

SIMULACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE ARROZ

SIMULATION OF THE FERMENTATION PROCESS TO OBTAIN BIOETHANOL FROM RICE RESIDUES

Verónica Capdevila¹, Viatsheslav Kafarov², Cristina Gely¹, Ana Pagano¹

(1) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), Facultad de Ingeniería, Área de Procesos – TECSE, Depto. Ingeniería Química, Av. del Valle 5737, (7400) Olavarría - Argentina

(2) Universidad Industrial de Santander, Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES), Bucaramanga - Colombia
(e-mail: vero.capdevila@fio.unicen.edu.ar)

Recibido: 18/11/2014 - Evaluado: 13/01/2015 - Aceptado: 26/02/2015

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un modelo de simulación del proceso fermentación/separación de bioetanol a partir de cascarilla de arroz pretratada e hidrolizada, aplicando el simulador Aspen HYSYS[®]. Estudios de sensibilidad realizados sobre el modelo desarrollado permitieron obtener niveles para las variables seleccionadas de 1:2,89 relación biomasa:agua; 50 t/h caudal de biomasa y 30°C temperatura de entrada al separador, que conducen a maximizar el rendimiento de bioetanol. A partir de estas variables se obtiene una producción de bioetanol de 8,81 t/h con una pureza del 65,51% p/p equivalentes a un caudal de biomasa tratada hidrolizada de 50 t/h. Este trabajo representa un avance del desarrollo del modelado del proceso completo de obtención de bioetanol de segunda generación a partir de residuos de la industria arrocera.

ABSTRACT

In this paper presents a simulation model of the fermentation/separation process of bioethanol from hydrolyzed pretreated rice husk, using Aspen HYSYS[™] simulator. Sensitivity studies performed on the developed model indicated levels for selected variables: biomass/water ratio of 1:2,89 ; biomass flow of 50 t/h and inlet temperature separator of 30°C, leading to maximize the yield of bioethanol. From these variables, a bioethanol production of 8,81 t/h with a purity of 65,51% w/w is obtained, corresponding to a flow of hydrolyzed treated biomass of 50 t/h. This work represents an advance in the development of the simulation model of the complete process to obtain second generation of bioethanol from rice husks.

Palabras clave: biocombustible, modelado, residuos lignocelulósicos, fermentación alcohólica
Keywords: biofuel, modeling, lignocellulosic residues, alcoholic fermentation

INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de encontrar fuentes de energía producidas a partir de recursos renovables ante la incertidumbre de agotamiento y el alza del precio de los combustibles fósiles, la dependencia del mismo por los sectores industrializados y las promociones por parte de los gobiernos, han aumentado la demanda de los biocombustibles. A nivel industrial, los biocombustibles que actualmente se producen son el biodiesel y el bioetanol.

En el año 2000 la producción mundial de biocombustibles ha crecido a un ritmo anual de 10% totalizando al año 2009 una producción total de 90.187 millones de litros (Brown *et al.*, 2009). De esa producción, un 82% y 18% corresponden a bioetanol y a biodiesel, respectivamente.

En referencia al bioetanol, el principal productor es EE.UU con el 54,7 % de la producción global, seguido por Brasil con el 33,2%. Siendo otros países relevantes en la producción mundial Francia (1,3%), Alemania (1,1%), España (0,7%) y Bélgica (0,4%) de la UE, China (2,5%) y Canadá (1,4%) (CEPAL-BMZ/GIZ, 2011).

A nivel nacional en Argentina la demanda de bioetanol aumentó desde 2009 a 2011 de 18.439 t a 134.138 t, es decir 7 veces. Ya para el año 2009 la Secretaría de Energía estimó un volumen anual necesario para el país de 180.400 m³ (Resolución 698/2009 de Secretaría de Energía de la Nación, <http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/155000-159999/158069/norma.htm>). En tanto, el consumo interno estimado para el año 2012, según un informe realizado por la Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER) (Martínez Justo, 2012), fue proyectado en 250.000 t/año para cumplir con la normativa vigente respecto del corte que debe realizarse de los combustibles fósiles con los combustibles renovables (Ley 26.093). No obstante, actualmente no se está cumpliendo con el valor del 5% de corte; sólo se cubre el 3% debido a la falta de inversión en la producción de bioetanol y a una demanda creciente de combustibles, sin embargo se prevé en 4 años aumentar el corte a un 17% con el objetivo de fomentar el crecimiento de la producción. Para lograr incrementar la producción el gobierno incentivó el desarrollo de la industria otorgando beneficios y fijando cupos y precios atractivos. Por otro lado, se requiere incorporar nuevas materias primas y procesos de producción (Goldstein & Gutman, 2010).

Este biocombustible líquido se puede mezclar perfectamente con gasolina; las mezclas que contienen un 5 y 10% de bioetanol son denominadas respectivamente E5 y E10 (CEPAL-BMZ/GIZ, 2011).

