

ESTIMACIÓN DE CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN EN LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA

Viviana Quintero, Viatcheslav Kafarov, Crisóstomo Barajas,
*Universidad Industrial de Santander, Colombia,
Edgar Castillo,
CENICAÑA, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
Layanis Mesa Garriga***,
Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba

Recibido:

Aceptado:

En el trabajo se presenta la necesidad de incluir en los procesos industriales de producción de etanol los residuos lignocelulósicos como materia prima. Se fundamenta el caso específico de las posibilidades de aprovechar los residuos agroindustriales de la producción de azúcar de caña en Colombia, realizando una evaluación de la tecnología utilizando el software de simulación ASPEN PLUS®, brindando finalmente las conclusiones correspondientes.

Palabras clave: Etanol, residuos lignocelulósicos, bagazo de caña de azúcar, simulación de procesos.

CAPACITY ESTIMATION OF SECOND GENERATION ETHANOL PRODUCTION ON COLOMBIAN SUGARY AGROINDUSTRY

Abstract. The work introduces the necessity to include the ethanol production from lignocellulosic wastes like raw material into industrial process. It based on the possibilities of get the agroindustrial residues of sugar production in Colombia, doing an evaluation of technology using ASPEN PLUS® simulation software, and offering recommendations.

Key words: Ethanol, lignocellulosic wastes, sugar cane bagasse, process simulation.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los retos tecnológicos para la producción de etanol combustible se centran en la utilización de biomasa lignocelulósica residual, con el fin de obtener no sólo beneficios económicos sino

ambientales sin afectar la oferta alimentaria. Países como Alemania, España, Estados Unidos, Japón, China y Brasil, entre otros, están desarrollando procesos de producción de biocombustibles de segunda generación.

Sin embargo, la utilización de esta materia prima como fuente de energía, se ha visto restringida dadas las limitaciones para su procesamiento, derivadas de su estructura. Las investigaciones realizadas en este campo, demuestran que propiedades tales como cristalinidad, dimensión de poro, grado de polimerización, capacidad de adsorción del sustrato, configuración física, morfología y composición química, son determinantes en el proceso de degradación.³

La conversión de materiales lignocelulósicos a etanol incluye dos etapas fundamentales: hidrólisis de la celulosa a azúcares reductores fermentables y la fermentación de los azúcares a etanol. Sin embargo es necesario realizar una etapa preliminar que permita eliminar la lignina, y la hemicelulosa (o solubilizarla), reducir la cristalinidad de la celulosa entre otros, para aumentar los resultados en las etapas mencionadas.⁶

El proceso de hidrólisis ácida es el método antiguo y con ácido concentrado se obtienen altas producciones de azúcar y etanol, sin embargo genera condiciones muy corrosivas, y produce sustancias inhibitorias de la fermentación, lo que incrementa los costos y por lo tanto reduce el potencial comercial para estos procesos.³

La hidrólisis enzimática es claramente preferida, desde el punto de vista medio ambiental, sin embargo, la viabilidad económica requiere el desarrollo de celulasas más eficientes, con actividad altamente específica y resistente a la inhibición por glucosas.³ Después de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa, la etapa siguiente en la obtención del etanol es la fermentación, la cual no difiere básicamente de la aplicable a otras soluciones de azúcares de 6 átomos de carbono.

DESARROLLO

Condiciones de la Agroindustria Azucarera colombiana

La Agroindustria Azucarera en Colombia se centra en la región del Valle del Cauca, en donde la producción de azúcar es continua durante todo el año y actualmente enfoca sus esfuerzos no sólo en

el mejoramiento de su actividad productiva, sino también en procesos que involucren eficiencia energética como son, la cogeneración a través del bagazo de caña y la producción de etanol utilizando como materia prima diversas mieles. En la actualidad cinco plantas, todas en el valle del río Cauca (departamentos de Valle, Cauca y Risaralda), están operando con una capacidad combinada de 1 050 000 litros por día o de 357 millones de litros por año, y este biocombustible está siendo producido a partir de la combinación de los flujos obtenidos en el proceso de producción de azúcar. Sin embargo, Colombia espera tener una capacidad de 2.500 000 litros por día, que es la cantidad necesaria para agregar el 10 % de etanol a la gasolina, y poder garantizar una estabilidad energética con respecto a los combustibles, teniendo en cuenta los requerimientos de su demanda.⁴

