

POSIBILIDADES DE PRODUCCIÓN DE ETANOL, COMBUSTIBLE BASADO EN LAS ACTUALES CONDICIONES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA

Claudia Ramírez, Viatcheslav Kafarov, Crisóstomo Barajas,
Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Edgar Castillo.

CENICAÑA, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

Leyanis Mesa,

Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Cuba.

Recibido:

Aceptado:

En el trabajo se plantean las limitaciones científico-técnicas que ha tenido el proceso de incremento de las posibilidades de producción de etanol en Colombia y las posibilidades que ofrece el uso de la producción dual de azúcar y etanol en adecuados esquemas integrados de producción, las que son estudiadas mediante una simulación de procesos. Finalmente se presentan conclusiones para el trabajo futuro.

Palabras clave: Combustibles, etanol, industria azucarera.

POSSIBILITIES OF FUSEL ETHANOL PRODUCTION BASED IN THE PRESENT CONDITION OF COLOMBIA SUGAR INDUSTRY

This work introduce the main scientific and technical barriers that present the increase of the possibilities of ethanol production in Colombia, and the possibilities that offer the use of sugar-ethanol production, using adequate integrated schemes of production. The alternatives are study through simulation process. Finally, it presents recommendation for the future work.

Key works: Ethanol, fusel, sugar industry.

INTRODUCCIÓN

La industria de la caña de azúcar en Colombia está pasando por una etapa de diversificación, debido a que en el contexto internacional el precio del azúcar en el mercado ha sido muy inestable en los últimos años y existe una gran demanda mundial para la producción de biocombustibles. Por otra parte, en Colombia la ley 693 de 2001 del Ministerio de Minas y Energía establece el uso de alcohol como oxigenante de gasolina a partir del año 2005 en centros urbanos de más

de 500.000 habitantes. Para suplir las necesidades estimadas es necesaria la construcción de 8 a 10 plantas de producción de bioetanol.¹

DESARROLLO

ituación de la industria azucarera en Colombia

La industria azucarera de Colombia cuenta con condiciones agroclimáticas inmejorables, que aseguran altos rendimientos azucareros del campo

cañero. Los rendimientos en campo son superiores a 100 t/ha en ciclos de cultivo de 13 meses y las expectativas de que crezcan estos rendimientos se estiman entre un 10 % y un 20 % más, por lo que la producción azucarera de Colombia podría ser de 2,22 millones de toneladas de azúcar, de las que se exportarían 800 mil toneladas.

Debido a esta situación, siendo la caña de azúcar la principal materia prima para la producción de bioetanol en Colombia, se comenzó muy rápidamente la incorporación de una nueva tecnología para la producción de bioetanol a las fábricas de azúcar. Pero esta integración tecnológica no tuvo en cuenta variables fundamentales como: la disminución en la capacidad de producción de los ingenios, la salida de funcionamiento de equipos por problemas operacionales (debido a la diferencia de tecnologías entre los procesos), o de mantenimiento, problemas con la calidad del producto, entre otros, aspectos que han limitado el alcance de esta unión de procesos, concluyendo que la metodología utilizada no fue la mejor.

La tecnología incorporada a los ingenios colombianos (destilerías anexas) fue adquirida a la compañía Praj-delta T (compañía especializada a escala mundial que suministra la tecnología para producir el etanol a partir de la caña de azúcar, bien sea de la melaza o del jugo directamente, su tecnología es de

fermentación continua, deshidratación con tamices moleculares y tratamiento anaeróbico de las vinazas) para la obtención de bioetanol. Brasil es el primer productor de bioetanol en el mundo, sus plantas fueron diseñadas para producción dual bioetanol-azúcar con un alto grado de integración másica y energética, según la figura 1. En el caso colombiano, la planta de bioetanol y la planta de azúcar no fueron diseñadas para la producción conjunta lo que significa un grado bajo de integración y como consecuencia baja eficiencia energética de procesos productivos, agregando que la tecnología comprada solo era para trabajar con una corriente pura de miel y con una recirculación alta de vinazas, y en la actualidad se trabaja con una mezcla de miel-jugo claromeladura lo que ha generado una problemática en su integración y en el manejo de vinazas.

Por esta razón se tiene como objetivo lograr una mejor representación de estos problemas y obtener soluciones rápidas y concisas para lograr un mayor grado de integración y como consecuencia aumentar la eficiencia energética y productividad del proceso dual. La simulación del proceso de producción dual de azúcar-bioetanol a partir de caña de azúcar para el caso específico colombiano, ayudará a analizar de una mejor manera qué es lo que está sucediendo en la industria y cómo manejar el proceso para que trabajen de una manera altamente eficaz y efectiva.