El bioetanol es el biocombustible más ampliamente utilizado para el transporte en todo el mundo (Balat, 2011). Se lo puede obtener tanto a partir de la fermentación alcohólica de productos con alto contenido de azúcares y almidón –denominado entonces bioetanol de primera generación–, como a partir de tecnologías sustentables que utilizan como biomasa residuos lignocelulósicos tales como la cascarilla de arroz –proceso denominado de segunda generación–, eliminando la existente controversia entre destinar los alimentos para el consumo humano ó para la generación de energía.

En Argentina, entre los materiales lignocelulósicos disponibles y factibles de ser empleados en la obtención de bioetanol, la cáscara de arroz se presenta como un material de desecho agrícola de fácil acceso que es producido en grandes cantidades como un subproducto de naturaleza abrasiva (Jurado *et al.*, 2003) de la molienda del arroz y crea potenciales problemas ambientales (Álvarez Herazo *et al.*, 2011). Este residuo resulta una problemática ambiental debido a la acumulación que se forma en los vertederos de residuos sólidos urbanos (Okeh *et al.*, 2014). Además se presenta una situación crítica en el momento de disponer la descarga de los grandes volúmenes de cáscara que se producen en el descascarado del arroz en las plantas arroceras, proceso que genera una gran cantidad de polvillo, ocasionando molestias a los pobladores de las cercanías y riesgo de combustión (Mantulak & Cruz, 2005).

La explotación del arroz en Argentina se centraliza básicamente en las provincias de Chaco, Corrientes, Entre Ríos, Formosa y Santa Fé, estimándose para la campaña 2013/2014 en 1.581.810 t, según registro de la Dirección de Información Agrícola y Forestal (http://www.siiia.gob.ar/sst_pcias/estima.php).

La cascarilla de arroz tiene una estructura celulósica cristalina compleja. Esta característica dificulta la hidrólisis enzimática de los azúcares fermentables de este residuo. Entre los factores que limitan dicha etapa se menciona la cristalinidad de la celulosa y su grado de polimerización, el área superficial disponible para el ataque enzimático y contenido de lignina, entre otros. Por eso para la producción de bioetanol se requiere –a diferencia de la caña de azúcar y de los cereales- de un pretratamiento químico previo a las etapas de hidrólisis, fermentación y separación (Dagnino *et al.*, 2011).

El pretratamiento químico tiene como objetivo desintegrar esta matriz de tal manera que la celulosa reduzca su grado de cristalinidad y aumente la celulosa amorfa, que es la más adecuada para el posterior ataque enzimático (Sanchez & Cardona, 2005). Se aplica para conservar la celulosa y la hemicelulosa (que se hidrolizan) separando la lignina (que se libera o puede llegar incluso a descomponerse). Esta etapa es necesaria para mejorar la velocidad de producción y el rendimiento total de los azúcares monoméricos en la etapa de hidrólisis.

En la hidrólisis se transforma la celulosa y la hemicelulosa en sacáridos que se fermentan y separan posteriormente (Dagnino *et al.*, 2012). Existen dos formas para llevar a cabo la hidrólisis de la celulosa: hidrólisis ácida o hidrólisis enzimática (Conde-Mejía *et al.*, 2013; Hamelinck *et al.*, 2005). La hidrólisis enzimática presenta las siguientes ventajas frente a la hidrólisis química: no genera gran corrosión, requiere de bajo consumo de enzima, baja toxicidad de los hidrolizados, costos de equipamiento menores, rendimientos mayores, no necesita utilizar agentes químicos y no produce compuestos inhibidores de la fermentación (Hamelinck *et al.*, 2005; Dagnino *et al.*, 2012). Los rendimientos de la hidrólisis enzimática sin pretratamiento son por lo general menos de 20%, mientras que con el pretratamiento, los rendimientos pueden elevarse a más del 90% (Ojeda *et al.*, 2011; Sanchez & Cardona, 2005). La celulosa liberada sometida a hidrólisis enzimática hace que se obtenga una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa (Sanchez & Cardona, 2005).

En el caso particular de la cascarilla de arroz, baja en contenido de lignina (19% ligninas totales) y con más del 50% de carbohidratos en su composición, sometida a un pretratamiento con ácido sulfúrico diluido (0,3 % p/v) durante 33 minutos a 5 atm y 152°C, se ha demostrado que produce, además de la hidrólisis de azúcares componentes de la hemicelulosa, una alta proporción de glucanos susceptibles de ser hidrolizados enzimáticamente para obtener bioetanol (Dagnino *et al.*, 2011; 2013).

Sobre esta base, en este trabajo se presenta un avance del desarrollo de un modelo de simulación del proceso de obtención de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos (cascarilla de arroz) pretratados químicamente e hidrolizados, involucrando la etapa de fermentación/separación, a fin de analizar el efecto de variables operativas relevantes (tales como caudal de biomasa tratada, relación biomasa/agua, temperatura de ingreso al separador) para el diseño sobre el rendimiento del proceso y determinar las mejores condiciones para lograr la mayor producción, como punto de partida para el modelado del proceso completo.