Esta situación, conlleva evaluar posibilidades para la diversificación de las fuentes productoras de etanol, y en consecuencia resulta una alternativa promisoriosa la implementación del etanol lignocelulósico a partir de los residuos generados en la Agroindustria Azucarera lo cual ha sido objeto de estudio a nivel mundial con buenos resultados a pequeña escala y cobra relevancia por su gran disponibilidad.

Residuos Lignocelulósicos en la Agroindustria Azucarera

En la agroindustria azucarera se identifican dos tipos de residuos: Los residuos de cultivo (RAC) y los residuos agroindustriales (Ba-gazo).¹

Los Residuos de Cultivo (RAC): están compuestos principalmente por hojas verdes, secas y cogollos. La cantidad de residuos vegetales presentes en el campo después de la cosecha de la caña en verde, dependen de la variedad y fertilidad del suelo. La composición lignocelulósica del follaje de la caña de azúcar es alrededor de 45,1 % celulosa. El 25,6% del material es hemicelulosa. La lignina constituye 12,7 % del material. En el follaje también se encuentra un 8,0 % de cenizas, 4,3 % de otros materiales orgánicos y 9,7 % de humedad en hojas secas hasta 67,7 % en hojas verdes²

Residuos Agroindustriales: *El bagazo es el residuo fibroso del tallo de la caña que queda*

después de triturar y extraer el jugo. En Colombia se obtienen aproximadamente 31 toneladas de bagazo por 100 toneladas de caña. El uso tradicional es la producción de energía mediante su combustión en el sector azucarero y panelero.

La composición del bagazo varía según la variedad de caña, su madurez, el método de cosecha y la eficiencia de la fábrica moledora. La fibra de bagazo está compuesta principalmente de celulosa, pentosa y lignina. La disponibilidad de los residuos agroindustriales representa un gran potencial como materias primas en la producción de etanol. En este caso particular solo se tendrá en cuenta el bagazo como materia prima, debido a su disposición en fábrica, lo que reduce costo de recolección y transporte.

Sobre la base de lo anterior y teniendo en cuenta las condiciones de la Agroindustria Azucarera en Colombia, se ha propuesto una ruta tecnológica, para la producción de alcohol lignocelulósico a partir del bagazo de la caña de azúcar.

Ruta tecnológica seleccionada para la obtención de etanol lignocelulósico

La ruta escogida, incluye: etapa de pretratamiento, etapa de recuperación de reactivos, etapa de hidrólisis y fermentación simultánea (SSCF), así como una etapa de separación y concentración del etanol. La evaluación de la ruta tecnológica, se realizó a partir de una simulación en el software ASPEN PLUS®, (Aspen Technologies, Inc., EUA). La tecnología seleccionada para el pretratamiento fue una variante de Organosolv utilizando como solvente etanol e hidróxido de sodio, debido a que el empleo de etanol y NaOH en el pretratamiento produce un aumento sustancial en el grado de deslignificación comparado con los procesos mencionados en la literatura. Otra ventaja adicional es la disolución en el licor de los compuestos extraíbles. El bagazo además de celulosa, hemicelulosa y lignina, se compone también de extraíbles, que representan una fracción muy pequeña de la composición total.

El pretratamiento consiste en someter las astillas de bagazo a un proceso de deslignificación con una solución acuosa de etanol y NaOH. La corriente de producto se pasa por un separador de fases. La fase sólida, que contiene la celulosa y hemicelulosa

se somete a una etapa de lavado con H₂O para retirar los residuos del licor de cocción y se lleva al sistema de SSCF. La fase líquida se mezcla con la corriente de la etapa de lavado y se envía al sistema de recuperación de reactivos.

