

Análisis de alternativas para la rehabilitación de la destilería “Héctor Molina”

Daniela Cosme-Díaz¹, Lourdes Zumalacárregui-de-Cárdenas^{1*}, Osney Pérez-Ones¹, Indira Pérez-Bermúdez²

1. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

* lourdes@quimica.cujae.edu.cu

2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).

Via Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

RESUMEN

Se proponen tres alternativas para aumentar la producción de etanol en la destilería Héctor Molina. En la primera se utiliza jugo de los filtros como principal materia prima en el tiempo de no zafra, con un sistema de enfriamiento en fermentación y dos nuevas columnas de destilación. En la segunda se incluye un turbogenerador y en la tercera se adiciona una torre de enfriamiento en destilación. Además, se presentan otras cuatro alternativas para el tratamiento de las vinazas: una planta de biogás, una planta de torula y los procesos de concentración e incineración y concentración y desalinización. Las alternativas son económicamente factibles, pero considerando el impacto medioambiental se seleccionó la alternativa que incluye todos los cambios tecnológicos evaluados y la concentración e incineración para el tratamiento de las vinazas. Con esta alternativa se obtuvo un VAN de \$ 1 946 364,72, una TIR de 21,74 % y un RVAN de 0,22 \$/\$.

Palabras clave: etanol, materias primas, evaluación económica.

ABSTRACT

Three alternatives are proposed to increase the ethanol production of the distillery Hector Molina using juice from the filters as the main raw material in the non-harvest time, implementing a cooling system in fermentation and installing two new distillation columns. In the second alternative, a turbogenerator is included, while in the third, a cooling tower is added in the distillation step. In addition, four other alternatives for the treatment of vinasses are presented, such as a biogas plant, a torula plant, and concentration and incineration and concentration and desalination processes. All the alternatives are economically feasible. Taking into account the environmental impact, the alternative including the technological changes proposed, with the concentration and incineration for the treatment of vinasse is selected. With this alternative, a NPV of \$ 1 946 364.72, an IRR of 21.74 % are obtained and a RVAN of 0.22 \$/\$.

Key words: ethanol, raw material, economical assessment.

INTRODUCCIÓN

Para la obtención de etanol se pueden emplear tres tipos fundamentales de materias primas: materiales celulósicos (residuos agrícolas, maderas); materiales con alto contenido de almidón (maíz, trigo, yuca) y materiales con alto contenido de azúcar (caña de azúcar y remolacha). En Cuba, se utilizan como materias primas en la producción de etanol los materiales con alto contenido de azúcar, fundamentalmente la miel final (1).

Las mieles finales rinden aproximadamente el 2,5 y 3 % de la caña molida y se acerca al 25 % de la sacarosa producida. La composición de las mieles no es uniforme, y está influenciada por diferentes factores como: tipo de suelo, aplicación de fertilizantes, métodos de cosecha, y las especificidades propias del proceso en cada fábrica (2).

Actualmente el uso de los jugos en la producción de etanol constituye una práctica actual de los grandes productores del alcohol, entre los que se destaca Brasil (3). En la destilería “Heriberto Duquesne”

en Villa Clara, durante el final de zafra del 2005, se adaptó la mitad de la sala de fermentación para el trabajo con jugos y miel y la otra mitad solo con mieles. Quedaron demostradas las bondades del jugo como material para la producción de etanol, además de los otros beneficios que, en calidad de azúcar, sobrante de bagazo, calidad de mieles, sobrante de vapor y ahorros de agua, se lograron (4-5).

La industria alcoholera genera altos volúmenes de vinazas que resultan perjudiciales al medio ambiente. La corriente de vinazas es un efluente con un alto poder contaminante que requiere de un tratamiento previo antes de su vertido (6). En el mundo existen diferentes tipos de tratamientos y entre los más utilizados se encuentran: la producción de levadura torula, de biogás, de compost, concentración para la formulación de piensos, como fertilizante, entre otros. En los países productores de azúcar donde se destilan las mieles, los efluentes pueden ser una valiosa fuente de energía, abono o alimento para el productor de alcohol etílico (7). Su alto contenido en agua, sales, materias orgánicas, proteínas y levaduras permite valorar diferentes alternativas de aprovechamiento y a su vez tratamiento del residual.

