

Simulación técnico económica de una planta de etanol de residuos lignocelulósicos

Techno-economic simulation of a lignocellulosic ethanol plant

Minerva G. Alendy¹, Yaser Oliva¹, Layanis Mesa¹, Erenio González^{1*}, Inmaculada Romero², Cristóbal Cara² y Eulogio Castro²

¹ Centro de Análisis de Procesos, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

*e-mail de correspondencia: erenio@uclv.edu.cu

² Departamento de Química, Medio Ambiente e Ingeniería de los Materiales. Universidad de Jaén, España

Resumen

En el trabajo se presenta un análisis técnico económico de una tecnología para la obtención de etanol desde bagazo de caña de azúcar utilizando un software Aspen Plus. En este análisis la variabilidad de los resultados se considera en concordancia con la incertidumbre de las variables incluidas en el diseño de los equipos utilizados en la instalación. Los estimados económicos son determinados desde la cotización realizada de los costos constructivos para una instalación piloto real. Desde este análisis una estrategia se determina para minimizar la incertidumbre en la ejecución de unja inversión a nivel industrial. Este proyecto incluye la mejor alternativa para la integración material y energética de los sistemas y la consideración de la incertidumbre en la disponibilidad de los equipos.

Palabras Clave: bioetanol, incertidumbre, lignocelulósico

Copyright © 2013. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

Abstract

This work presents a technical-economical analysis of a technology to obtain bioethanol from suagarcane bagasse using Aspen Plus software. In this analysis the variability in the result is considered in accordance with the levels of uncertainties of the variables involved in the design of the equipments used in the installation. The economical estimations are being done starting from the quotation obtained for the construction of a real installation. From this analysis, a strategy is determined to minimize the uncertainty in the execution of the inversions involved in this process and the levels of the costs of the industrial installation. This project includes the best alternative for the material and energetic integration of the system and the consideration of uncertainty in the availability of the equipments.

Comentario [YAC1]: Revisar inglés

Key words: bioethanol, uncertainty, lignocellulosic

I. Introducción

Partiendo de las tecnologías existentes para la obtención de bioetanol de residuos lignocelulósicos reportadas en la literatura, por diferentes autores y con los estudios anteriores reportados por (Mesa et al., 2009) un esquema tecnológico para lograr estas producciones consta de dos etapas de fraccionamiento. En la primera, cuando se obtiene xilosa como producto para la obtención de etanol, la biomasa se somete a la acción de una solución de Acido Sulfúrico al 1% v/v en presencia de vapor a 120°C y una relación sólido/ líquido de 1:4 Kg: L. Cuando la primera etapa está dirigida a la obtención de furfural, la temperatura es 175°C, la concentración de ácido sulfúrico es 1% en masa en base a la fibra seca y la relación sólido-líquido es 1:1 Kg: L. El tiempo de residencia de ambas alternativas es 40 minutos. Posteriormente, el sólido resultante de cada alternativa se trata con una solución de hidróxido de sodio y etanol al 5% masa en base a fibra seca y 30 % v/v respectivamente, también con vapor a 185°C. La relación sólido-líquido es 1:7 y el tiempo de residencia de la segunda etapa de pretratamiento es 60 minutos considerando tiempos de carga y descarga de 20 minutos para cada variante.

Luego de terminad el pretratamiento en dos etapas, la biomasa se somete a la acción de las celulasas por un término de 24 a 36 horas, en el cual se obtiene una solución de azúcares listos para fermentar con levaduras del tipo *S. Cerevisiae*. Esta operación se puede realizar de 3 formas diferentes:

1. Sacarificación y Fermentación Separadas
2. Presacarificación y Fermentación
3. Sacarificación y Fermentación Simultaneas

Derivado de este proceso se obtiene un fermento con el grado alcohólico necesario para ser destilado en una columna de destilación.

