

Incorporación de otras materias primas como fuentes de azúcares fermentables en destilerías existentes de alcohol

Incorporating other substances as raw materials for fermented sugar in alcohol distilleries

Romel García-Prado¹, Amaury Pérez-Martínez^{2,3}, Karel Diéguez-Santana³, Leyanis Mesa-Garriga⁴, Inti González-Herrera⁵, Meilyn González-Cortés⁴, Erenio González-Suarez⁴*

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12. C.P. 01012. Ciudad de Guatemala, Guatemala.

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey. Carretera Circunvalación s/n entre Camino viejo de Nuevitas y Avenida 26. C.P. 74650. Camagüey, Cuba.

³ Departamento de la Tierra, Universidad Estatal Amazónica. Km 2 ½ vía Puyo a Tena (Paso Lateral). CP. 160150. Puyo, Ecuador.

⁴ Centro de Análisis de Procesos, Facultad de Química-Farmacia, Universidad Central “Martha Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. C.P. 50100. Santa Clara, Cuba.

⁵ IRISA/INRIA, Universidad de Rennes 1. 44 boulevard de Sévigné. C.P. 35000. Rennes, Francia.

(Recibido el 30 de mayo de 2013. Aceptado el 03 de febrero de 2015)

Resumen

En el presente artículo se estudian diferentes alternativas para satisfacer el déficit de substratos azucarados, con el fin de lograr el uso planificado de la capacidad instalada de la producción de etanol en un área de varios ingenios y destilerías, primero minimizando el porcentaje de residuos en un 25,92%, a través del uso de corrientes secundarias y jugos diluidos, generados del proceso de producción de azúcar. La optimización del vínculo de mieles y del bagazo, entre los ingenios y las destilerías, permite resolver una importante incógnita que es el aprovechar la capacidad instalada durante todo el año,

* Autor de correspondencia: Amaury Pérez Martínez, correo electrónico: amaury.perez@reduc.edu.cu
DOI: 10.17533/udea.redin.n75a13

lo que significa incrementar el aprovechamiento hasta 154.96% de lo inicialmente planificado.

-----**Palabras clave:** etanol, mieles, jugos diluidos, capacidades instaladas, capacidades instaladas ociosas

Abstract

This paper presents alternatives for meeting the deficit in sugared substrates in a territory with several sugar mills and ethanol distilleries so they can reach their current production capacity. By using secondary currents and diluted juices from the sugar production process, wastage was first reduced to 26.92%. Then by optimizing the molasses linking and bagasse between sugar mills and ethanol distilleries, an important problem was resolved allowing production capacity to be met. This represented a 154.96% increase over what was initially planned.

-----**Keywords:** ethanol, molasses, diluted juices, installed capacities, idle installed capacities

Introducción

Dentro del proceso de diversificación, la producción de alcohol continúa desarrollándose, debido a la problemática en torno a los portadores energéticos y al desarrollo de la industria química y dentro de ella la alcohólica, ya que su uso en la producción de bebidas y licores para la exportación favorece la recuperación económica. Se hace necesario buscar alternativas de producción de etanol a partir de otras materias primas, ofreciendo una gran trascendencia para esto, el uso de los productos intermedios de la industria azucarera, los cuales contribuyen al mismo tiempo a mejorar el proceso azucarero y amplían la posibilidad de disponer de nuevas materias primas. Es por tanto de interés para la industria intensificar el proceso de producción de alcohol en su etapa fermentativa, usando mezclas de diferentes sustratos.

En este trabajo se exponen las alternativas de incrementar el aprovechamiento de la capacidad instalada y planificada para operar anualmente la producción de etanol en una región de la industria de la caña de azúcar, para lo que se requerirá un alto consumo de miel final.

La capacidad de miel disponible en instalaciones de la industria de azúcar de caña, en la mayoría de los casos, no satisface la demanda de este producto para la fermentación alcohólica. Teniendo en cuenta este aspecto, la creciente demanda de etanol en el mercado internacional como combustible, y considerando que existen capacidades instaladas en las destilerías; es necesario buscar otras fuentes alternativas de materias primas para la fermentación, con el objetivo de evitar las capacidades instaladas ociosas y lograr el aumento de la producción de etanol con el menor costo asociado.

En la literatura científica se reportan varios trabajos sobre las posibilidades de esquemas integrados en la producción de azúcar, etanol y otros derivados de la caña de azúcar [1-3], teniendo un enfoque de interés en el análisis de las potencialidades de la caña de azúcar en su conjunto, es decir, como fuente de productos que darían lugar a complejos agroindustriales [4]; reportándose incluso como una vía para encontrar soluciones al impacto ambiental de la producción de etanol, por lo que se consideró aconsejable estudiar el efecto de extraer y mezclar jugos de los filtros, jugos secundarios y

mieles en la producción de etanol, en un proceso de asimilación de tecnologías.

