

Evaluación económica de la utilización de mezclas de sustratos azucarados para la producción de etanol

Economic evaluation of the use of mixtures of sugar substrates for the production of ethanol

Autores: Rebeca Piedad Rivero Fernández¹, Marlen Morales Zamora², Layanis Mesa Garriga^{2*}.

¹ Destilería Sevilla. Empresa de derivados Amancio Rodríguez. Las Tunas. Cuba

² Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química-Farmacología, Universidad Universidad Central “Marta Abreu”, de Las Villas. Cuba

Resumen

Este trabajo propone una tecnología que utilice una mezcla de sustrato en la etapa de fermentación, que permita incrementar la eficiencia económica en la producción de etanol. Para lograr este objetivo general fue necesario hacer un diseño de experimento de enrejado simple, para determinar la mejor mezcla de sustrato en la fermentación que permitiera incrementar los indicadores de producción y, posteriormente, evaluarlo directamente en el proceso productivo. La comparación se realizó con el empleo de un modelo matemático. Económicamente se determinó el gasto de la incorporación de la nueva tecnología en la etapa de fermentación y la utilidad en el proceso de producción de etanol, así como el tiempo de recuperación de la inversión.

Palabras claves: etanol, sustrato, eficiencia.

Abstract

This work proposes a technology that uses a substratum mixture in the fermentation stage that allows the economic efficiency in the ethanol production. To achieve this general objective it was necessary to make a simple grate experiment design to determine the best substratum mixture in the fermentation that allowed to increase the production indicators, and later on to evaluate it directly in the productive process. Economically will be it determined the expense of the incorporation of the new

technology in the fermentation stage and the utility in the ethanol production process, as well as the investment recovery time.

Key words: Ethanol, Substratum, efficiency.

Introducción

En Cuba la producción alcohólica ha tenido altas y bajas, que no han permitido lograr el desarrollo que, como grandes productores cañeros, se hubiesen podido obtener en la industria alcohólica nacional.

A principios de la década del 2000 se introdujo el uso del jugo de los filtros como sustrato adicional a la miel final, de manera que se disminuyera el gasto de miel, atendiendo al valor adquirido en el mercado, donde llegó a alcanzar precios hasta de 60 USD/t, lo que implicaba un alto costo cuando se destinaba a la producción del alcohol.

Últimamente la tecnología más usada mundialmente por los grandes productores como Brasil, México, Perú y en otros países de este continente, se basa en el uso de los jugos de los terceros, cuartos y quintos molinos, además de los filtros. Esta tecnología permite un aumento sustancial en la producción alcohólica y una gran disminución del consumo energético en los centrales azucareros, sin dejar de producir azúcar (se toma el esquema de dos masas para producir azúcar comercial A), al dejar de procesar más del 30 % del agua que debe ser evaporada cuando el jugo se envía a la planta Alcohólica.

Para la fundamentación teórica de esta investigación se recurre a los trabajos de los Ingenieros R. Estévez, W. Carreras (2005) y sus colaboradores, quienes demostraron la factibilidad del uso del jugo, tal como se ha expresado aquí, y también de forma parcial, con el uso solo de jugo de los filtros. Además, los aportes sobre la factibilidad y la eficiencia de esta producción y los bajos consumos de mieles, con la posibilidad de obtener mayores cantidades de bagazo con el que se puede generar la electricidad que, como mínimo, consume la Destilería, abaratando los costos de producción de los alcoholes.

También se asumen los aportes de J. A. Fabelo (1999), quien realiza importantes contribuciones sobre el estudio de la etapa de fermentación alcohólica, utilizando mezclas de diferentes sustratos

y sobre la modelación y optimización de la etapa de fermentación alcohólica, empleando diferentes sistemas de sustratos. Estas consideraciones permiten enriquecer los fundamentos en la investigación del tema que se aborda en el trabajo.

Es conocido que con el uso del jugo de los filtros en la producción azucarera se generan incidencias negativas en el proceso. Por estas razones, si se libera a la misma del jugo de filtros, traerá resultados positivos que llegan a tener expresiones económicas relacionadas con:

-Eliminación o disminución de la transportación de mieles, operación que influye en los costos de producción de alcohol.

-Reducción de sustancias nocivas al proceso de producción de azúcar crudo, tales como, insolubles, polisacáridos, cenizas que entorpecen la evaporación, concentración y cristalización, contribuyendo al aumento de la calidad del azúcar crudo.

-Ahorro de miel para otros usos como: producción de más alcohol en período de no zafra, alimento animal y venta en el Mercado Mundial.

-Ahorro de bagazo en la generación de vapor.

-Ahorro de agua en el proceso de fermentación al sustituirse parte de la misma por jugo.