MATERIALES Y METODOS

En este trabajo se simulan las etapas de fermentación/separación del proceso de obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz usando el simulador Aspen HYSYS® en estado estacionario, realizando un análisis de sensibilidad paramétrica para identificar las variables sensibles de operación para obtener el máximo rendimiento de bioetanol.

Selección de la escala del proyecto

Con el objetivo de que en el futuro se logre implementar a escala industrial a nivel local, para este trabajo se considera la producción en Argentina de cascarilla de arroz, que para la cosecha 2013/2014 es de 1.581.810 t anuales (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, http://www.siaa.gob.ar/sst_pcias/estima.php), a partir de la cual se genera aproximadamente entre 6 y 21% de cascarilla de arroz (Larios-Saldaña *et al.*, 2005).

A fin de establecer la escala para el diseño de la planta, se consideró como base de trabajo que un 80% de este residuo lignocelulósico sea utilizado para la obtención de bioetanol con lo que se generaría un caudal de 28,9 t/h de alimentación de biomasa pretratada al fermentador.

Selección de las variables de estudio

Las principales variables operativas responsables del rendimiento del proceso de fermentación/separación simulado que se identifican son: caudal de biomasa tratada, relación biomasa/agua y temperatura de ingreso al separador.

Bases para el desarrollo del modelo Aspen HYSYS®

El proceso se simula aplicando el software Aspen HYSYS® definiendo una biomasa pretratada químicamente e hidrolizada que ingresa al fermentador definida como una corriente de glucosa y xilosa (corriente "Biomasa") con fracciones en peso de 0,977 y 0,023 respectivamente, determinada a partir del trabajo de Dagnino *et al.* (2011).

A tal fin, se generan los compuestos hipotéticos glucosa y xilosa en base a la definición de su estructura UNIFAC, peso molecular, punto normal de ebullición y propiedades críticas (AspenOne, 2010). Las consideraciones para glucosa y xilosa se muestran en la Tabla 1.

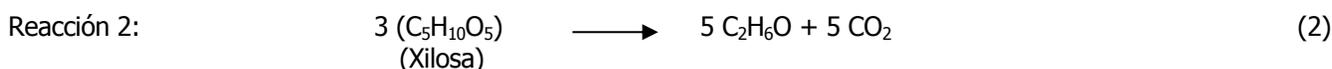
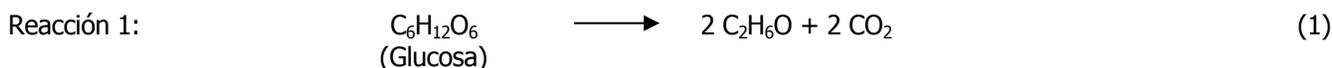
Tabla 1: Propiedades de los compuestos hipotéticos definidos en Aspen HYSYS®.

Propiedad	Glucosa	Xilosa
Peso molecular	180,1	150,1
Punto normal de ebullición (°C)	186,9	329,9
Temperatura crítica (°C)	737,9	617,3
Presión crítica (kPa)	6.200	6.578
Volumen crítico (m ³ /kgmol)	0,416	0,342

Debido a la naturaleza de los componentes se emplea el paquete de predicción de propiedades NRTL de Aspen HYSYS®, con el cual estima los coeficientes binarios vapor-líquido mediante UNIFAC (Ruhul *et al.*, 2013).

La relación entre las corrientes de biomasa ("Biomasa") y de Agua ("Agua al Fermentador") que ingresan al fermentador ("CRV-100") se establece como 1:5 (Guigou, 2011), puesto que cuanto mayor es la relación, mayor es el contenido de azúcares, pudiéndose conseguir mayores concentraciones de etanol al final del proceso. En tanto, a menor relación biomasa:agua, aumenta en forma significativa la viscosidad de la solución, dificultando mucho su manipulación y análisis (Guigou, 2011). En este sentido Guigou (2011), obtuvo los mejores desempeños (rendimiento, velocidad y manipulación) con una relación de materia seca a agua 1:5. A fin de mantener esta relación, en este trabajo se determina un caudal de agua de ingreso al fermentador de 144,5 t/h.

En el reactor ("CRV-100") –que se diseña como estequiométrico- operado en condiciones isotérmicas a 37°C ocurren las reacciones exotérmicas de formación de etanol y dióxido de carbono a partir de glucosa (reacción 1) y xilosa (reacción 2) cuyas conversiones son del 95% (Ruhul *et al.*, 2013) y del 85% respectivamente (AspenOne, 2010).



Los productos obtenidos en el reactor fermentador ("CRV-100") son sometidos a diferentes etapas de purificación con el objetivo de separar el dióxido de carbono y el agua del etanol, adaptando convenientemente los diseños de las etapas del modelo desarrollado por Aspen HYSYS (AspenOne, 2010) en función de la escala del presente proyecto.