La estrategia definida para el desarrollo de los derivados y con ello los biocombustibles, tiene que ir más allá de la utilización de los subproductos tradicionales de la agroindustria, y prever el uso de productos intermedios de la producción azucarera, los cuales, al tiempo que contribuyen a mejorar el proceso azucarero, amplían la posibilidad de disponer de nuevas materias primas. Por tanto, las producciones de derivados no se pueden asumir como tradicionalmente se aceptan, instalaciones anexas a los centrales azucareros. Se trata de desarrollar su integración tecnológica y energética a las fábricas de azúcar, aprovechando las ventajas del proceso relacionadas con la utilización de materias primas diversas.

La extracción de corrientes intermedias representa para una fábrica de azúcar un incremento en su capacidad de molienda, disponibilidad de energía y del equipamiento de las áreas de purificación y evaporación al dejar de procesar corrientes que representan un por ciento de la caña molida (jugo de los filtros y el jugo secundario). Adicionalmente, se evita la incorporación al proceso de un material con altos contenidos de no azúcares, coloides y microorganismos que en última instancia perjudican la calidad del azúcar y el agotamiento de las mieles.

Teniendo en cuenta la situación anterior se han trazado los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio de mezclas de jugos de los filtros y jugos secundarios principalmente para la fermentación alcohólica, analizando el impacto de la mezcla en el rendimiento y eficiencia alcohólica.
- Evaluar el impacto de la extracción del jugo de los filtros y los jugos secundarios en el balance material y energético de la fábrica de azúcar.
- Evaluar el potencial incremento de aprovechamiento de las capacidades instaladas de obtención de etanol y la

factibilidad de disminuir los costos por peso de producción.

Materiales y métodos

Materias primas

En los experimentos, para los estudios de mezcla de sustratos azucarados, se utilizaron como materias primas o sustratos fermentativos: miel final, el jugo de los filtros y el jugo secundario de una fábrica de azúcar de una región estudiada. Los sustratos fermentativos a emplear se caracterizaron de acuerdo con los parámetros de: Brix, azúcares reductores, pH, acidez y % Pol, con el objetivo de conocer las condiciones y la calidad de cada uno de ellos antes de ser utilizados en el experimento.

Para estudiar el efecto, de diferentes por cientos de extracción del jugo de los filtros y de la extracción del jugo diluido del último molino, en los balances de material y energía, se realizaron los cálculos para una fábrica de azúcar con una molienda de 7750 t/d de caña. Los balances de materiales y energía se realizaron con los parámetros operacionales obtenidos directamente del proceso mediante corridas experimentales y procesados a través de software profesional [5] con el propósito de facilitar el análisis de alternativas.

Diseño experimental y análisis estadístico

El Plan Experimental utilizado en el diseño de mezclas siguió el diseño de enrejado simple [6], el cual explora siete puntos experimentales que corresponden a la preparación de siete medios de cultivos, tres como base y los cuatro restantes son combinaciones de ellos. Con el diseño del experimento se explora un número mayor de variantes a utilizar en la dinámica de fermentación, con un menor número de experiencias a partir de los sustratos seleccionados, en el cual se tiene en cuenta la utilización hasta un 100% de azúcares reductores totales (ART) de los sustratos. Las

variables respuestas fueron: % alcohólico, rendimiento y eficiencia de la fermentación.

Partiendo de este diseño experimental, se obtuvieron siete variantes de medio de cultivo, siendo la fuente de azúcares la variable de estudio. Para el diseño de los puntos intermedios de los lados del triángulo, cada uno de los sustratos aporta el 50% de los ART de la masa final y en el punto central del triángulo se tomó el 33,3% de los ART del aporte de cada sustrato. Todos los puntos se ajustaron a 120 g/l de azúcares reductores totales y para ello se completó con miel final. El cálculo de los volúmenes de sustratos a emplear en cada punto se realizó a través del balance de masa.

Condiciones de fermentación

En la fermentación se utilizó la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (levadura panadera) seca deshidratada del tipo comercial. El inóculo fue preparado de acuerdo a lo reportado en la literatura [7] y se utilizó como sustrato la miel final. La fermentación se realizó en frascos de 5 litros de capacidad, de forma anaerobia. Las mediciones fueron realizadas a las 24 horas de iniciado el proceso fermentativo. Para el control del proceso se determinó el grado *Brix*, en la propagación y prefermentación cada hora y en la fermentación cada dos horas, al igual que el conteo celular realizado en cámara de *Neubauer*.

Métodos analíticos

La concentración de azúcares reductores fue determinada por el método de *Eynon-Lane* y el grado alcohólico fue determinado por picnometría.