Es por tanto, que partiendo del interés que existe por las mejoras que ocasiona la extracción del jugo de filtros en el proceso de producción de azúcar, se considere su empleo en la etapa de fermentación del proceso de producción de alcohol, sobre la base del uso de mezclas de diferentes sustratos y con el apoyo de instalaciones flexibles en el proceso de producción.

Sin embargo, a pesar de que se cuenta con los soportes teóricos, metodológicos y tecnológicos, hay bajos indicadores de eficiencia en las mezclas de sustratos actuales en la etapa de fermentación de la Destilería Sevilla, lo cual provoca bajos resultados en la eficiencia industrial y económica. Además, guarda relación con ello el que no siempre se usan

las levaduras adecuadas en los procesos de fermentación de las mieles, cuestión que influye en la eficiencia de ese proceso y en la calidad del producto final en los alcoholes. Asimismo, hay insuficiencias con la calidad de las mieles que se usan para los procesos de fermentación y de destilación.

Esas insuficiencias permitieron observar y plantear el problema científico: ¿cómo elevar los indicadores de eficiencia en las mezclas de sustratos actuales en la etapa de fermentación de la Destilería Sevilla?, que se plantea como objetivo: proponer una tecnología que utiliza una mezcla de sustrato en la etapa de fermentación, que permite incrementar la eficiencia económica en la producción de etanol.

Materiales y métodos

En las experiencias se utilizaron como materias primas o sustratos fermentativos, miel final, el jugo de los filtros y jugo secundario.

En la fermentación se utilizó la levadura *Saccharomyces cerevisiae* Safoenos, utilizada para la elaboración de vinos tintos y blancos, aislada en el laboratorio y con buenos resultados. Los sustratos fermentativos a emplear fueron seleccionados previamente, se les midió 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 las etapas posteriores del experimento.

Las experiencias analizadas responden a un diseño de experimento del tipo enrejado simple (Scheffe; 1958), ya utilizado para estudios similares (Mesa; 2006), el cual explora siete puntos experimentales que corresponden a la preparación de siete medios de cultivo, tres como base y los restantes cuatros son combinaciones de ellos: JS, JS + M, JF +JS, JF + M, JF, M, JS+ M + JF.

Es importante destacar que para el diseño de los puntos intermedios de las diagonales 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 122 g/L de azúcares reductores totales y en los puntos donde no se pudo cumplir esto, como fueron los casos del jugo secundario solo y el de la mezcla de jugo de los filtros y jugo secundario, 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.

Para el estudio experimental, el proceso de fermentación alcohólica se realizó de forma similar al proceso industrial, con la diferencia de no utilizar refrescos para el llenado del fermentador, lo cual se justifica por el pequeño volumen del mismo (cinco litros), y por tanto, la no elevación excesiva de la temperatura, lo que pudiera acarrear la muerte de la población de microorganismos presentes en el proceso fermentativo.

El prefermento utilizado fue el mismo que se adiciona a los fermentadores en la fábrica, y compuesto por miel y agua, con un Brix de 12°Bx y sus respectivos $\{21\% \text{N}_2, 52\% \text{P}_2\text{O}_5\}$, fosfato de amonio $\{21\% \text{N}_2\}$, y ácido sulfúrico, para disminuir PH y evitar la contaminación microbiana.

Para realizar las determinaciones analíticas se usaron las Normas cubanas y los MACUS de azúcar y alcohol.

El brix a los fermentadores, a escala de laboratorio, se le determinó cada 2 horas y se determinó % alcohólico y residuales. Los resultados obtenidos están en correspondencia con trabajos realizados anteriormente, o sea, un descenso de brix hasta 0 en el caso del jugo de los filtros y el jugo secundario, lo cual se debe al consumo de sustrato que se produce por parte de las levaduras, la temperatura sufre un ligero incremento por las propias características del proceso, en que la levadura toma la energía de los azúcares presentes y posteriormente la libera en forma de calor (calor biológico).

Se puede apreciar la disminución significativa que tienen los azúcares reductores totales, lo cual coincide con resultados tradicionales, debido al consumo de estos durante el proceso fermentativo y su transformación en etanol. El grado alcohólico obtenido se encuentra dentro de los valores que se reportan en la literatura consultada (Fabelo; 1998). Este parámetro estuvo entre 5 y 5,9.

Resultados y discusión

Tabla 1. Resultados de la caracterización de los sustratos utilizados en la fermentación. Los sustratos utilizados fueron caracterizados individualmente

Análisis	Miel final	JF	JS
Azúcares Reductores g/l	571.16	122	81.0
PH	5.60	5.50	5.30
Brix (°BX)	83.84	14.50	10.62
Pol %	44.21	11.10	8.84

M Miel
 JS + M Jugo Secundario + Miel
 JF + JS Jugo filtro + Jugo Secundario
 JF + M Jugo filtro + Miel
 JS+ M + JF Jugo Secundario + Miel + Jugo filtro

Los resultados estimados con el modelo y los experimentales coinciden en todos los casos, no superando una diferencia de 0.51.