El Grupo Empresarial Azcuba se encuentra inmerso en el programa de rehabilitación y modernización de la industria alcoholera. Este programa persigue el empleo de jugos en la producción de etanol, así como lograr el incremento de la eficiencia de fermentación y el rendimiento alcohólico en las destilerías de Cuba. Las destilerías cubanas se caracterizan por tener bajas eficiencias de fermentación (75 % - 78 %) y grado alcohólico (4,5 % - 5,5 % v/v) en fermentación (8), si se comparan con los valores que se reportan internacionalmente, que son superiores a 90 % y 8 % v/v, respectivamente (9).

En el programa alcoholero del Grupo Empresarial Azcuba se prevé realizar un proceso inversionista para la ampliación de capacidad de la destilería "Héctor Molina", la que tiene una capacidad de producción de 450 hl/d y cuenta con un central azucareño anexo con una molienda potencial de 4 800 t/d y 150 días de zafra. El tiempo de operación de la destilería es de 188 días lo que representa 84 600 hl/año. Para este aumento de capacidad se trasladará de la destilería "Melanio Hernández", un módulo adicional de destilación comprendido por dos columnas de destilación y equipos de trasiego de corrientes intermedias. Además, se importará el equipamiento necesario para el bombeo de la miel y los jugos, el enfriamiento y acondicionamiento del jugo, así como el enfriamiento en los fermentadores. Esta alternativa, así como el empleo de mezclas de jugo de los filtros y secundarios con miel para producir etanol se evaluaron recientemente resultando económicamente atractivas a la vez que permite mejorar la calidad del azúcar producido (10).

El siguiente trabajo está enfocado al análisis de alternativas para la rehabilitación de la destilería. Se analizaron siete alternativas para producir etanol a partir de materias primas combinadas con el objetivo de obtener mejoras económicas, productivas y ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de los cálculos se utilizó un simulador en Microsoft Excel, conocido como SIDEL, desarrollado en el ICIDCA, en el que se ejecutaron los balances de masa y energía asociados a la producción de etanol. Para la comparación de las alternativas se utilizó un caso base, correspondiente al esquema de producción actual de la destilería.

Caso base: Esquema actual de producción en la destilería "Héctor Molina"

En la tabla 1 se muestran las condiciones de operación según el esquema actual de la fábrica (11). Se emplea como materia prima el 100 % de miel B para producir 450 hl/d de etanol durante 150 días.

Alternativas propuestas

Se evaluaron siete alternativas para la producción de etanol, tres teniendo en cuenta modificaciones en la base tecnológica de la fábrica y el empleo de miel B y jugo de los filtros y cuatro que incorporan variantes para el tratamiento de las vinazas producidas.

Alternativa 1: Aumento de la capacidad de producción de la destilería a 700 hl/d, utilizando jugo de los filtros como principal materia prima en el tiempo de zafra y almacenándose la miel B sobrante para el resto de los días de operación. Se implementa un sistema de enfriamiento en fermentación, con el objetivo de elevar el grado alcohólico en la batición (4). Además, se realizan las inversiones correspondientes para la adquisición de dos nuevas columnas, una destiladora con rehervidor y una rectificadora, las cuales sustituirán las existentes actualmente.

Alternativa 2: Se mantienen los cambios realizados en la alternativa 1 y se incorpora un turbogenerador con el objetivo del autoabastecimiento eléctrico de la destilería.

Alternativa 3: Se agrega a las modificaciones de la alternativa 2 una torre de enfriamiento en el área de destilación con el objetivo de disminuir el consumo de agua en la destilería, debido a que actualmente el agua se extrae de un pozo, y al no existir un sistema cerrado de enfriamiento no se recircula dicha agua.