Atento a esto, la sección de purificación consta de un separador flash ("V-100") que se emplea para separar el CO₂ producido en ("CRV-100"), operando a 30°C y 101,3 kPa. La corriente gaseosa de este separador constituida mayoritariamente por CO₂ con trazas de agua y etanol ("CO₂ a lavado") se lava con agua ("Agua a columna") en una columna de absorción ("T-100") de 10 platos en la cual el etanol es absorbido por el agua pudiéndose incorporar etapas de purificación adicionales que permitirían recuperar el etanol. En la corriente gaseosa se produce el venteo del CO₂.

La corriente líquida "A torre de absorción" que sale del separador ("V-100") se trata de una solución diluida de etanol con trazas de otros compuestos, por lo que se ingresa a una torre de absorción de 9 platos con el objetivo de eliminar el agua, obteniéndose el bioetanol (corriente "Bioetanol") por la parte superior, utilizando vapor sobrecalentado como gas de arrastre.

Las principales condiciones operativas/diseño de los equipos mencionados anteriormente se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Condiciones operativas/diseño de los principales equipos del proceso.

	CRV-100	V-100	T-100	T-101
T (°C)	37	30	25-27	90-110
P (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3
Cantidad de platos			10	9
Entalpía de Reacción 1 (kJ/kmol)	-2,8×10 ⁵			
Entalpía de Reacción 2 (kJ/kmol)	-7,7×10 ⁵			

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diagrama de flujo del proceso generado utilizando el programa Aspen HYSYS® se muestra en la Figura 1 en la cual aparecen las diferentes etapas involucradas para la obtención de bioetanol.

En la Tabla 3 se muestran algunas de las condiciones (temperatura, presión, caudal, fracciones másicas y molares, flujo calórico) de las principales corrientes del proceso presentado en la Figura 1.

A partir del proceso fermentativo se obtiene una corriente compuesta por 14 t/h de etanol, 144,4 t/h de agua y 13,4 t/h de CO₂ a la que es necesario realizar operaciones de separación / purificación. En esta primera etapa, correspondiente a la fermentación, se necesitaría un requerimiento de enfriamiento de $-2,8 \times 10^7$ kJ/h de acuerdo a los resultados arrojados por el programa, para mantener el funcionamiento isotérmico del reactor CRV-100.

La corriente líquida obtenida a partir del separador ("V-100") denominada "A torre de absorción" que tiene un caudal másico de 159,6 t/h conteniendo etanol en un 8,58 % de pureza, debe ser purificado en la torre de absorción ("T-101") diseñada con 9 platos operando a 101,4 kPa (Tabla 3), en la cual se obtiene por la parte superior una corriente ("Bioetanol") con un caudal de 8,47 t/h y un contenido de un 60,48% p/p de etanol (Tabla 3). Hasta este punto el rendimiento global del proceso de obtención de bioetanol respecto a la biomasa pretratada resultaría de aproximadamente 17,72%, debiendo incorporarse una ulterior operación de purificación (eliminación de agua) para que el producto cumpla con el requisito de calidad de las normas (Resolución 1295/2008 de Secretaría de Energía de la Nación, <http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/145000-149999/147291/norma.htm>).