De lo anteriormente expuesto se derivan 6 variantes tecnológicas, las cuales se enumeran a continuación:

Variante 1: Sacarificación y fermentación Separadas con primera etapa a 120°C

Variante 2: Presacarificación y Fermentación con primera etapa a 120⁰ C
Variante 3: Sacarificación y Fermentación Simultaneas con primera etapa a 120⁰ C
Variante 4: Sacarificación y fermentación Separadas con primera etapa a 175⁰ C
Variante 5: Presacarificación y Fermentación con primera etapa a 175⁰ C
Variante 6: Sacarificación y Fermentación Simultaneas con primera etapa a 175⁰ C
Siendo necesario definir cuál es el mejor esquema tecnológico a utilizar.

II. Materiales y métodos.

Partiendo de una capacidad de producción de 100 litros de etanol diarios, se operará 8 horas al día, durante 5 días a la semana. (300 días al año) en el trabajo para cada una de las 6 variantes tecnológicas se calcularon los balances de materiales y energía y se seleccionó el equipamiento adecuado según lo reportado por Mesa, L (Mesa et al., 2009) y considerando que de acuerdo a las características peculiares de cada etapa básica, la producción de bioetanol y sus coproductos, se llevaran a cabo en una planta de forma semicontinuo.

El dimensionamiento de los equipos se realizó tomando como base las ecuaciones de diseño de cada uno de ellos. Con los estimados de costo (Peters and Timmerhaus, 1991) y los resultados del diseño y del balance de materiales se calcularon los costos inversionistas y los costos totales de producción.

Se incluyó un estudio de la sensibilidad a los cambios de precio e insumo de varios factores pero como se ha dicho, los estudios de sensibilidad brindan una visión incompleta del efecto de la incertidumbre en la evaluación de una alternativa de inversión (Pedraza and González, 2005), por ello se consideró la evaluación del efecto una combinación de las variables a las cuales existe sensibilidad.

III. Resultados y Discusión

Balances de materiales

La diferencia entre las variantes está dada fundamentalmente por el rendimiento de etanol por Kg de bagazo, (Mesa et al., 2009). A modo de ejemplo se reporta en la tabla 1 los resultados del balance de materiales para el esquema de la primera variante tecnológica.

Tabla 1. Resultados del balance de materiales para el esquema tecnológico con Sacarificación y fermentación Separadas con primera etapa a 120⁰ C

Kg/día	PRETRATAMIENTO 1					PRETRATAMIENTO 2				
	<i>BI</i>	<i>Ac</i>	<i>Agua</i>	<i>LPI</i>	<i>MCI</i>	<i>Etanol</i>	<i>NaOH</i>	<i>Agua</i>	<i>LP2</i>	<i>MC2</i>
Glucosa	164,1			10,5	153,6				14,2	139,3
Xilosa	103,8			80,3	23,5				8,9	14,6
Lignina	64,8			0,6	64,2				20,3	43,9
Agua	17,3		1400,0	854,2	563,1			609,7		
Acido		3,5								
Etanol						642,1				

NaOH								12,1			
Total	350,0	3,5	1400,0	945,6	804,4	642,1	12,1	609,7	43,4	197,9	

Kg/día	HE		EVAPOR, GLU		FERM GLUC		FERM PENT		DESTILACION			
	LicAzu	SDes	Ag Ev	Lic. Conc	CO ₂	Lic Ferm	CO ₂	Lic Ferm	F	Vapor	D	W
Glucosa	101,8	37,6		101,8								
Xilosa	10,9	3,7		10,9								
Lignina	0,0	43,9										
Agua	2088,9	85,9	1353,5	735,5		756,6		608,3	1364,9		4,1	1878,4
Vapor										517,6		
Etanol						46,7		31,0	77,7		77,6	0,0
CO ₂					44,9		29,7					
Total	2201,6	171,1	1353,5	848,2	44,9	803,3	29,7	639,2	1442,5	517,6	81,7	1878,4

Los resultados de los costos inversionistas y totales de producción se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Estimados de los indicadores económicos básicos