En la etapa de Sacarificación y Fermentación Simultáneas se llevan a cabo tres procesos en las mismas unidades: Sacarificación, fermentación de las hexosas y fermentación de las pentosas. La sacarificación es la hidrólisis de la celulosa y la hemicelulosa a sus respectivos monosacáridos, llevada a cabo por las respectivas enzimas, además de celobiohidrolasa, endoglucanasa y α -glucosidasa, las cuales son producidas todas por el hongo *Tycho-derma Reesei* que es alimentado continuamente al sistema. La fermentación de las hexosas y las pentosas es producida por acción de *Zymomonas mobilis* recombinante, con una conversión de glucosa del 92 % y una conversión de xilosa del 85 %⁵. En el proceso de fermentación se produce una gran cantidad de CO₂ que se pasa a una unidad de absorción con agua para recuperar el etanol que es arrastrado con esta corriente.

Las corrientes de producto de las unidades de SSCF y de absorción son alimentadas a una columna de fraccionamiento. Como destilado se obtiene una solución acuosa de etanol (45 % p/p). Los fondos, llamados vinazas, se conducen al sistema de tratamiento de efluentes. El destilado se lleva a una segunda columna de rectificación donde se concentra el etanol hasta un 94 % p/p. La deshidratación se lleva a cabo por medio de una destilación extractiva utilizando etilenglicol como agente extractor.

En el Sistema de Recuperación de Reactivos, el licor de cocción utilizado en el pretratamiento se somete a una etapa de evaporación donde se retira el etanol, una parte de agua y los compuestos volátiles generados, de los cuales se evita su acumulación mediante una purga del 5 % de esta corriente. La corriente purgada se alimenta al tanque de pretratamiento. Los fondos del evaporador se incineran para recuperar energía, y las cenizas, que están compuestas de Na₂CO₃, se diluyen en agua y reaccionan con Ca(OH)₂ en el tanque de Caustificación para producir CaCO₃ y NaOH, éste último se adecúa para ser alimentado al tanque de pretratamiento. Para recuperar el Ca(OH)₂, el

CaCO₃ se lleva a un horno en donde se descompone térmicamente en CaO (cal viva) y CO₂. El CaO formado se mezcla con agua para producir Ca(OH)₂. El etilenglicol es recuperado en otra columna de destilación y se recircula a la columna de deshidratación.

Para el tratamiento de efluentes, las vinazas se llevan a una columna de evaporación para concentrarlas al 12 % en sólidos. A esta concentración es posible incinerarlas para recuperar energía térmica. El agua condensada resultante de todos los procesos en columna se puede reutilizar en el proceso.

Consideraciones de la Simulación

La simulación fue realizada utilizando el software de simulación ASPEN PLUS®, (Aspen Technologies, Inc., EUA) en modo estacionario. Cerca de la mitad de los compuestos involucrados en la simulación se encontraron en los bancos de componentes del software. Los componentes creados fueron: la celulosa como un polímero insoluble de la glucosa, la hemicelulosa como polímero insoluble de xilosa, la lignina y las cenizas como sólidos insolubles, los azúcares (glucosa y xilosa) como soluciones. Se utilizó el modelo NRTL para el cálculo de los coeficientes de actividad para la fase líquida y