Determinación de las condiciones óptimas de transportación de las materias primas

Para determinar las alternativas óptimas de transportación se requiere las distancias entre orígenes y destinos y los costos de transportación por km a recorrer con las diferentes cargas

de mieles, siendo éste entonces el conocido “Problema de Transporte” que se resuelve con ayuda de la Programación Lineal [8].

En estos dos casos el problema se formula de la siguiente manera:

Sea n el número de ingenios y p un vector donde el valor del elemento p_i es la cantidad de toneladas de bagazo que tiene el ingenio i . Se tiene además un conjunto de m destilerías de alcohol que consumen bagazo y un vector d donde el valor del elemento d_j es la cantidad de bagazo que demanda la destilería j . Existe una matriz de distancias entre ingenios y destilerías $D_{n \times m}$. Se desea determinar la cantidad de bagazo a la que debe moverse entre cada par $\langle ingenio; destilería \rangle$, de forma tal que se minimice el costo de transportación de las materias primas.

Para ello se plantea un modelo (Eq. 1) donde el objetivo es minimizar el valor de la variable z :

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} \times x_{ij} \quad (1)$$

Donde x_{ij} es la cantidad de bagazo que se transporta del ingenio i a la destilería j , mientras c_{ij} es el costo de transportar una tonelada de miel teniendo en cuenta el costo del combustible ($c_{ij} = 0.30 \times d_{ij}$).

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones:

Cada ingenio aporta todo el bagazo que tiene, moviéndola hacia alguna localización (Eq. 2).

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = p_i \quad i = 1 \dots n \quad (2)$$

Cada destilería recibe la cantidad de bagazo que demanda (Eq. 3).

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = d_j \quad j = 1 \dots m \quad (3)$$

Adicionalmente:

$$x_i \geq 0 \quad i = 1 \dots n$$

Este modelo (Eq. 4) obliga que la demanda de bagazo sea igual a la oferta. En los dos casos

que aparecen a continuación no se cumple esta relación, para poder utilizar el modelo planteado basta introducir variables artificiales que representen o demandas adicionales u ofertas adicionales.

Si una nueva demanda es necesaria, entonces su valor será:

$$nd = \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{j=1}^m d_j \quad (4)$$

Si se necesita una nueva oferta (Eq. 5):

$$no = \sum_{j=1}^m d_j - \sum_{i=1}^n p_i \quad (5)$$

Ambos modelos son optimizados utilizando el sistema GAMS con licencia académica [9]. El método usado está basado en la programación lineal basada mezclada con ramas y cotas [10].

Resultados y discusión

Estudio de mezcla de sustratos azucarados para la producción de etanol

La Tabla 1 muestra la caracterización realizada a cada una de las materias primas utilizadas en el proceso.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en cada experimento. Como se puede apreciar en la Tabla 2 los mejores resultados son las experiencias con aportes de 33,3% ART Miel, 33,3% ART Jugo Secundario, 33,3% ART Jugo filtro, estableciendo así el criterio que la corriente de jugos secundarios puede ser usada como complemento del proceso fermentativo.

Tabla 1 Caracterización de los sustratos utilizados en la fermentación alcohólica

Parámetro	Miel final	Jugo de los filtros	Jugo secundario
Azúcares reductores (g/L)	452,34	125,17	83,1
Ph	5,76	5,8	5,63
Brix (° Bx)	81,8	15,13	11,1
Pol (%)	42,24	11,69	9,98

Tabla 2 Parámetros respuestas de cada punto experimental

Corrida	ART Inicial (g/L)	% Alcohólico	Rendimiento %	Eficiencia %
JS (100%)	120	5,02	46,25	71,84
JS+ M (50 y 50%)	120	5,34	46,17	71,69
JF+JS (50 y 50%)	120	5,16	44,61	69,27
JF + M (50 y 50%)	120	5,72	50,85	78,95
J F (100%)	120	5,16	46,41	72,05
M (100%)	120	5,15	46,64	72,43
M+JS+JF (33,3; 33,3 y 33,3%)	120	5,85	51,32	79,70

Los resultados también demuestran que el jugo de los filtros es una corriente adecuada para el proceso fermentativo.

Se desarrollaron los modelos de la mezcla ternaria para el análisis del % alcohólico, el rendimiento y

la eficiencia en la fermentación como parámetros respuestas. Como variables independientes se tomaron los porcentajes de ART que aportaban los sustratos: jugo de los filtros, secundario, miel y los azúcares reductores iniciales. Los modelos (ecuaciones 6, 7 y 8) obtenidos fueron:

$$\begin{aligned} \% \text{Alcohólico} = & 0,5 * \text{Miel} + 0,3 * \text{JS} + \\ & 0,7 * \text{JF} - 1,6 * \text{Miel} * \text{JS} - 2,4 * \text{Miel} * \text{JF} - \\ & 0,4 * \text{JS} * \text{JF} - 0,3 * \text{Miel} * \text{JS} * \text{JF} \% \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} = & 46,64 * \text{Miel} + 46,25 * \text{JS} + \\ & 46,41 * \text{JF} - 1,1 * \text{Miel} * \text{JS} + 17,3 * \text{Miel} * \text{JF} - \\ & 6,88 * \text{JS} * \text{JF} + 103,98 * \text{Miel} * \text{JS} * \text{JF}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia} = & 72,43 * \text{Miel} + 71,84 * \text{JS} + \\ & 72,05 * \text{JF} - 1,78 * \text{Miel} * \text{JS} + 26,84 * \text{Miel} * \text{JF} - \\ & 10,7 * \text{JS} * \text{JF} + 161,94 * \text{Miel} * \text{JS} * \text{JF}. \end{aligned} \quad (8)$$