V	Bagazo Kg/día	Furfural Kg/día	Capital Invertido, \$ 10 ⁶	CTP, \$/año	Costo Enzima, \$/año	Costo Bagazo, \$/año	Costo Vapor, \$/año	Costo Unitario, \$/l	Costo X Peso
1	350,00	no	1,531	269299,2	3982,66	2205,00	4823,2	8,98	14,41
2	284,00	no	1,103	191873,5	3231,65	1789,20	1667,3	6,40	12,35
3	382,00	no	1,319	230771,5	4346,79	2406,60	1889,1	7,69	14,76
4	538,00	62,09	1,849	331406,3	6405,90	3389,40	5488,1	11,05	7,94
5	560,00	95,86	1,479	264576,1	6667,85	3528,00	1292,3	8,82	6,82
6	589,00	100,82	1,521	272582,2	7013,15	3710,70	1307,0	9,09	6,81

A pesar de que los resultados en los indicadores económicos son desfavorables por estar evaluando la tecnología a escala Piloto, este tipo de análisis nos indica cual de las 6 alternativas presenta mejores resultados y así poder discriminar posibles análisis futuros.

Análisis de sensibilidad

La tabla 2 se estudia la sensibilidad a los cambios de precio del bagazo, precio del vapor, precio del furfural, tiempo de reacción en el pretratamiento 1, tiempo de reacción en el pretratamiento 2, el tiempo de reacción en la hidrólisis enzimática y la densidad en la hidrólisis enzimática.

En la Tabla 2 se aprecia que la variación del tiempo de reacción en la etapa de fraccionamiento 1, en valores de tiempo desde 50 % hasta 150 % su valor original, origina variaciones del costo unitario de etanol entre 0,5 y 1 \$/litros

aproximadamente, lo que se pudiera interpretar como que este es un factor poco sensible a los indicadores económicos. Es por ello que se hizo necesario otro tipo de análisis que pudiera mostrar la variación real de cada una de las variables estudiadas. Lo que nos muestra que la variación del tiempo de reacción en el fraccionamiento 1 entre 50 y 150 % puede reportar variaciones en el valor de la producción de etanol entre 20 y 40 \$ diarios y que la variación del tiempo de reacción en el fraccionamiento 1 entre 50 y 150 % puede reportar variaciones en el valor de la producción total anual entre \$ 10 000 y 14 000.

En el análisis de sensibilidad se pueden incluir otras variables tales como los tiempos de fraccionamiento, de reacción enzimática, densidad del hidrolizado y los precios de insumos como bagazo y enzimas y de productos como el furfural.

Cálculo de las condiciones óptimas

Para el cálculo de las condiciones óptimas se consideraron las combinaciones derivadas del diseño 3², dependiendo del destino de la xilosa. En la Tabla 4 se reflejan los resultados cuando se obtiene etanol de xilosa.

Tabla 4. Combinaciones del diseño 3² para la alternativa que incluye la obtención de etanol a partir de la xilosa

No	Tiempo total del proceso (X ₁)	Carga enzimática UPF/g de sustrato (X ₂)	Costo Unitario/litro	Costo/Peso	PRD	Ganancia 10 ⁶ USD/año
1	30	10	0,50	0,55	8,0	6,78
2	30	20	0,47	0,53	7,0	7,36
3	30	30	0,44	0,52	6,5	7,95
4	32	10	0,49	0,54	7,7	6,97
5	32	20	0,46	0,53	7,0	7,55
6	32	30	0,43	0,51	6,5	8,13
7	34	10	0,48	0,54	7,6	7,15
8	34	20	0,45	0,52	7,0	7,74

$$\text{CostoUnitario, } \$/L = 0,449 - 0,0083X_1 - 0,028X_2 + 0,00167X_1^2 + 0,0025X_1X_2 + 0,00167X_2^2$$