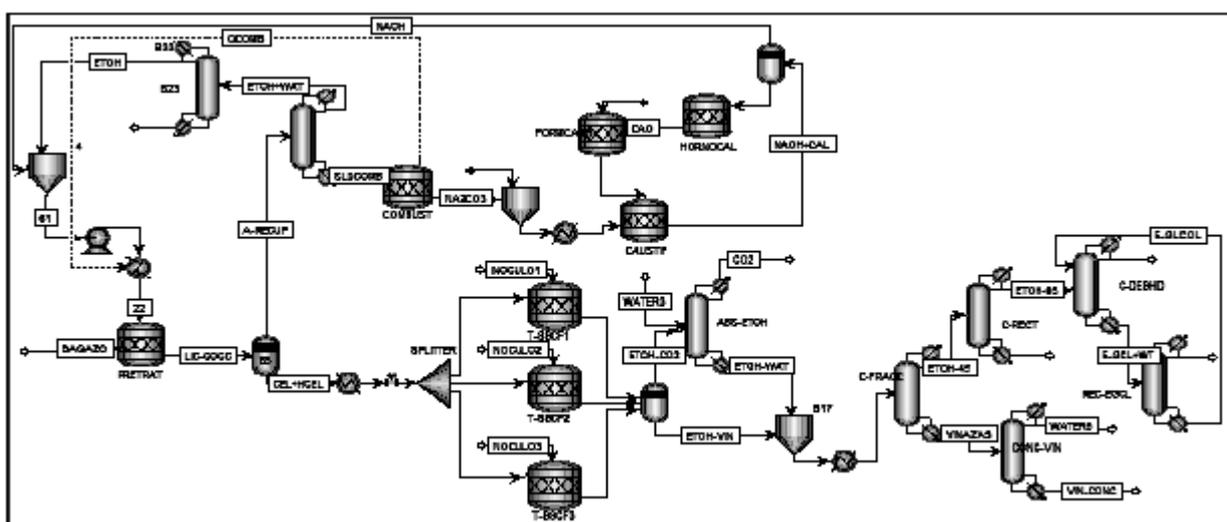
Hayden-O'Connell para las propiedades de la fase gaseosa en los sistemas agua-etanol-azúcar. Para las etapas y las corrientes en las que intervienen los hidróxidos, las sales y agua se escogió el modelo Electrolyte NRTL para el cálculo de las propiedades de la fase líquida y el modelo de Redlich-Kwong para la fase gaseosa.

La etapa de pretratamiento fue modelada matemáticamente utilizando los datos experimentales del proceso de pulpeo Organosolv agua-etanol-soda obtenidos a escala de laboratorio, y se realizó una extrapolación para determinar las condiciones en las que se obtiene el mayor grado de deslignificación. Las reacciones fueron simuladas empleando reacciones estequiométricas y conversiones fraccionales en el modelo de reactor RStoic. Los enfriadores y calentadores se modelaron recurriendo a los modelos simplificados Heater. En las etapas de evaporación, absorción y evaporación se utilizó la columna RadFrac, que modela rigurosamente destilaciones multi-etapa.

A continuación se presentan las condiciones de las principales etapas de operación y un esquema simplificado de la producción de etanol lignocelulósico, utilizando como materia prima el bagazo de la caña de azúcar.

Tabla1. Condiciones del Proceso

Pretratamiento	SSCF	Columna 1	Columna 2
T = 165 °C. P = 240 psi. 45 % V/V ETOH. 18 % P/P NaOH. S/L = 1:5	T = 30 °C P = 1 atm T _{RES} = 3 días C = 10 % sld.	P = 1 atm. # platos = 10 Prod: Sln. EtOH al 49,5 %	P = 1 atm # platos = 20 Prod: Sln EtOH al 94 %



DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados arrojados por la simulación se tiene que el rendimiento global del proceso es de 85 %, y las principales características del mismo se presentan en la tabla 2. Por tonelada de bagazo se obtiene 215 L de alcohol anhidro, cifra que representa una cantidad significativa teniendo en cuenta la cantidad de bagazo que se produce en la agroindustria azucarera colombiana.