Donde: JS =Fracción de jugo secundario, JF = Fracción de jugo de los filtros, Miel = Fracción de miel final

Los modelos muestran que, según los coeficientes de las variables independientes, la procedencia de los jugos contribuyen favorablemente a las respuestas analizadas, obteniéndose mejores resultados en las formulaciones que contienen jugo de los filtros. Se aprecia, además, que se favorece el proceso con el uso de una mezcla de

jugo secundario, jugo de los filtros y miel, como se ha analizado anteriormente. Estos resultados permiten la toma de decisiones para evaluar otras alternativas de mayor capacidad de producción de etanol con la disponibilidad de los jugos de los filtros y secundarios de la fábrica de azúcar.

Estos modelos también demuestran la importancia del jugo de los filtros en la fermentación y confirman las posibilidades de emplear jugos diluidos en la fermentación alcohólica, y con ello ahorrar el proceso de concentración de estas corrientes e incluso los gastos de agua en su posterior dilución, lo que indudablemente permite un impacto económico positivo.

Evaluación del efecto de las extracciones de corrientes secundarias en los balances de materiales y energía de la fábrica de azúcar

La Figura 1 muestra los valores correspondientes al efecto de la extracción del jugo de los filtros en las principales corrientes fluidas del proceso en las estaciones de alcalización y clarificación, para un ingenio que tenga una molida diaria de 7440 toneladas de caña.

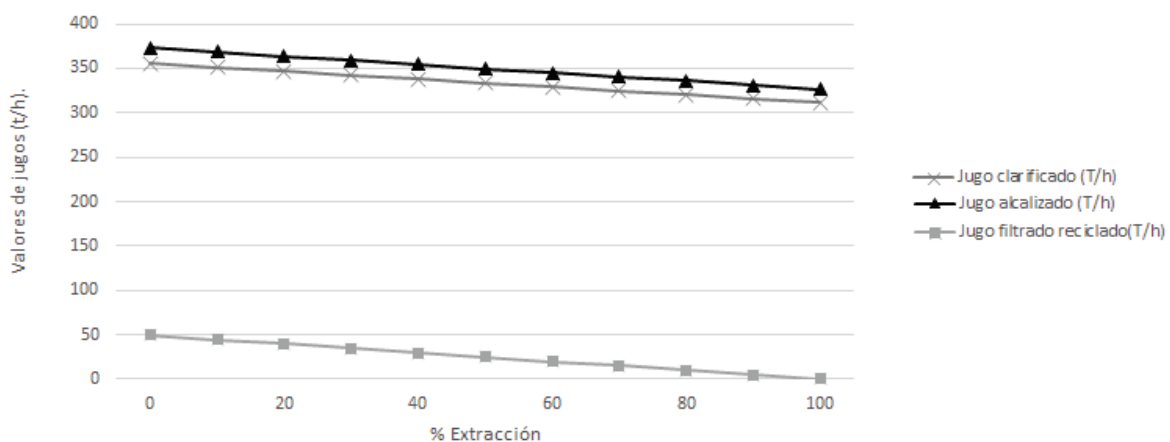


Figura 1 Efecto del por ciento de extracción del jugo de los filtros en las principales corrientes del procesos de fabricación de azúcar

Se observa que a medida que aumenta el % de extracción del jugo de los filtros, disminuye la disponibilidad de los jugos alcalizado y clarificado. Igualmente, de los balances de materiales y energía se pueden determinar los resultados de producción de azúcar y miel, de acuerdo con las diferentes variantes de extracción del jugo de los filtros, Figura 2, en la que se observa que el azúcar producido se reduce con

una total extracción del jugo de los filtros en 5,3% y las mieles producidas en 70%. Es evidente el efecto negativo de la extracción de los jugos de los filtros en las cantidades de azúcar crudo y miel final a obtener, no obstante, eso puede compensarse tanto por el ahorro energético como por la posibilidad de utilizar los jugos pobres con otros destinos.

