. González, E.; M. Morales; L. Mesa; D. Acosta y E. Castro: Posibilidades de la inclusión del etanol de lignocelulósico en la reconversión de una instalación de la industria de la caña de azúcar, II Taller Nacional de etanol de Residuos lignocelulósicos, Ciudad de la Habana, Cuba, 2009.
5. Mansillahl, H.D.; J. Baeza S. Urzúa G. Maturanah "Acid catalysed hydrolysis of rice hull: evaluation of furfural production," *Bioresources technology* 66: 189-193, 1998.