Tabla 2. Características del proceso

Producción	0,215 L EtOH/Kg Bagazo húmedo
Consumo de reactivos	0,005 kg NaOH/ kg EtOH
Consumo de energía	19,44 MJ /kg EtOH

Sin embargo, es necesario resaltar que gran parte de la energía requerida en el proceso global se consume en la etapa de pretratamiento, en donde las condiciones ($P = 240$ psi y 165 °C) implican el gasto considerable de servicios energéticos (potencia y vapor). Otras etapas en donde el consumo de energía es alto son las de separación, tanto en la recuperación de reactivos como la concentración del etanol. Por otro lado, el proceso tiene etapas en las que pueden hacer importantes ahorros de energía, producidos por la combustión de los sólidos presentes en el licor de cocción gastado (46% p/p) y en las vinazas, además hay una recuperación extra de energía en la producción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reacción que es altamente exotérmica. El balance global de energía incorporando estos ahorros muestra una reducción importante en el consumo de energía.

Por otro lado, teniendo en cuenta la evaluación de la ruta tecnológica escogida y haciendo una proyección para el año 2007, de acuerdo a la cantidad de hectáreas sembradas en ese momento se hubiesen podido obtener 1 600 millones de litros de etanol a partir del bagazo generado en la Agroindustria Azucarera del Valle del Cauca, lo cual representa un posible incremento de hasta 5 veces el volumen de producción actual de etanol por vía fermentativa de las mieles, obtenidas como subproducto en la producción de azúcar. Sin embargo, cabe anotar que el valor arrojado a través de la evaluación de esta tecnología se obtiene

considerando el procesamiento del bagazo en su totalidad.

Se plantea realizar un análisis económico detallado que permita establecer la viabilidad de la ruta en la condiciones del país debido a que el costo de los equipos de esta planta es muy alto por la cantidad de operaciones involucradas, sin embargo este costo se puede asumir ya que se consume poca cantidad de reactivos (NaOH) y la materia prima es muy barata (bagazo) partiendo del hecho de que lo ideal es acoplar este proceso a una planta de producción de etanol a partir de caña.

CONCLUSIONES

1. La industria del bioetanol de segunda generación presenta grandes expectativas en Colombia, sin embargo, se debe analizar esta industria desde el punto de vista de desarrollo sostenible con el fin de que pueda ser una alternativa que permita cumplir con las metas propuestas por el programa Nacional de Biocombustibles en Colombia.
2. La ruta tecnológica escogida, presenta un gran potencial para su aplicación en la agroindustria azucarera Colombiana, debido al bajo costo de la materia prima (residuos lignocelulósicos de la industria azucarera existente), el mínimo consumo de reactivos y al aprovechamiento de todos los residuos (vinazas y CO_2).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al instituto colombiano de ciencia y tecnología Francisco José de Caldas por el apoyo al desarrollo del Programa Estratégico "RC 336-2007" y a la Red CYTED "Nuevas Tecnologías para la obtención de Biocombustibles" proyecto 306RT0279 (Código UNESCO: 330303, 332205, 530603, 330399)

BIBLIOGRAFÍA

1. ASOCIACIÓN DE CULTIVADORES DE CAÑA DE AZÚCAR DE COLOMBIA (ASOCAÑA):. Informe anual

2005-2006, 2006.

2. Cardenas, A.: “La Cosecha de la caña de azúcar”, en: El cultivo de la caña de azucar: Memorias del curso dictado en la ciudad de Cali, Tecnicaña, pp. 27-40, 1986.
3. SUN Y. & J. CHENG: “Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review,” *Bioresurce Technology*. (83): 1-11, 2002.
4. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA: Unidad de Planeación Minero-Energética. Términos de referencia potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia 2002. Colombia, Ref Type
5. WOOLEY, R.; M. RUTH; J. SHEEHAN; K. IBSEN; H. MAJDESKI Y A GÁLVEZ: *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis. Current and futuristic scenarios*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO, EE.UU., 1999b.
6. WYMAN, CHARLES E.; BRUCE E. DALE; RICHARD T. ELANDER; MARK HOLTZAPPLE; MICHAEL R. LADISCH AND Y.Y. LEE: “Comparative sugar recovery data from laboratory scale application of leading pretreatment technologies to corn stover,” *Bioresurce Technology*. (96): 2026-2032, 2005.