Tabla 1. Datos de entrada para la solución del caso base

Capacidad del central (t/d)	4 800	Grado alcohólico de la batición (°GL)	5
Capacidad de destilería (l/d)	45 000	Grado alcohólico final (°GL)	95
Tiempo fermentación (h)	18	Pérdidas en fondaje (%)	0,5
Tiempo pre-fermentación (h)	12	Eficiencia de fermentación (%)	78,15
Volumen útil fermentador (m ³)	130	Eficiencia de destilación (%)	95,0
Volumen útil pre-fermentador (m ³)	23	DQO vinazas (kg/m ³)	47,88
Número de fermentadores	10	DBO vinazas (kg/m ³)	23,94
Número de pre-fermentadores	3	Presión de trabajo (kPa)	135,7
°Brix en pre-fermentador	12	Extracción de cabezas (%)	8
°Brix de la miel	83	Extracción de fusel (%)	7
°Brix final fermentación	3	Relación de reflujo	1,6
°Brix vinazas	7	Viscosidad del vino (mPas)	0,982
Azúcares fermentables totales (AFT) en miel	58	Índice de consumo de miel 52 % AFT (kg/l)	3,8
Sólidos insolubles (%)	1,5	Sólidos insolubles miel (%)	5,0
Grado alcohólico en el tope (°GL)	60	Diferencia de temperatura del agua (°C)	13
Temperatura entrada a columna (°C)	67	Temperatura final de fermentación (°C)	36

Alternativa 4: Se mantienen las modificaciones de la alternativa 3 y se incorpora un sistema de tratamiento de vinazas por digestión anaerobia.

Alternativa 5: Se mantienen las modificaciones de la alternativa 3 y se incorpora una planta de producción de levadura torula a partir de las vinazas.

Alternativa 6: Se mantienen las modificaciones de la alternativa 3 y se incorpora como tratamiento la concentración e incineración de vinazas.

Alternativa 7: Se mantienen las modificaciones de la alternativa 3 y se incorpora como tratamiento la concentración y desalinización de vinazas.

Los indicadores que se utilizaron para la comparación de las tres alternativas en que se realizan modificaciones tecnológicas son: flujo de miel (m³/hl); flujo de jugo (m³/hl); flujo de vinazas (m³/hl); flujo de agua de dilución de mieles (kg/h); consumo de agua en la destilería (m³/hl) y generación de CO₂ en la fermentación (kg/h).

Para la evaluación económica de las alternativas se estableció el cálculo fundamentado en el método del flujo de caja, evaluando las diferencias entre cada alternativa y el caso base. Como se realizó un análisis de modificación, sólo se tienen en cuenta los cambios que cada alternativa determina en cada uno de los elementos del flujo de efectivo con respecto al caso base. Por lo anterior, se trabajó con las diferencias y no se tomó en cuenta lo que se relaciona con la tecnología o equipamiento anterior. Se tuvieron en cuenta como consideraciones: una tasa impositiva de 35 %, una tasa de interés de 12 %, un tiempo de vida útil de la planta de 20 años y un horizonte de planeación de 5 años.

Para el cálculo del costo de inversión total, la inversión industrial se concibió sólo para el aumento

de capacidad de la destilería de 450 hl/d a 700 hl/d y está referida a los gastos de la adquisición del equipamiento necesario para el traslado, almacenamiento y enfriamiento del jugo de los filtros, la reposición del módulo de destilación-rectificación, el sistema de enfriamiento en fermentación y destilación, así como otros equipos auxiliares necesarios en el proceso. Para las alternativas 4, 5, 6 y 7 se suma al costo de inversión de la alternativa 3, los correspondientes a los sistemas de tratamiento de vinazas.

Para el cálculo de los ingresos y egresos se utilizaron los precios y costos del año 2017 reportados por el grupo Azcuba (11), que se muestran en la tabla 2, para cada una de las variantes según corresponda.