$$\text{PRD, años} = 6,489 - 0,0833X_1 - 0,65X_2 + 0,016667X_1^2 + 0,075X_1X_2 + 0,1166X_2^2$$

$$\text{Ganacia, \$} = 7,55 + 0,1867X_1 + 0,5833X_2$$

Según las ecuaciones obtenidas es adecuado determinar los valores óptimos de los costos de un litro de etanol, donde se obtiene un mínimo para: tiempo = 1,34196 (34,68 horas) y E = 1,51357 (35,13 UPF/g de sustrato), los que son valores fuera de la región experimental estudiada, pero cercanos a ella y que permitirían hipotéticamente un costo mínimo de 0,4067, inferior en 0,013 (3,196 %) al mínimo

que se alcanza en los extremos de la región experimental con los estimados del modelo que serían de 0,4180 para valores de $X_1=1$ y $X_2=1$.

Un análisis similar se realizó pero incluyendo la obtención de furfural a partir de la fracción de xilosa.

$$PRD, años = 2,544 + 0,0333X_1 - 0,1667X_2 + 0,0333X_1^2 + 0,025X_1X_2 + 0,0333X_2^2$$

$$CostoUnitario, \$/litro = 0,75889 - 0,03167X_1 - 0,08833X_2 + 0,001667X_1^2 + 0,0075X_1X_2 + 0,01167X_2^2$$

$$Ganacia, \$ = 15,44 + 0,25X_1 + 0,8X_2 - 0,0033X_1^2 + 0,0033X_2^2$$

Según las ecuaciones obtenidas es adecuado determinar los valores óptimos del Periodo de Recuperación de la Inversión (PRD), donde se obtiene un mínimo para: tiempo = - 1,675686 (28,66 horas) y E = 3,13203 (51,3 UPF/g de sustrato), los que son valores fuera de la región experimental, y relativamente lejanos a ella, sobre todo en lo referente a la carga enzimática que aunque permitirían hipotéticamente un PRD mínimo de 2,2511 inferior al también estimado por el modelo como mejor dentro de la región experimental de 2,3816 en 0,1305 (5,48 %) requeriría una costosa verificación por el alto consumo de enzimas. De acuerdo con estos resultados se podrían alcanzar mejoras en el PRD y ganancia a partir de verificar fuera de la región experimental el comportamiento de los modelos, pero sin que esto implique grandes saltos en la ganancia, ni seguras mejoras en el PRD, que ya con el valor alcanzado justifican las inversiones estimadas.

IV. Conclusiones

1. Los estudios experimentales a nivel de laboratorio son la base fundamental para el estudio y desarrollo de las propuestas tecnológicas y su escalado a nivel de Planta Piloto.
2. De las variantes tecnológicas propuestas la de mejores resultados técnico-económicas resultó ser la PreSac, bajo las condiciones estudiadas.
3. Se pueden determinar las variables de mayor incidencia en los indicadores económicos estudiados con los resultados obtenidos en el laboratorio, el uso sistemático de la simulación y una adecuada selección y diseño de los equipos,
4. La factibilidad económica en la producción de etanol de residuos lignocelulósicos solo es posible mediante la obtención de coproductos de alto valor agregado.
5. El procedimiento propuesto permite guiar la investigación científica de escalado de forma constante y decidir las mejores alternativas para lograr un diseño de una instalación industrial.

Bibliografía

1. Mesa, L., González, E., Zamora, M. M., Galiano, E. C., Cara, C. & Kafarov, V. (2009) Economic Evaluation of pretreatment alternatives for ethanol

- production from sugar cane bagasse. 17 th European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets. Hamburgo, Alemania.
2. Pedraza, J. & González, E. (2005) Consideración de la incertidumbre en los parámetros de diseño de los equipos.), en: González, E. (Editor):.Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria química, fermentativa y farmacéutica.
 3. Peters, M. S. & Timmerhaus, K. D. (1991) Plant design and economics for chemical engineers. IN MCGRAW-HILL, I. (Ed.) Fourth Edition ed.