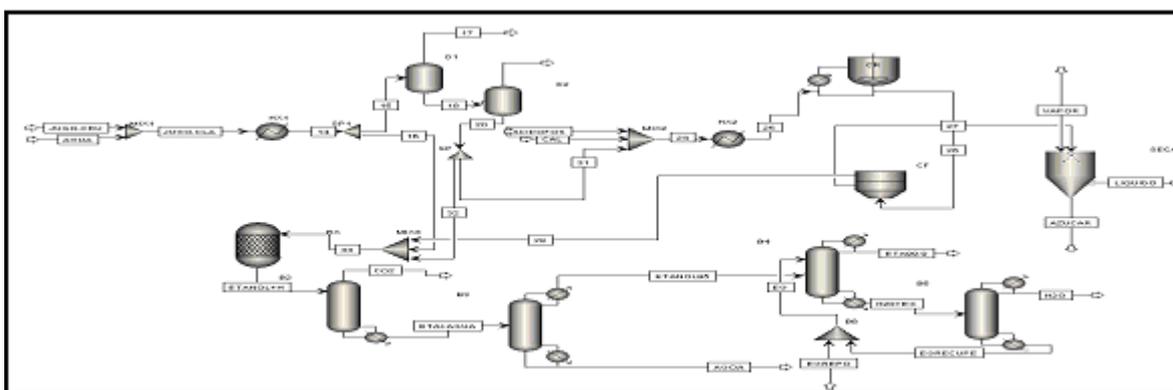


Figura1. Esquema simplificado de la producción dual (Azúcar-Bioetanol)

III. Posibilidades de mejorar la eficiencia del proceso de producción de etanol

Para mejorar la eficiencia de la producción de etanol es necesaria la exploración de las posibilidades de

utilización de diferentes corrientes azucaradas del proceso de producción de azúcar a partir de la caña, enfatizando en el potencial del conjunto de materias primas de las diferentes corrientes del proceso fabril azucarero, aspecto sobre el cual han sido reportados

varios resultados,^{3,6} para lo que han sido evaluados los diferentes métodos de tratamiento de los jugos,⁵ así como el efecto de las mezclas de sustratos en el medio ambiente.⁴ El uso de los residuales cierra el ciclo productivo y se presenta como evidencia de la elevada seguridad ecológica de la alternativa de la caña de azúcar en el marco de un desarrollo sostenible.

Se obtuvo una ecuación matemática que permite expresar los Azúcares Reductores Totales (ART) como función de los grados Brix y el Porcentaje de Sacarosa Aparente (Sac Aparente), que puede ser aplicable a diferentes mezclas de materias primas utilizadas como alimento a la destilería.

Se tomaron distintos períodos de tiempo en que se alimentaron diferentes mezclas de materias primas a una destilería de un ingenio del sector, para determinar una relación entre los ART con los grados Brix y el porcentaje de sacarosa de la mezcla alimentada.

Para cada período de tiempo y mezcla de materias primas tomadas se encontró una relación de los ART como función de los grados Brix y el contenido de sacarosa utilizando el método de mínimos cuadrados.

Se evaluaron las relaciones entre sí para determinar las que menos variabilidad presentaban con los valores de ART medidos por el ingenio. Las variables medidas fueron ART (% w/w), grado Brix (% w/w) y contenido de sacarosa (% w/w). La información reportada se tomó como el promedio diario, para el caso del grado Brix, ART y % sacarosa, y el acumulado diario para el caso de las toneladas de alimento.

Las mezclas de las corrientes de entrada a las destilerías analizadas son:

1. Miel B;
2. Meladura (MD) y Miel B (MB), Relación MD/MB = 0,23;
3. Meladura (MD) y Miel B (MB), Relación MD/MB = 0,9;
4. Meladura (MD) y Miel B (MB), Relación MD/MB = 1,05;
5. Jugo Claro (JC) y Miel B; 6. Jugo Claro, Meladura y Miel B

La expresión es de la forma:

$$\text{ART Calc} = a1 * (\text{Brix}) + a2 * (\text{Sac Aparente}) + b \quad (1)$$

En la tabla 1 se muestran los valores de los coeficientes calculados según tipo de sustrato.