Tabla 2. Precios y costos utilizados

Producto	Valor
Precio de comercialización del etanol (\$/hl)	361,46
Precio de la miel B (\$/t)	31,90
Precio del jugo de los filtros (\$/m ³)	87,00
Precio del agua (\$/m ³)	0,25
Costo producción de la electricidad generada (\$/kW.h)	0,09
Precio del petróleo (\$/t)	264,90

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del caso base. Esquema actual de producción de la destilería “Héctor Molina”

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3. Se obtuvo un alto flujo de vinazas (34 932 kg/h),

Tabla 3. Indicadores técnicos obtenidos en el caso base

Indicadores	Valor
Flujo de miel (kg/h)	7 200
Flujo de vinazas (kg/h)	34 932
Flujo de agua de dilución de mieles (m ³ /h)	24,05
Flujo de vapor en la columna destiladora (kg/h)	6 098,44
Consumo de agua en la destilería (m ³ /hl)	6,05
Generación de CO ₂ en fermentación (kg/h)	1 424,2

lo que representa un índice de generación de vinazas de 18,83 l vinaza/l etanol. El incremento de este indicador muestra su origen en los aspectos fermentativos, o sea, en el bajo grado alcohólico que implica mayor consumo de vapor y por tanto mayor volumen de vinazas, con el consiguiente impacto ambiental negativo por su alto flujo, elevada carga orgánica (47,88 kg/m³) y alta temperatura (12). Este residual tan contaminante y otros que se derivan de este proceso como el agua de lavado de los fermentadores, agua de enfriamiento de los condensadores, agua de limpieza de los equipos, etc. se descargan a una zanja que conduce al mar. Desde el punto de vista medio ambiental esto tiene un impacto negativo pues afecta directamente al ecosistema. Por esta razón se requiere buscar una alternativa de tratamiento que permita reducir el nivel contaminante de este residual.

El alto consumo específico de agua en la destilería de 6,05 m³/hl, está dado entre otros factores por un alto consumo de agua de enfriamiento en destilación de 3,6 m³/hl, el cual está condicionado por la no existencia de un sistema cerrado de enfriamiento, que permita recircular el agua utilizada.

La generación de CO₂ es de 1 424,2 kg/h en el proceso de fermentación que, al no recuperarse en esta destilería, se considera este producto un residual de la fabricación de etanol y reconocido como un contaminante del medio ambiente. En este caso, el impacto ambiental negativo que ocasiona su generación se equilibra mediante el balance de CO₂ en la agricultura cañera al participar en la fotosíntesis de la planta. Se plantea que se obtienen 0,956 kg de

CO₂ por kg de etanol producido (13) el que utiliza la planta en la fotosíntesis para su crecimiento y formación de azúcares; por lo que en este caso el balance neto de la producción de etanol resulta beneficioso para el medio ambiente en términos de CO₂ y O₂ pues retira mayor cantidad de CO₂ de la que incorpora y a la vez restituye O₂.

Análisis de las alternativas que no incluyen tratamiento de vinazas

En la tabla 4 se presentan los indicadores técnicos para las tres alternativas analizadas que no conllevan tratamiento de vinazas.

La utilización de materias primas combinadas (jugo de los filtros y miel) permite que la destilería opere 67 días adicionales debido a la miel B sobrante. Al incorporarse el jugo de los filtros en el proceso fermentativo, como es una corriente rica en azúcares se reduce el consumo de miel B ya que solamente se utiliza como complemento nutricional para el crecimiento de la levadura en los procesos de propagación y prefermentación.

En estas alternativas se contempla que al aumentar la capacidad de la destilería desde 450 hasta 700 hl/d, aumenta tanto el consumo de vapor en la columna destiladora desde 6 098,44 kg/h hasta 8 911,93 kg/h, así como la generación de CO₂, lo que representa un efecto indeseable, debido al impacto de su emisión para el medio ambiente.

La incorporación del turbogenerador en la alternativa 2 permite la producción de una potencia eléctrica de 0,68 MW. Al incorporarse el turbogenerador al área de generación de vapor los indicadores a analizar no se modifican en relación con la alternativa 1, debido a que dicha incorporación solo influye en el autoabastecimiento de la destilería, lo que repercute en la disminución del costo de producción.