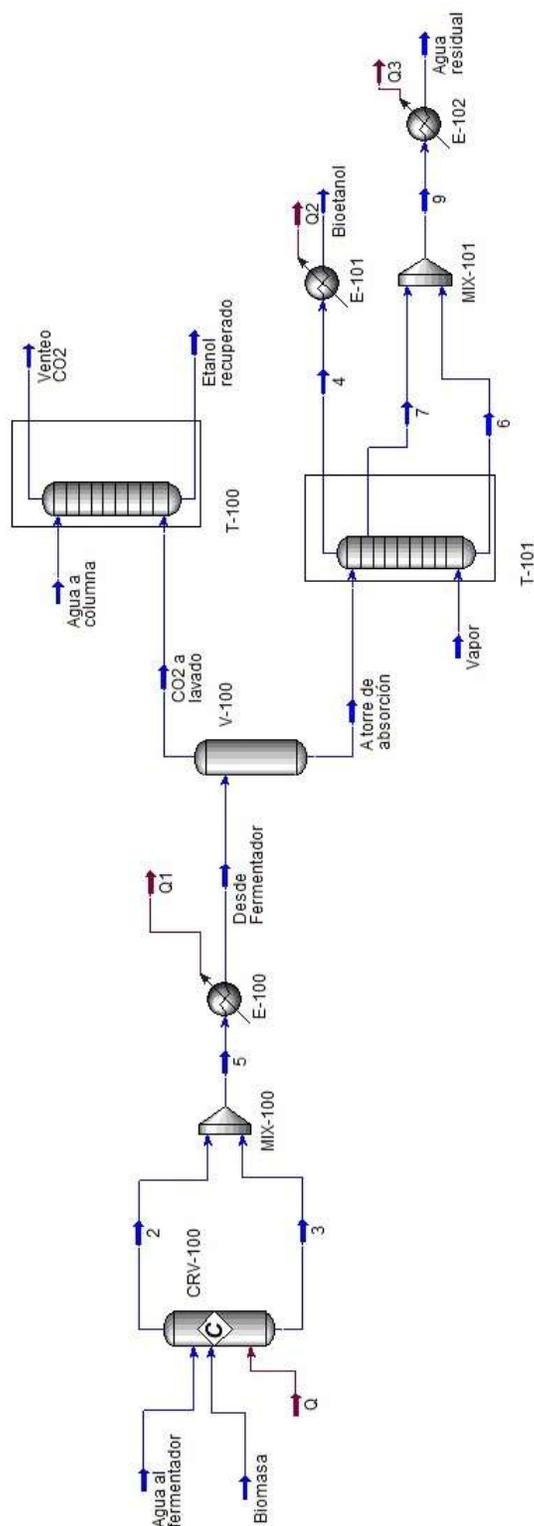


Fig. 1: Esquema (flowsheet) del proceso de producción de bioetanol a partir de cascarilla de arroz.

Tabla 3: Condiciones de las principales corrientes del proceso.

Condición	Corriente						
	Agua al fermentador	Biomasa	Desde fermentador	CO ₂ a lavado	Etanol recuperado	A torre de absorción	Bioetanol
Caudal (t/h)	144,5	28,89	173,3	13,73	50,88	159,6	8,47
T (°C)	37	37	30	30	27,35	30	25
P (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Fracción másica bioetanol (% p/p)	_____	_____	8,08	2,24	0,6	8,58	60,48
Fracción másica CO ₂ (% p/p)	_____	_____	7,72	96,06	0,13	0,12	2,25
Fracción másica H ₂ O (% p/p)	1	_____	83,33	1,7	99,26	90,35	37,26
Fracción molar bioetanol	_____	_____	0,0352	0,0209	0,0024	0,0357	0,3825
Fracción molar CO ₂	_____	_____	0,0352	0,9385	0,0005	0,0005	0,0149
Fracción molar H ₂ O	1	_____	0,9286	0,0406	0,9971	0,9627	0,6026
Flujo calórico (kJ/h)	-2,28 × 10 ⁹	-1,71 × 10 ⁸	-2,49 × 10 ⁹	-1,23 × 10 ⁸	-8,00 × 10 ⁸	-2,37 × 10 ⁹	-8,27 × 10 ⁸

Uso de la herramienta de simulación para optimizar el proceso

Se realizaron estudios de sensibilidad paramétrica de diferentes variables del proceso tales como caudal de biomasa, relación agua:biomasa, temperatura de entrada al separador, caudal de agua, cantidad de platos en el absorbedor, sobre el rendimiento de bioetanol. Los resultados indican que éste es sustancialmente sensible a modificaciones en los tres primeros. Atento a ésto, en los siguientes apartados se describe su análisis.

Efecto del caudal de biomasa tratada sobre la eficiencia del proceso

Con vistas a minimizar el consumo de agua en el proceso, se analizó la posibilidad de incrementar la cantidad de biomasa tratada en la fermentación manteniendo constante el caudal másico de agua que ingresa al reactor fermentador, manteniendo (ó eventualmente incrementando) el caudal de producción de bioetanol (corriente "Bioetanol") y/ó el grado de pureza del producto final (fracción másica de bioetanol en la corriente "Bioetanol"). Esto permitiría maximizar la eficiencia y sustentabilidad del proceso.

Para este análisis se hizo uso de la herramienta Databook de Aspen HYSYS[®] y de la herramienta Microsoft[®] Office Excel (Figura 2). Se observó que para 50 t/h de biomasa tratada se obtiene un flujo másico máximo en la corriente "Bioetanol" de 8,81 t/h trabajando con un caudal de agua de 144,5 t/h, valor a partir del cual disminuye el flujo másico en dicha corriente. Por otro lado, a partir de la misma Figura 2, se puede analizar el efecto del caudal másico de biomasa sobre la fracción másica en la corriente "Bioetanol", encontrándose que crece desde 0,45 a 0,70. Este análisis permite determinar que la producción de bioetanol que varía desde 3,2 a 5 t/h pasando por un máximo de 5,8 t/h para las 50 t/h de biomasa tratada. Estos resultados concuerdan con las observaciones reportadas por Guigou (2011), en el sentido de que un aumento en la cantidad de materia seca por volumen de agua agregado, si bien permite aumentar la concentración final de etanol, redundando en una disminución del rendimiento del proceso.

Atento a esto, y con la finalidad de encontrar una solución de compromiso que apunte a reducir el consumo de agua del proceso sin desmedro del rendimiento, haciendo uso de la herramienta Databook de Aspen HYSYS[®] se

construyó la Figura 3 en la cual se observa que un flujo de biomasa de 50 t/h se corresponde con una relación óptima biomasa/agua de 0,34, es decir, con una relación biomasa/agua equivalente a 1:2,89.