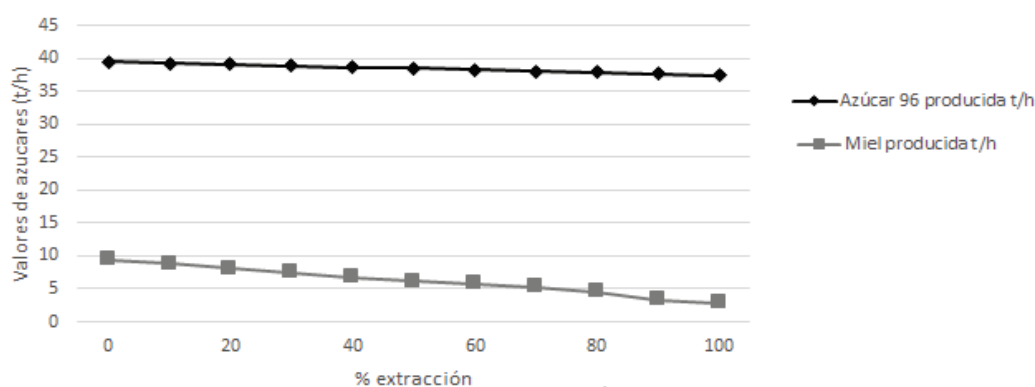


Figura 2 Efecto de la extracción del Jugo de los filtros en la producción de azúcar y miel

La evolución de los principales indicadores del balance energético del sistema se presentan en la Figura 3, donde se deduce que de la extracción de los jugos de los filtros aumenta la disponibilidad de bagazo para otros usos como la producción

de etanol, desde 9,02 t/h hasta 13,09 t/h, lo que representa un incremento del bagazo disponible de 4,07 t/h, lo que es un 45,12%, debido a un sustancial ahorro de vapor que se reduce de 173,5 t/h hasta 159,54 t/h.

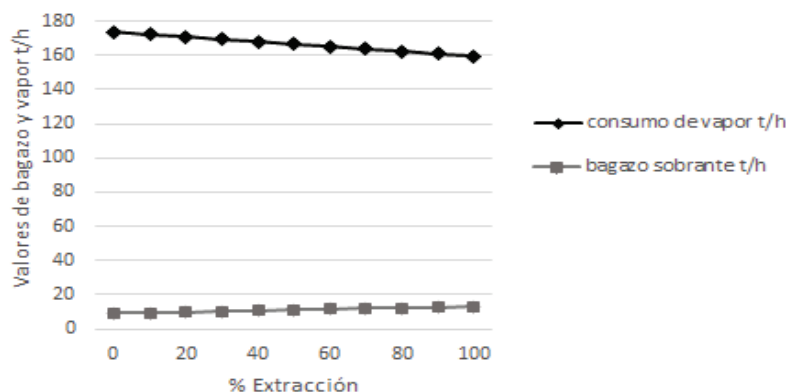


Figura 3 Efecto de la extracción de los Jugos de los filtros en los consumos de vapor y cantidad de bagazo residual

Un análisis sobre la extracción del jugo de los filtros y el jugo diluido del último molino, en las

condiciones de operación extremas, se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Condiciones de operación extremas de la fábrica de azúcar

Indicadores / alternativas (t/h)	Condiciones Normales (t/h)	Extracción 100 % de J. Filtros (t/h)	Extracción del J. S. (t/h)	Extracción del 100% J.F y J.S. (t/h)
Jugo alcalizado	372,98	326,42	355,49	309,71
Jugo clarificado	355,62	311,22	338,86	296,08
Extracción jugo filtros	0,00	47,42	0,00	47,42
Extracción jugo molino	0,00	0,00	17,49	17,49
Azúcar producida	39,52	37,49	37,59	35,55
Miel final	9,48	2,85	9,135	2,83
Consumo de vapor	173,75	159,44	168,70	154,74
Bagazo sobrante	9,02	13,09	10,58	14,43

La extracción del jugo secundario (JS) al igual que la del jugo de los filtros, provoca una disminución del azúcar crudo de 5,14 y 4,88% respectivamente, siendo el efecto combinado de ambos de una reducción del azúcar de 8,99% y en la miel a producir en un 70,14%, lo que debe ser considerado en el balance de mieles totales para la vinculación de las fuentes de mieles con el consumo.

Por otro lado, con estos niveles de extracción se puede incrementar la disponibilidad del bagazo sobrante en una relación de 1,60, lo que debe tener un significativo impacto no solo en la eficiencia energética de un complejo industrial que también produzca etanol, sino que abre la perspectiva de asimilar la tecnología de producción de bagazo de caña de azúcar [11].

**Análisis de la disponibilidad de
sustratos azucarados al extraer
jugo de los filtros y el jugo
secundario para su uso en la
producción de etanol**

A partir de los resultados anteriores se puede establecer el nivel de producción máxima que se puede alcanzar para una destilería integrada a fábricas de azúcar, de las molidas diarias de caña de azúcar, empleando la extracción de los

jugos de los filtros y del último molino, así como ajustando el jarabe (resultado de la mezcla de jugo de los filtros y jugos secundarios) para la fermentación a 120 ART sobre la base de realizar el ajuste con mieles finales.