Al sustituir la columna destiladora, incorporando una nueva con rehervidor, disminuye el flujo de vinazas en un 22 %, con un índice de generación de vinazas de 9,52 l vinaza/l etanol para las tres alternativas. Al generador de vapor se recirculan los condensados obtenidos a la salida del rehervidor de fondo de la columna destiladora por ser lo suficientemente puros, con lo que disminuye el consu-

Tabla 4. Indicadores técnicos para las alternativas sin tratamiento de vinazas

Indicadores	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Flujo de jugo (m ³ /h)	27,30	27,30	27,30
Flujo de miel (m ³ /h)	2,00	2,00	2,00
Flujo de vinazas (kg/h)	27 443	27 443	27 443
Flujo de agua de dilución de mieles (m ³ /h)	2,00	2,00	2,00
Flujo de vapor en la columna destiladora (kg/h)	8 911,93	8 911,93	8 911,93
Consumo de agua en la destilería/hl de etanol (m ³ /hl)	4,20	4,20	0,13
Generación de CO ₂ en fermentación (kg/h)	2 206,00	2 206,00	2 206,00

mo de agua tratada de alimentación a la caldera en un 30,5 % para las alternativas 1 y 2.

La incorporación del sistema de enfriamiento cerrado en la alternativa 3, con la instalación de una torre de enfriamiento de una capacidad de 80 m³ y considerando que el agua de reposición es del 3 %, reduce el índice de consumo de agua desde 4,2 m³/hl hasta 0,13 m³/hl. Esta disminución repercute en el costo de producción.

Análisis de las alternativas que incluyen tratamiento de vinazas

Como se presentó en el caso base, la destilería tiene un alto índice de generación de vinazas por lo que es necesario encontrar una solución ambiental para dichos residuales.

Alternativa 4: Configuración de la alternativa 3 con tratamiento de vinazas por digestión anaerobia

En esta alternativa se realiza el tratamiento del residual mediante la digestión anaerobia en un reactor anaerobio de cama de lodos, más conocido por sus siglas en inglés como UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), obteniendo como efluentes biogás, lodo y un residual líquido o vinazas tratadas.

El biogás que se obtiene es un combustible en forma de gas rico en metano, que se almacena en el gasómetro (o comprimido y almacenado en un tanque a presión) y se emplea como gas doméstico, como combustible para la caldera y para la generación de electricidad (14-15).

En la tabla 5 se muestran los resultados de los efluentes de la digestión anaerobia.

Tabla 5. Resultados de los efluentes obtenidos del reactor UASB

Producto final	Cantidad
Biogás (m ³ CH ₄ /d)	21 912
Lodo (m ³ /d)	6,75
Efluente líquido (m ³ /d)	973,2
DQO del efluente líquido (kg/m ³)	19,16

Con la digestión anaerobia se logra tratar las vinazas disminuyendo la carga orgánica (DQO) en un 60 % con respecto a la DQO del residual obtenido en la destilería (47,88 kg/m³). No obstante, este valor requiere de un pos-tratamiento al efluente líquido a la salida del reactor para disminuir la carga orgánica contaminante.

Alternativa 5: Configuración de la alternativa 3 con obtención de levadura torula

En Cuba, la producción de levadura forrajera, a partir de vinazas, resulta particularmente atractiva, sobre todo si se tiene en cuenta la imposibilidad de

contar con proteínas vegetales de bajo costo, tales como la soja.

En este sentido, la estrategia trazada por el grupo empresarial Azcuba es el uso de las vinazas como materias primas en esta producción. Esta estrategia está encaminada a no solo disminuir el valor contaminante de las vinazas sino a aumentar su valor agregado (14).

Los principales resultados de la aplicación de este tratamiento a la vinaza se pueden observar en la tabla 6. Teniendo en cuenta que la producción de levadura sería de 13 t/d se puede instalar una fábrica de levadura torula con capacidad para 15 t/d.

Tabla 6. Resultados de la obtención de levadura torula

Producto final	Cantidad
Producción de levadura torula (t/d)	13
Residuales de torula generados (t/d)	1 893

Alternativa 6: Configuración de la alternativa 3 con concentración e incineración de vinazas

Otra posibilidad que tiene la destilería para el tratamiento de los residuales es la concentración e incineración de las vinazas. Las sales obtenidas en el proceso de incineración de las vinazas, ricas en potasio, se pueden almacenar para ser utilizadas como fertilizante en la agricultura cañera. Además, la energía del vapor que se genera en la etapa de concentración, se convierte en electricidad luego de que se alimente a un turbogenerador. La electricidad se puede utilizar para satisfacer la demanda de la fábrica y el resto venderla a la red nacional (16).