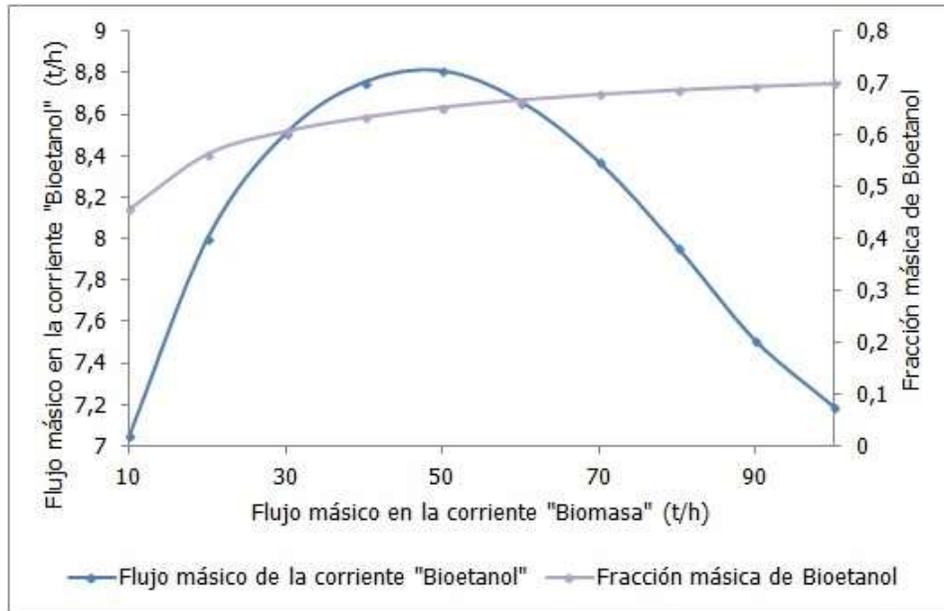


Fig. 2: Efecto del flujo másico de Biomasa sobre el flujo másico y la fracción másica de bioetanol en la corriente "Bioetanol".

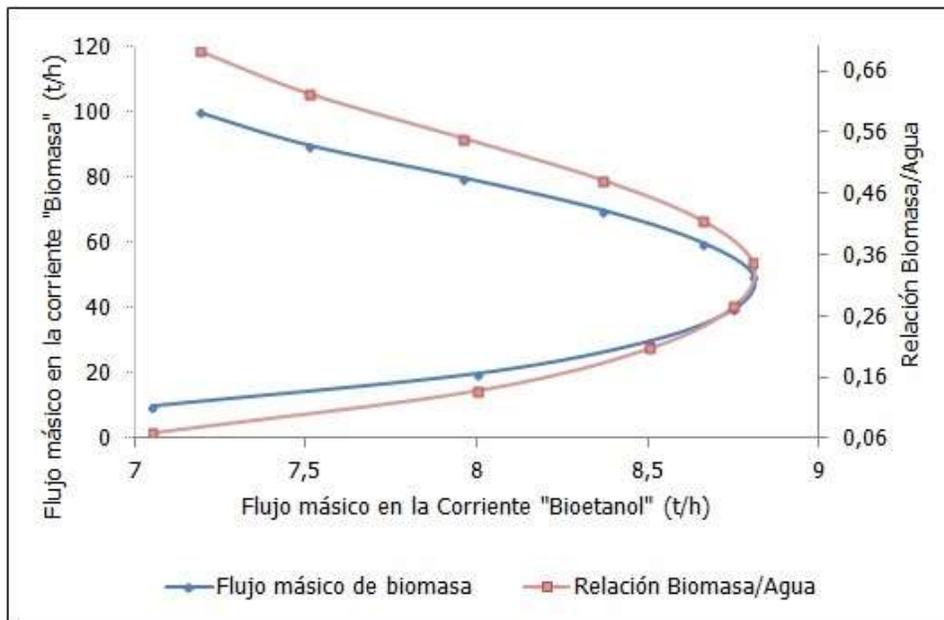


Fig. 3: Dependencia del flujo másico de Biomasa (t/h) y de la relación Biomasa/Agua con el flujo másico de bioetanol.

A modo ilustrativo, cabe señalar que Ojeda (2011) y Ojeda *et al.* (2011) simulando el proceso de obtención de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar (pretratada con ácido diluido e hidrolizada y fermentada a 40°C

y 101,3 kPa) obtuvieron 6,2 t/h de bioetanol purificado utilizando 1.200 t/día de materia prima (no se informa la relación biomasa:agua).

A fin de poder establecer si existe una correspondencia entre los resultados del presente trabajo y estos datos bibliográficos obtenidos en similares condiciones de fermentación, el modelo diseñado Aspen HYSYS se simuló en aquella escala, considerando un caudal de alimentación de biomasa de 1.200 t/día=50 t/h de cascarilla de arroz – equivalente al empleado por Ojeda (2011) y Ojeda *et al.* (2011)- utilizando la relación óptima biomasa:agua de 1:2,89 antes determinada mediante el análisis de sensibilidad. Como resultado de ello, se obtuvo una producción de 8,77 t/h de producto con un 65,45% p/p de bioetanol, equivalente a un caudal de 5,74 t/h de bioetanol puro, estando estos resultados en el orden de los obtenidos por Ojeda (2011) y Ojeda *et al.* (2011).