Aquí el proceso de asimilación de la tecnología de producción de etanol con mezclas de sustratos ha tenido que adaptarse a las condiciones específicas de cada instalación industrial, debido al desbalance existente entre las capacidades de producción de las fábricas de azúcar y las destilerías de etanol anexas a cada una de ellas.

**Caso de la destilería anexa a una fábrica de
azúcar de una molida de 6.583 t de
caña por día.**

La capacidad instalada de 2.500 hl/d, que requieren 4.167 m³ al día de sustrato fermentable con 120 g/l de azúcares totales (ART), en la destilería hace imposible satisfacer la demanda de sustratos azucarados para la fermentación en la formulación óptima que se puede determinar con ayuda de las ecuaciones 6, 7 y 8.

La alternativa será aprovechar al máximo las extracciones de los jugos de los filtros y secundario, y completar el volumen de sustrato fermentable requerido con mieles finales. De

acuerdo con las disponibilidades se tendrán 1.336,64 m³ provenientes de las extracciones y otros 2.830,24 m³, deberán lograrse con mieles finales y un insumo de agua para la dilución. Las mieles totales requeridas, para esta etapa de trabajo, 708.30 t/d, es decir 84.996 toneladas solo en tiempo de zafra, tendrán que ser completadas mediante su transportación de otras fábricas de azúcar, es decir, de este total 6.932,05 toneladas serán suministradas por el propio ingenio y 78.063,95 toneladas deberán ser transportadas de otros ingenios solo para la zafra.

Debido a que se tiene planificada operación para todo el año, se requieren mieles totales a transportar de otras unidades de fabricación de azúcar.

Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 7.750 t de caña por día

En este caso la capacidad de molida diaria de la fábrica de azúcar permite asimilar los volúmenes de sustratos fermentables diarios con una pequeña adición de mieles, que representa para el total demandado de 12.613,20 toneladas en zafra que 8.160,93 t son del propio ingenio y 4.452,27 t deben ser transportadas de otros ingenios en tiempo de zafra.

Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 34.083 t de caña por día

En este caso, aunque la capacidad de molida diaria de la fábrica de azúcar es alta y permite asimilar los volúmenes de los sustratos fermentables diarios de la destilería original, la proyección de un incremento de más de dos veces de la capacidad de producción de etanol requiere altos niveles de suministro diario de mieles a la destilería para garantizar los niveles de ampliación de la capacidad previstos para (incrementar) la producción de etanol.

Para garantizar las mieles totales requeridas se tendrá que planificar un complejo plan de

transportación de otras fábricas de azúcar de 83.889,6 toneladas requeridas para el tiempo de zafra, en el ingenio solo estarán disponibles 37.337,77 toneladas, por lo que deberán ser transportadas de otras destilerías 46.552,23 toneladas durante el período de zafra.

Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 39.583 t de caña por día

En este caso, la capacidad de molida es grande y no lo es tanto la capacidad de la destilería, por ello se pueden compensar los volúmenes de los sustratos fermentables, disminuyendo los volúmenes de extracción del jugo de los filtros, cuyo efecto está bien reportado y que permitiría un incremento en la producción de miel en el propio ingenio, evitando transportaciones de otras fábricas, lo que es de interés por lo alejado de este combinado fábrica de azúcar-destilería de otras instalaciones fabriles.

El balance de azúcares reductores totales (ART) y de materiales permite estimar que se logran los resultados requeridos con un 45,33% de extracción de los jugos de los filtros, lo que permitiría obtener 826,77 t/d de mieles durante 120 días de zafra, lo que representaría una producción de mieles de 99.212,41 t, superior a los 16880.40 t que se requieren para la destilería en el tiempo que hay zafra y dejaría un total de 82.332,01 t, a ser empleadas en los días posteriores de la zafra en la destilería.

La alternativa de trabajar con una combinación de sustratos, durante los 120 días de zafra en las destilerías anexas a fábricas de azúcar, implica que siendo los niveles requeridos de miel por día de zafra, de 708,30, 105,11 y 699,08 respectivamente, para las destilerías integradas a fábricas de azúcar de 790.000,00, 930.000,00 y 4.090.000,00 t de caña por zafra, son superiores a las 60,15, 70,83, 311,49 t/d, de los que se disponen, respectivamente, con extracción de los jugos de los filtros y los jugos diluidos para estos niveles de molida; siendo, sin embargo, superior la producción de 826,77 t/d en la fábrica de

azúcar de 4.750.000,00 t de caña por zafra, a las 140,67 t/d que se requieren en la destilería anexa (Tabla 4).