En este caso de tratamiento de las vinazas el sistema consta de las etapas de evaporación, incineración y generación de electricidad. Las vinazas se concentran desde 7 °Bx hasta 60 °Bx, obteniendo 112,62 t/d de vinazas concentradas que se utilizarán como combustible en la caldera generándose de 10-12 t/h de vapor. Este vapor pasa a un turbogenerador produciendo 1 490 kW.h de electricidad.

El vapor del último efecto de flujo 300,84 t/d y temperatura 107 °C se usa para alimentar el fondo de la columna de destilación, la que consume 281,74 t/d obteniéndose un ahorro de petróleo. El resto del vapor se empleará en la destilería para la esterilización, la limpieza del área de fermentación u otros usos.

Las sales obtenidas en el proceso de incineración de las vinazas, ricas en potasio, 17,63 t/d, se almacenarán para ser utilizadas como fertilizante en la agricultura cañera.

La concentración y combustión de las vinazas de destilerías es una tecnología limpia ya que se logra un aprovechamiento integral de este efluente y no

se obtienen residuales. En la tabla 7 se resumen los resultados principales.

Tabla 7. Resultados del proceso de concentración e incineración de vinazas

Producto final	Cantidad
Vinazas concentradas (t/d)	112,62
Vapor (t/d)	10-12
Electricidad (kW.h)	1 490
Sales ricas en potasio (t/d)	17,63

Tabla 8. Cantidad de sales y efluente líquido del proceso de desalinización de vinazas

Producto final	Cantidad
Alimento animal (t/d)	155,04
Sales (t/d)	20,88

Alternativa 7: Configuración de la alternativa 3 con concentración y desalinización de vinazas

El análisis de la desalinización de vinazas se realiza con el objetivo de implementar un tratamiento a este residual, además por los beneficios económicos que se obtendrían por la comercialización de las corrientes finales del proceso. En este caso se obtuvo el flujo de los dos productos finales, tanto el efluente líquido para su uso como alimento animal como las sales para utilizarlas como fertilizantes. Los valores determinados en esta alternativa para su evaluación se muestran en la tabla 8.

Costos de inversión y ganancias brutas para cada alternativa

En la tabla 9 se presentan los costos de inversión requeridos para cada alternativa, así como las ganancias brutas que se obtendrían.

Indicadores económicos seleccionados para la evaluación

Para el análisis de la inversión se obtuvieron los indicadores de rentabilidad: valor actualizado neto (VAN), tasa interna de rendimiento (TIR), período de recuperación de la inversión con descuento (PRI) y relación VAN/Inversión (RVAN), que se presentan en la tabla 10.

En la tabla 10 se observa que las alternativas son factibles económicamente, obteniéndose los mayores beneficios en la alternativa 5 al tener el mayor VAN. En todos los casos la TIR presenta valores

Tabla 9. Costos de inversión y ganancias brutas

Alternativa	Costo de inversión total (\$)	Ganancia bruta (\$)
Caso base	-	5 816 059
1	4 102 726	8 168 006
2	5 671 822	8 498 392
3	5 927 062	8 498 392
4	7 251 026	9 223 322
5	25 095 786	17 710 319
6	8 683 009	10 228 990
7	7 980 957	9 866 805

por encima de la tasa de interés (12 %) y la inversión se recupera en un tiempo inferior a cinco años, demostrando liquidez. El criterio del RVAN establece el orden de prioridad de implementación. La mejor

Tabla 10. Indicadores económicos

Alternativa	VAN (\$)	TIR (%)	PRI (años)	RVAN (\$/\$)
1	1 460 216,09	27,08	3,87	0,36
2	861 764,57	18,70	4,81	0,15
3	646 810,38	16,85	4,90	0,11
4	1 048 379,21	18,38	4,84	0,14
5	3 775 471,37	18,61	4,80	0,15
6	1 946 364,72	21,74	3,49	0,22
7	1 779 896,37	21,70	3,50	0,21

alternativa es la alternativa 1 pues es la que posee mayor RVAN, pero esta no presenta una propuesta para el tratamiento de vinazas. Sin embargo, la alternativa 6 es la segunda en RVAN e incluye el tratamiento de las vinazas, resultando una alternativa más integradora.