Efecto de la temperatura de ingreso al separador sobre la pureza del etanol en la corriente "Bioetanol"

En el proceso de fermentación juega un importante rol la etapa de purificación del etanol obtenido. En esta etapa, haciendo uso de la herramienta Databook de Aspen HYSYS®, se evaluó el efecto de modificar la temperatura de ingreso al separador flash ("V-100") dentro del rango 20-80°C sobre el desempeño del proceso, observándose que esta temperatura es determinante del grado de pureza del etanol en la corriente "Bioetanol" (Figura 4).

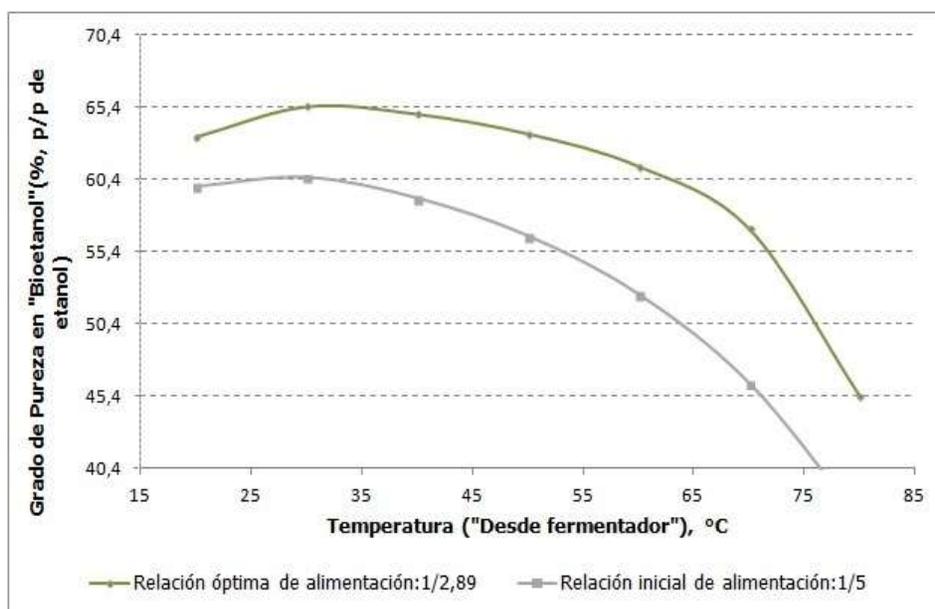


Fig. 4: Efecto de la temperatura de ingreso al separador sobre la pureza del etanol en la corriente "Bioetanol".

Este efecto se analizó tanto sobre la simulación del modelo del proceso original con un caudal de biomasa ingresante de 28,9 t/h de biomasa, como para el modelo del proceso optimizado con una relación de biomasa/agua de 1/2,89.

En el proceso original con una relación de alimentación biomasa/agua de 1:5, se obtuvo la máxima pureza para una temperatura de 30°C en la corriente que ingresa al separador ("V-100"), que contiene de 60,5% p/p de etanol. Esta temperatura (30°C) resultó ser también la más conveniente para obtener el máximo grado de pureza cuando se empleó la relación óptima biomasa/agua, obteniéndose en este caso una pureza óptima de 65,45% p/p de bioetanol en el producto final. Como consecuencia de ello fue definida de este modo la condición de operación óptima de la corriente que ingresa al separador.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha acoplado un proceso fermentativo aplicado a la biomasa lignocelulósica pretratada e hidrolizada proveniente de un residuo como la cascarilla de arroz, a la etapa de separación disponible en la herramienta de simulación Aspen HYSYS®.

Se ha simulado el proceso de fermentación/separación de bioetanol en estado estacionario determinando los niveles de las variables que conducen a la obtención del máximo rendimiento de bioetanol a partir del análisis de sensibilidad paramétrico, los cuales resultaron: relación biomasa:agua de 1:2,89; caudal de biomasa: 50 t/h; temperatura de entrada al separador: 30°C. Estas variables permitieron obtener un nivel de producción de bioetanol de 8,81 t/h con una pureza del 65,51% p/p. La producción obtenida, equivalente a 50.282,4 t/año, representa un 20,11% de la producción estimada para el consumo interno para el año 2012 en Argentina (250.000 t/año).

Este modelo constituye un punto de partida para el modelo del proceso completo de obtención de bioetanol de segunda generación a partir de este residuo de la industria arrocera. El modelo además puede ser considerado una base para trabajos futuros de análisis de otras configuraciones y otros equipos involucrados en el proceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN) el financiamiento del proyecto a través de su Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología.