Tabla 1. Coeficientes de la correlación para los distintos tipos y períodos de alimentación

sustrato	a1	a2	B	R ²
Miel B	-0,720191211	-1,26424054	150,855029	0,339536778
MD/MB = 0,23	0,331352127	0,21542582	17,688373	0,46211358
MD/MB = 0,9	0,370979121	0,72246374	-2,58948937	0,589026382
MD/MB = 1,05	0,368564621	0,36016302	11,3135207	0,76576971
JC y MB	0,658955616	-0,21927568	16,2783097	0,97273262
JC, MD y MB	0,402145634	0,82838234	-5,63262402	0,51985923

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a las correlaciones que mejor se acomodan al amplio espectro de posibles combinaciones de alimento o mezclas de alimentos. La correlación global es la obtenida del análisis del período 2007.

El %Error se calculó como el promedio de los errores diarios, los cuales se determinaron como

sigue:

$$\% \text{Error} = 100 * (\text{ART} - \text{ART Correlación}) / \text{ART} \quad (2)$$

Las correlaciones utilizadas se representan por las ecuaciones:

$$\text{MD/MB} = 0,23$$

$$\text{ART}(t) = 0,584 * \text{Brix}(t) + 0,280 * \text{Sac}(t) + 548,313 \quad (3)$$

$$\text{MD/MB} = 0,9$$

$$\text{ART}(t) = 0,510 * \text{Brix}(t) + 0,270 * \text{Sac}(t) + 6914,203 \quad (4)$$

Global

$$\text{ART}(t) = 0,405 * \text{Brix}(t) + 0,617 * \text{Sac}(t) + 149,604 \quad (5)$$

El análisis estadístico se realizó utilizando la prueba *t student* para varianzas desconocidas y diferentes. No existe criterio para decir que los valores de ART calculados por el ingenio y los arrojados por la correlación global, de relación MD/MB = 0,23 y 0,9 son diferentes.

En el caso de la alimentación a destilería de solo miel B, la correlación MD/MB = 0,23 arroja resultados satisfactorios, mientras que para mezclas de diferentes materias prima se ajustan los datos arrojados por la correlación MD/MB = 0,9.

Para el caso de la correlación global, que se obtuvo del histórico medido por el ingenio, se aprecia un buen comportamiento para mezclas de meladura-miel B y jugo claro-miel B, mientras que para el período en que se usó solo miel B y la mezcla de las tres materias primas, el grado de concordancia con los datos del ingenio fue menor. A continuación se estudiarán períodos de alimentación diferentes a los ya analizados.

Alimento a la destilería JC y MB, razón por la que se utilizó la correlación MD/MB = 0,9

Como conclusión de esta parte del estudio, se obtuvieron tres correlaciones que permiten predecir los valores de ART para diferentes mezclas de alimento de materia prima a la destilería. Cuando se alimenta solo miel B, la expresión es (ver ec. 1). Mientras que cuando se tienen mezclas de miel B con jugo clarificado y/o meladura, la ecuación a utilizar es la Ec.2. Estas, al ser utilizadas para diferentes períodos del año, mostraron buena concordancia con los valores medidos por el ingenio, así como errores promedio aceptables por período analizado. Se encontró una tercera ecuación a partir de los datos históricos del ingenio para el 2007, la cual presentó un buen comportamiento y correspondencia con los valores medidos, aunque registró en general desvia-

ciones estándar, y en algunos casos, porcentajes de error mayores a los mostrados por las correlaciones MD/MB = 0,23 y 0,9, aunque a diferencia de estos, no depende del tipo de alimento que se esté utilizando en la destilería, lo que constituye su principal ventaja. (Ver Ec. 5)

También dentro de este mismo estudio se está llevando a cabo la simulación del proceso dual colombiano, de los esquemas tecnológicos para la producción de bioetanol y azúcar a partir de caña, realizándose en el simulador de procesos Aspen Plus versión 2006.5 (Aspen Technologies, Inc., EUA). Para el cálculo de los coeficientes de actividad se empleó el modelo termodinámico NRTL y para el comportamiento de la fase de vapor el Hayden-O'Connell. Los componentes tenidos en cuenta para la simulación comprenden los provenientes de la materia prima e insumos y los formados en la etapa de fermentación: etanol, dióxido de carbono, biomasa, acetaldehído, oxígeno, alcoholes de fusel y glicerol. El cálculo riguroso de las condiciones de operación en las columnas de destilación se desarrolló con el módulo RadFrac basado en el método de equilibrio inside-out que utiliza las ecuaciones MESH. Los principales obtenidos a partir de la simulación son:

Tabla2. Características de la caña trabajada

Caña molida	
Molienda (TCM)	24 100,296
Molienda (TCD)	867,28
Molienda (TCH)	38
Días hábiles	28,2
Horas/día	22,56
Tiempo perdido	0,06
Materias extrañas	0,015
Brix % caña	15,2
Pol % caña	13,52
Hum % caña	69,855
Fibra % caña	14,93

Tabla 3. Bagazo obtenido

Bagazo	
Bagazo (t)	8 502,33
Bagazo (t/h)	12,56
Bagazo % caña	30,05
Humedad % Bagazo	48,58
Sacarosa % Bagazo	1,99

Tabla 4. Cachaza total

Cachaza total	
Cachaza % caña	0,05
Cachaza (t/h)	1,90
Brix (%)	2,58
Sacarosa (%)	0,03
Pureza (%)	0,88
Insolubles (%)	0,29
Humedad (%)	0,68

Tabla 5. Azúcar crudo

Azúcar crudo húmeda	
Azúcar húmedo (% caña)	12,00
Azúcar húmedo (t/h)	4,56
Brix % caña	99,00
Sacarosa (%)	48,58
Pureza (%)	100,00
Humedad (%)	1,00

Tabla 6. Datos de entrada a destilería

Datos de entrada	Miel B	Meladura	Jugo clarificado
Flujo total	15 400	8 520	19 550
Flujo total	10,922	7,15	18,54
Densidad	1,41	1,19	1,06
% Azúcar fermentable	64,5	53,13	13,55
% Sólidos totales	79,7	55,0	14,8
% Agua	20,3	45,0	85,2
Acidez	5 000	950	450
% ATR	64,82	53,40	13,72
Temperatura (°C)	60	90	60
Relación Agua lavada			0,5
Relación agua (alimento mezcla al alimentador)			0,372719624

Tabla 7. Bioetanol

Alcohol anhidro	Kg/h	% p/p
Agua	11,72	0,15
Bioetanol	7 802	99,85
Total (kg/h)	7 813,4	
Total (kg/m ³)	9,84	
% w/v	99,85	
Volumen (L/h)		9 838,1
Densidad (kg/m ³)		794,2
Volumen (L/día)		236,114

Los resultados de la integración demuestran que mediante una correcta operación se pueden lograr valores aceptables de producción de azúcar con un

rendimiento del 12 toneladas de azúcar por tonelada de caña y, a su vez, lograr niveles apreciables de etanol que representan valores adicionales a la producción de azúcar de 6,21 litros por cada tonelada de caña. Si consideramos además que se logran 0,05 t de cachaza por tonelada de caña que, como se conoce, es materia prima para alcoholes superiores y biodiesel, ⁷ podemos concluir que son muchas las posibilidades que tiene Colombia de lograr una correcta integración de las fábricas de azúcar y las destilerías.

CONCLUSIONES

1. Es factible lograr resultados productivos estimulantes para la producción de una fábrica de azúcar integrada a una destilería de etanol si se optimiza la integración material y energética.

2. De acuerdo con las características de los sustratos componentes y las proporciones de mezclado que se utilicen se pueden incrementar los resultados del complejo fábrica de azúcar destilería por lo que las investigaciones en esta dirección deben continuar e incorporar otras alternativas de fuente de azúcares como son los azúcares de la celulosa y la hemicelulosa de residuos lignocelulósicos.

3. La correcta integración material y energética permite una sustentabilidad energética y un alto volumen de producción de bagazo.

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. ACOSTA, A. D.: *El Gran Desafío*, Cali, junio, 2003.
2. CARDONA, C. A Y O.J. SÁNCHEZ: “Analysis of integrated flow sheets for biotechnological production of fuel ethanol”, en 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004, Praga, República checa, 2004.
3. FABELO, J. A.: Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando mezcla de diferentes sustratos, Tesis de Doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, abril de 1999.
4. ITURRIA, PEDRO JESÚS: Estudio medioambiental de la etapa de fermentación alcohólica utilizando diferentes sustratos y sus combinaciones, Tesis de maestría, 2001.
5. KLEBANSKY, M.: “Evaluación de diferentes métodos de tratamiento de jugos de caña, para la producción de alcohol”, revista *ICIDCA*. XIX (3): 1-5, 1983.
6. LLERENA, G. Y OTROS: “Alternativas de sustratos para la producción de alcohol”. Revista *Cuba Azúcar* 28(3): 49-52, 1999.
7. González, E. y A. Valdés (Editores): *Posibilidades prospectivas de producción de bioetanol aprovechando integralmente los residuos agroindustriales sin agredir el medio ambiente*, Ciudad de la Habana, CYTED, ISBN: 959-7136-44-9.