Se desarrollaron modelos de la mezcla ternaria para el análisis del rendimiento y de la eficiencia en la fermentación, como variables independientes se tomaron los porcentajes de ART que aportaban los sustratos: jugo de los filtros, secundario, miel

Acorde con el diseño experimental utilizado se realizaron los experimentos cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

y los azúcares reductores iniciales. Para el procesamiento de los resultados se utilizó lo propuesto para un modelo de mezclas (González; E; 2003).

Tabla 2. Resultados de cada corrida experimental considerada en el diseño

Los resultados obtenidos se procesaron estadísticamente, obteniéndose los modelos siguientes:

$$\% Alc. = 5.86X_1 + 5.3X_2 + 4.81X_3 + 0.88X_1X_2 + 0.86X_1X_3 - 0.62X_2X_3$$

Corrida	ART Inicial g/l	ART final	% Alcohol	Rendimiento	Eficiencia
JS	122	11.09	4.81	41.31	64.54
JS + M	122	4.89	5.55	45.71	71.43
JF + JS	122	4.87	4.90	42.44	66.32
JF + M	122	9.55	5.80	55.77	86.61
JF	122	10.90	5.30	46.31	72.36
M	122	9.81	5.86	51.14	79.91
JS+ M+JF	122	8.13	5.90	56.22	87.31

Leyenda

ART Azúcar reductores totales

JS Jugo Secundario

JF Jugo filtro

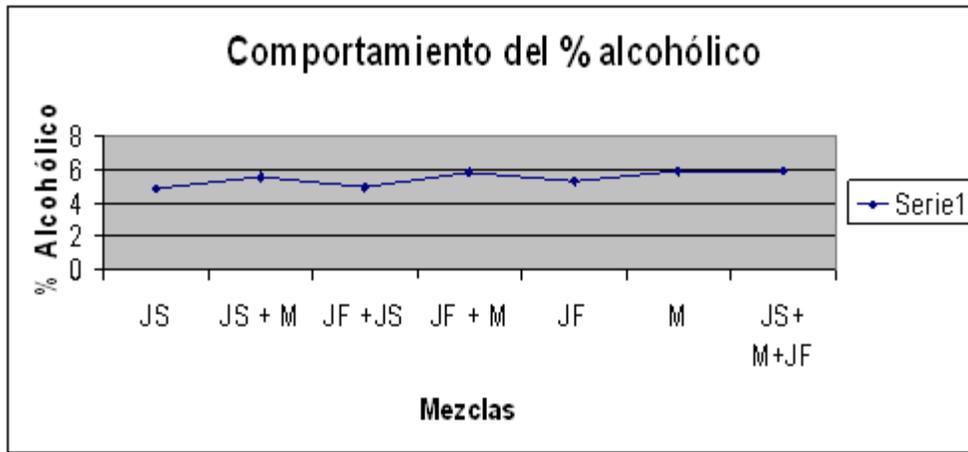


Fig. 1. Comportamiento del % alcohólico de cada una de las mezclas utilizadas en el estudio.

Resultados estadísticos del experimento.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de experimento de enrejado simple y comparado con el modelo matemático, se puede inferir que la mejor mezcla es jugo de los filtros más miel mas jugo secundario, seguida por la mezcla de miel más jugo de los filtros. Le sigue el jugo secundario más miel, que aunque su porcentaje alcohólico no es tan alto como se refleja en la tabla, puede ser usado en dependencia de la calidad de las materias primas que se usen. Por último y la menos aceptada es jugo de los filtros más jugo secundario, que no aporta alto porcentaje alcohólico, pero puede ser usado para licuar las mieles y así ahorrar agua en la fábrica de alcohol.

Evaluación económica financiera.

Una vez seleccionados los equipos fundamentales de la planta, se efectuó el análisis económico de la misma, sobre la base del cálculo del costo de inversión, el costo de producción, la ganancia y los indicadores de rentabilidad.

El estimado de los indicadores se obtuvo aplicando la metodología planteada por Peters (Peters, M., 1991).

Tabla 3. Presupuesto considerado para la inversión

No	Conceptos	U/M	Valor
1	Equipos y Maquinarias	\$	201076.16
2	Construcción y Montaje	\$	191013.92
3	Otros	\$	16622.18
4	Total	\$	408712.26

Costos de inversión.