Lo anterior significa un consumo de miel durante la zafra de 198.380,40 t, de ellas 70.191,60 t que se obtienen en las mismas fábricas y 128.188,80 t que deben transportarse desde otras fábricas, incluso durante los días de las zafra, para garantizar la producción de etanol en las destilerías, cuya disponibilidad de mieles no es suficiente para los 120 días de zafra.

En la Tabla 4 se resume la disponibilidad y demanda de mieles por fábrica de azúcar y destilería, incluyendo la destilería independiente.

En adición, para trabajar sólo con mieles otros 35 días, las tres destilerías anexas a fábricas de azúcar que planifican 155 días de producción,

se requieren 121.784,16 t de miel, además otras 155.452,61 t para garantizar que la cuarta destilería planificada para trabajar 300 días al año lo haga con una producción de 2.500 hl/d.

Para la destilería 5 se requieren otras 124.362,07 t al año de miel, lo que eleva la demanda ahora requerida hasta 448.579,81 t.

En la Tabla 4 se exponen las disponibilidades y demandas de mieles por fábrica de azúcar y destilería sin realizar extracciones de los jugos pobres y realizando las extracciones, resalta que la diferencia entre disponibilidad y demanda antes de realizar las extracciones era de 303.948,51 t y se reduce el déficit a 144.045,10 t, lo que implica una reducción del desaprovechamiento de la capacidad instalada de 468.743,32 hl/año, lo que representa la producción durante 300 días de una destilería de 1.562,47 hl/d.

Tabla 4 Disponibilidad y demanda de mieles, antes y después de las extracciones de los jugos diluidos por cada fábrica de azúcar y destilería, en una región determinada

<i>Fábrica de azúcar</i>	<i>Disponibilidad de MF</i>		<i>Destilería</i>	<i>Demanda MF</i>	
	<i>Antes t/año</i>	<i>Después t/año</i>		<i>Antes t/año</i>	<i>Después t/año</i>
A	144.281,25	99.212,41	1	158.626,41	63.146,43
B	124.233,75	37.378,80	2	317.252,80	155.568,75
			2(a)	79.313,14	38.892,19
			2.(b)	237.939,66	116.676,56
C	78.367,50	78.367,50	-	0	0
D	77.152,50	77.152,50	-	0	0
E	46.170,00	46.170,00	-	0	0
F	39.791,25	39.791,25	-	0	0
G	28.248,75	8.499,60	3	63.450,57	27.279,42
H	23.996,25	7.218,00	4	255.848,97	238.791,38
I	19.136,25	19.136,25	-	-	0
J	15.187,50	15.187,50	-	-	0
K	17.472,80	17.472,77			
			5	122.807,56	122.807,56
Total	614.037,80	454.947,80		917.986,31	598.992,90

Vinculación de las mieles entre fábricas de azúcar y destilerías

El problema de transportación de las materias primas (mieles) desde sus orígenes hasta las destilerías es causa de gastos elevados de transportación, debido a los volúmenes a manejar.

La extracción y vinculación de los jugos pobres a las destilerías brinda una ventaja adicional al tener que mover una cantidad inferior de miel desde sus orígenes hasta sus destinos, Tabla 5, con un total de reducción de 110.145,31 t por año y el consiguiente ahorro de transportación.

Por una parte, debido a la carencia de mieles para satisfacer la demanda y, por otro lado, a

las inversiones ya realizadas para incrementar la capacidad instalada en la destilería 2, dos situaciones son factibles de estudiar: a) la vinculación de las mieles hacia toda la capacidad instalada actualmente y b) la vinculación de las mieles solo hacia la capacidad inicial de la destilería 2.

Aquí son varios los problemas específicos con la misma formulación matemática, a saber:

a) *La vinculación de las mieles, con vínculo de los jugos con la capacidad inicial de la destilería 2*

En este caso los resultados que se alcanzan se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5 Resultados de la optimización de la vinculación de las mieles con extracción de los jugos pobres

<i>Fábrica de azúcar /Destilería</i>	<i>Destilería 1 t/año</i>	<i>Destilería 2(a) t/año</i>	<i>Destilería 3 t/año</i>	<i>Destilería 4 t/año</i>	<i>Destilería 5 t/año</i>	<i>Dest. Artificial t/año</i>
A	52.699,26					46.513,15
B					114.139,32	
C				78.367,50		
D				77.152,50		
E		16.783,57		20.718,19	8.668,24	
F			26.940,74	12.850,51		
G				8.160,93		
H				6.932,05		
I				19.136,25		
J				15.187,50		
K				17.918,65		21.325,85
Artificial						

En la Tabla 5 se observa una diferente distribución de la vinculación de las mieles y se observa una menor insuficiencia de mieles a trabajar con menores capacidades de producción.