REFERENCIAS

1. Álvarez Herazo, M., Alemán Romero, A. & Hormaza Anaguano, A. (2011). Remoción de rojo básico de un efluente textil simulado: un caso de aplicación de la cascarilla de arroz. *Producción + Limpia*, 6 (1), 66-75.
2. AspenOne, Aspen Technology, Inc. (2010). Aspen Plus bioethanol from corn stover model, Aspentech.
3. Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52 (2), 858–875.
4. Brown, D., Gassner, M., Fuchino, T. & Marechal, F. (2009). Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems. *Applied Thermal Engineering*, 11 (12), 2137-2152.
5. CEPAL-BMZ/GIZ (2011). Diálogo de Políticas sobre desarrollo institucional e innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe. Estudio regional sobre economía de los biocombustibles 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe. Documento para discusión. Santiago de Chile. <http://www.giz-cepal.cl/noticia/dialogo-de-politicas-sobre-desarrollo-institucional-e-innovacion-en-biocombustibles-en-ameri>.
6. Conde-Mejía, C., Jiménez-Gutiérrez, A. & El-Halwagi, M.M. (2013). Assessment of Combinations between Pretreatment and Conversion Configurations for Bioethanol Production. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 1, 956-965.
7. Dagnino, E.P., Chamorro, R.E., Romano, D.S., Felissia, F. & Área, M.C. (2013). Optimization of the acid pretreatment of rice hulls to obtain fermentable sugars for bioethanol production. *Industrial Crops and Products*, 42, 363–368.
8. Dagnino E.P., Roggero Luque F.S., Morales W.G., Chamorro E.R., Felissia, F.E., Area, M.C., *et al.* (2012). Hidrólisis enzimática de cascarilla de arroz pretratada con ácido diluido para evaluar la eficacia de la etapa

- de pretratamiento. Proceedings de la II Jornada de Investigación en Ingeniería del NEA y países limítrofes, 5 págs. <http://frre.utn.edu.ar/IIJCyT/clean/files/get/item/2151>. Fecha de consulta: 12/02/2015.
9. Dagnino, E.P., Chamorro, R.E., Romano, D.S., Felissia, F. & Área, M.C. (2011). Optimización de tratamiento ácido de biomasa lignocelulósica para la obtención de bioetanol, Proceedings del VI Congreso Nacional y III Congreso Iberoamericano HYFUSEN, Mar del Plata, Argentina, 12-050.
 10. Goldstein, E. & Gutman, G. (2010). Biocombustibles y biotecnología. Contexto internacional, situación en Argentina. Documento de Trabajo Conicet (Argentina), 47 págs. <http://www.ceur-conicet.gov.ar/imagenes/biocombustibles2.pdf>. Fecha de consulta: 12/02/2015.
 11. Guigou, M. (2011). *Producción bioetanol de boniato*. Tesis Maestría en Biotecnología Facultad de Ciencias Universidad de la República, 151 págs. <http://www.bib.fcien.edu.uy/files/etd/biotec/uy24-16069.pdf>. Fecha de consulta: 06/08/2014.
 12. Hamelinck, C.N., van Hooijdonk, G. & Faaij, A. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 28, 384-410.
 13. Jurado, P.L., Mutuberría, J.F., Oliver, N., Charadia, R., Brhl, S.P. & García, M.C. (2003). Diseño de un proceso de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales Proceedings de las Jornadas SAM/CONAMET/SIMPOSIO MATERIA 2003, 1118-1121. <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/bariloche/Trabajos/A17/1702.PDF>. Fecha de consulta: 17/02/2015.
 14. Larios-Saldaña, A., Porcayo-Calderón, J. & Poggi-Varaldo, H.M. (2005). Obtención de una harina de pulido de arroz desengrasado con bajo contenido de fibra neutro detergente. *Interciencia*, 30 (1), 29-32.
 15. Mantulak, M.J. & Cruz, E.R. (2005). La revisión ambiental en la industria arrocera. 6 págs. http://www.cienciared.com.ar/ra/usr/15/138/la_revision_ambiental_en_la_industria_arrocera.pdf. Fecha de consulta: 17/02/2015.
 16. Martínez Justo, J.L. (2012). Evolución del mercado de biocombustibles en la Argentina. CADER. Comité de Biocombustibles y Biomasa. Argentina.
 17. Okeh, O., Onwosi, C. & Odibo, F. (2014). Biogas production from rice husks generated from various rice mills in Ebonyi State, Nigeria. *Renewable Energy*, 62, 204-208.
 18. Ojeda Delgado, K.A. (2011). *Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación*. Tesis Doctoral Universidad Industrial de Santander (UIS, Bucaramanga, Colombia), 190 págs. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7406/2/137855.pdf>. Fecha de consulta: 12/09/2014.
 19. Ojeda, K., Sánchez, E., El-Halwagi, M. & Kafarov, V. (2011). Exergy analysis and process integration of bioethanol production from acid pre-treated biomass: Comparison of SHF, SSF and SSCF pathways. *Chemical Engineering Journal*, 176 (177), 195-201.
 20. Ruhul Amin, M., Saquib Hossain, M. & Sarker, M. (2013). Simulation of ethanol production by fermentation of molasses. *Journal of Engineering*, 1 (4), 69-73.
 21. Sánchez, C. & Cardona, C. (2005). Producción biotecnológica de alcohol carburante I: Obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia*, 30 (011), 671-678.