El costo de la inversión se ha obtenido a partir del proyecto elaborado por IPROYAZ de Santiago de Cuba para la utilización de los jugos de los filtros en la destilería Amancio Rodríguez.

Pronósticos de producción.

Para pronosticar la producción se tuvo en cuenta el jugo de los filtros disponible para la producción de alcohol en el periodo de zafra, así como la producción de crema de levadura *Sacharomyces*. Se tuvo presente que a su vez disminuirá la producción de azúcar por este concepto.

Tabla 4. Resultados tecnológicos obtenidos

No	Parámetro	U/M	Valor
1	Tiempo de operación	Días	120
2	Jugo total	Tm/año	103560.0
3	Índice de consumo de jugo/ hl de alcohol	Tm/hl	2.1
4	Azúcar dejada de producir	Tm/año	8520.0
5	Producción de alcohol	Hl/año	49318.28
6	Producción de crema sacharomices	Tm/año	1800.0

Para analizar la conveniencia de esta inversión se comparó lo que significa la exportación de azúcar y alcohol.

El azúcar dejada de producir con un precio de 0.18 USD en el mercado

internacional tiene un valor de 3343248.0 USD y el alcohol a producir con un precio de 0.75 USD tiene un valor de 3698871 USD lo que representa un incremento de los ingresos al país de 355623.0 de dólares por este concepto, lo que demuestra una

factibilidad preliminar para acometer esta inversión.

Costos de producción.

Para el análisis de los costos se utiliza la ficha de costo elaborada para la producción con jugo de los filtros. En la tabla 5 se representa la ficha de costo.

No	Elementos	U/M	Total
1	Costos Variables	\$	1770526.23
2	Costos Fijos	\$	450212.93
3	Costo total de producción	\$	2220739.16

Tabla 5. Costos de producción.

No	Parámetro	U/M	Valor
1	Precio Alcohol	\$/Lts	0.56
2	Precio crema Sacharomyces	\$/Tm	97.0
3	Producción de alcohol	Lts	49318.28
4	Producción de crema Sacharomyces	Tm	1800.0
5	Ingresos alcohol	\$	2761823.68
6	Ingresos crema Sacharomyces	\$	174600.0
7	Ingresos totales	\$	2936423.68
8	Costo total de producción	\$	2220739.16
8	Utilidad bruta	\$	715684.52

Tabla 6. Ingresos obtenidos.

Indicadores de rentabilidad. VAN, TIR, PRD.
 Los resultados obtenidos se determinaron por un programa realizado en Excel, donde se evaluaron los indicadores económicos mediante la metodología planteada por Peters (Peters M, 1991) y se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de la evaluación.

Parámetros	U/M	Valor
Tasa interna de retomo(TIR)	%	48
Valor Actual Neto(VAN)	MP	2044.89
Periodo de Recuperación(PR)	años	1

Esto demuestra que es factible la ejecución de este trabajo ya que el VAN es mayor que cero, la TIR es mayor que la tasa de actualización escogida del 15 % y la inversión se recupera en un año.

Conclusiones

1. Los mejores resultados fueron obtenidos en las combinaciones donde siempre estuvo presente el jugo de los filtros, lo que indica que influye favorablemente en la fermentación, siendo muy promisorio su uso como sustrato en la fermentación alcohólica.
2. El jugo secundario, aunque no presenta altos contenidos de ART ni una óptima calidad, puede ser utilizado también en el proceso, si se le combina con miel o con miel y jugos de los filtros.
3. Los modelos desarrollados a partir de estos resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, son útiles para aplicaciones futuras a escala industrial.
4. La ejecución de esta inversión es factible ya que el VAN es positivo, y la TIR es mayor que la tasa de actualización escogida del 15 %.
5. La inversión puede ser recuperada en un año.

Bibliografía

1. Estévez, R y Carreras, W: Apuntes Jugos de los Filtros. En soporte digital. La Habana. 2005.
2. 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.

3. González, E. (Editor). Análisis de Procesos en la industria de pulpa y papel considerando la incertidumbre. Edición. CYTED. Argentina 2003. pp 165. ISBN 950-9898-04-X.

4. Mesa Garriga L., González Suárez E., González Cortés M., Agüero Chapin G., Benítez Pardillo T. Estudio preliminar del mezclado de los sustratos: jugos de los filtros, jugos secundarios y miel en la producción de etanol. Centro Azúcar. 2006, Vol. 33. No. 4. p. 37-42. Santa Clara. Cuba. ISSN: 0253-5777.

5. Scheffe, H. Experiment witch mixture., Journal of Royal Statiscal Sociaty. Vol.20.311. 360
 Peters., M. S. K. D., Timmerhaus. Plant Design and Economics for

Chemical Engineers, McGraw-Hill International Editions, Fourt