CONCLUSIONES

1. De la caracterización del caso base se concluye que existe un alto índice de generación de vinazas de 18,83 l vinaza/l etanol y un alto consumo específico de agua en la destilería de 6,05 m³/hl fundamentalmente por un alto consumo de agua de enfriamiento en destilación de 3,6 m³/hl.
2. La implantación del esquema de producción donde los jugos de los filtros se emplean para la producción de etanol trae beneficios económicos debido a que se opera durante más días con materias primas propias, aumentando la producción de etanol.
3. Según el análisis económico preliminar todas las alternativas son factibles técnica y econó-

micamente, pero teniendo en cuenta el impacto medioambiental se seleccionó la alternativa 6, la cual además de los cambios tecnológicos realizados propone la concentración e incineración para

el tratamiento de las vinazas. Con esta alternativa se obtuvo un VAN de \$ 1 946 364,72, una TIR de 21,74 % y un RVAN de 0,22 \$/\$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abril, A. Etanol a partir de biomasa lignocelulósica. Monografía, 2010.
2. Alves, D. Respostas fisiológicas de duas linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* frente ao potássio durante a fermentação alcoólica. Tesis de Doctorado. Instituto de Biociências/UNESP, Río Claro. 2000.
3. Otero, M.; García, R.; Saura, G. Producción de bioetanol a partir de mezclas de jugos-melazas de caña de azúcar. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. 2009.
4. Estévez, R.; Saura, G.; Martínez, J. Informe de la evaluación de la extracción de jugo de los filtros y secundarios en el comportamiento de la fábrica de azúcar "Heriberto Duquesne". Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. 2005.
5. Estévez, R. Un aniversario importante de la Industria de los derivados, Notietanol. Enero. 2014.
6. Alonso, D.; Garrido, N.; Pérez, O.; Zumalacárregui, L. Alternativas tecnológicas para reducir el volumen de las vinazas de la industria alcoholera y su tratamiento. Revista Centro Azúcar, 43(1), 70-79, enero-marzo, 2016.
7. Camacho, L. Precipitación de potasio en vinazas resultantes de la producción de etanol con mieles finales de caña de azúcar Tesis de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". 2016.
8. Saura, G.; Domenech, F. Desarrollo del programa integrado de producción de alcohol en la industria azucarera. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. 2006.
9. Alonso, D. Evaluación de alternativas de mejoras energéticas y ambientales en la destilería Jesús Rabí Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". 2015.
10. Ibáñez, M.; Saura, G.; Pérez, I.; Pérez, O.; Zumalacárregui, L. Análisis de alternativas para la producción de etanol a partir de jugos de los filtros y jugos secundarios. Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 52(1): (En prensa), 2018.
11. Grupo Derivados A. Indicaciones del Ministerio de Finanzas y Precios para el Grupo Empresarial AZCUBA. 2017.
12. Alonso, D.; Ramos, S. Informe Técnico. Diagnóstico ambiental a empresa azucarera "Mayabeque" y a la UEB Derivados "Héctor Molina". 2017
13. Zumalacárregui, L.; Pérez, O.; Lombardi, G.; Rodríguez, P. & Zumalacárregui, B. Cálculo del beneficio ambiental de la caña de azúcar para la producción de etanol combustible. Revista Ingeniería Química, 10(1): 65-71, 2008
14. Lorenzo, Y; Domenech, F.; Eng, F.; Almazán, O.; Chanfón J. Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB. Revista Tecnología Química, 35(1): 108-123, enero-abril, 2015.
15. Lorenzo, Y. Nueva tecnología de producción de etanol y biogás de menor costo e impacto ambiental negativo para la UEB Derivados "Heriberto Duquesne". Tesis de Doctorado. La Habana. Cuba. 2016.
16. Cortes, E. F.; Asao, N.; Palcios, R.; Ensinas, A.; Nebra, S. Vinasse concentration and juice evaporation system integrated to the conventional ethanol production process from sugarcane. Renewable Energy, 115(4): 474-488, 2017.