Es significativo que aquí los costos de transportación se hayan elevado hasta 5.221.556,04 USD al año, lo que significa un

cargo a los costos de producción de etanol de 0.025 USD/ litro de etanol. Esto se produce como resultado del necesario traslado hasta la destilería 4 de mieles bien distantes.

Como se comprende, la misma formulación del problema de optimización, se puede utilizar para resolver al caso del movimiento de las mieles sin

extraer y vincularlo con los jugos secundarios. Estos son dos problemas, con diferentes datos pero la misma formulación. En los valores de los costos de transportación de las mieles son dos factores decisivos, en un caso como en el otro, el valor del equipamiento automotor y del combustible, por lo que una alternativa de interés es producir el combustible para la transportación de las mieles en la propia fábrica de azúcar.

La vinculación de las mieles, con vínculo de los jugos, hacia toda la capacidad instalada actualmente

Los resultados de las condiciones óptimas de transportación se resumen en la Tabla 6.

Aquí los costos de transportación en condiciones de óptima vinculación ascienden a 4.254.337,43 USD/anuales, lo que representa aproximadamente un cargo a los costos de producción de 0,022828 USD/litro de etanol, como se observa la solución que se alcanza contempla un déficit por carencia de mieles para aprovechar plenamente las capacidades instaladas con tiempos de operación de 155 al año de las destilerías asociadas a fábricas de azúcar y 300 días la destilería independiente de 87.888,06 t/año que es inferior al que se presentaba antes del vínculo de los jugos, con un incremento en los costos de transportación.

Tabla 6 Resultados de la vinculación óptima de las mieles con extracción de jugos pobres

<i>Fábrica de azúcar /Destilería</i>	<i>Destilería 1 t/año</i>	<i>Destilería 2(a) t/año</i>	<i>Destilería 2(b) t/año</i>	<i>Destilería 3 t/año</i>	<i>Destilería 4 t/año</i>	<i>Destilería 5 t/año</i>
A	52.699,26					46.513,15
B						37.337,77
C					78.367,50	
D					46.181,57	30.970,93
E			38.184,29			7.985,71
F			21.011,44	18.779,81		
G				8.160,93		
H					6.932,05	
I					19.136,25	
J			15.187,50			
K		28.406,91	10.837,59			
Artificial					87.888,06	

Conclusiones

La extracción de los jugos diluidos de la producción de azúcar de caña, aunque limita la fabricación de azúcar permite, a través de una tecnología adecuadamente asimilada de mezcla de sustratos, minimizar los déficit de

mieles anuales, en relación con la producción planificada e incrementar el aprovechamiento y volumen por instalación de producción de etanol, disminuyendo también los gastos de transportación de mieles y los costos energéticos con un incremento de la disponibilidad del bagazo sobrante por ingenio.

Referencias

1. R. Cruz, E. González. "Alternativas para la combinación de substratos en la fermentación alcohólica en la destilería anexa al CAI 'Melanio Hernández'". *Revista ICIDCA*. Vol. 331. 1999. pp. 8-17.
2. G. Saura, M. Otero; J. Martínez. "Esquema integrado azúcar, alcohol y levadura forrajera a partir de la caña de azúcar". *Revista ICIDCA*. N.º 2. 2005. pp. 35-39.
3. E. González, Y. Cata, J. Pedraza. "Análisis de las variantes de integración material y energética de un combinado para la producción de aditivos oxigenados anexo a una fábrica de azúcar". *Revista Universidad EAFIT*. Vol. 42. 2006. pp. 103-109.
4. M. Borrero, J. Pereira, E. Miranda. "An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazil". *Biomass Bioenergy*. Vol. 25. 2003. pp. 287-299.
5. O. Gozá, H. Pérez, M. Rijckaert. "Use of Simulation and Expert Systems to increase the energy efficiency in cane sugar factories". *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*. Vol. 10. 2002. pp. 165-179.
6. H. Scheffe. "Experiment with mixture". *Journal of Royal Statistical Society*. Vol. 20. 1958. pp. 311-360.
7. L. Galvez. *Handbook of Sugar Cane Derivatives*. 3rd ed. Ed. ICIDCA. Havana, Cuba. 2000. pp. 3-17.
8. F. Hichcock. "The distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities". *Journal Mathematics and Physics*. Vol. 20. 1941. pp. 224-230.
9. S. Flakowski, "Formulating and Solving Exhaustible Resource Models and Mixer Complementarity Problems in GAMS". *Computers in Higher Education Economics Riview (CHEER)*. Vol. 16. 2004. pp. 18-25.
10. L. Wolsey. *Integer Programming*. 1st ed. Ed. John Wiley & Sons. New York, USA. 1998. pp. 91-108.
11. L. Mesa, E. González, C. Cara, E. Ruiz, I. Romero, E. Castro. "Comparison of process configurations for ethanol production from two-step pretreated sugarcane bagasse". *Chemical engineering journal*. Vol. 175. 2011. pp. 185-191.