

ALTERNATIVAS PARA CONVERTIR UNA FÁBRICA AZUCARERA CUBANA EN UNA INDUSTRIA BIOREFINERA

ALTERNATIVES TO CONVERT A CUBAN SUGAR FACTORY IN A BIOREFINER INDUSTRY

Ana Celia de Armas Martínez^{1}, Marlén Morales Zamora¹, Yailset Albornas Carvajal¹
y Erenio González Suárez¹*

¹Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Marzo 2, 2018; Revisado: Marzo 26, 2018; Aceptado: Abril 27, 2018

RESUMEN

La industria azucarera cubana abre posibilidades para el desarrollo de una biorrefinería por las características de sus corrientes de flujos másicos y sus facilidades para la obtención de diferentes productos, coproductos y energía. En el presente artículo se evaluaron esquemas de biorrefinería en una fábrica de azúcar cubana con la integración de productos y coproductos. Se plantearon dos esquemas para el desarrollo de una biorrefinería en una industria azucarera cubana, considerando la obtención de alcohol de segunda generación (2G) y biodiesel de tercera generación (3G) (Alternativa I), así como la obtención de alcohol a partir de Miel-Jugo de los filtros e Hidrolizado de Bagazo y biodiesel de 3G (Alternativa II). Al analizar las dos alternativas a partir de los resultados de los balances de masa, la I no resulta factible desde el punto de vista técnico pues la cantidad de bagazo destinada para la producción del hidrolizado hace que el central no sea autoabastecido energéticamente, consumiendo 2 868 609 kW-h/año del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Al realizar la evaluación económica se obtuvo que es factible técnica y económicamente la aplicación de la alternativa II, pues la misma tiene un VAN de \$ 19 129 956, una TIR de 41,9% y un periodo de recuperación de 4,4 años, lográndose de esta forma la integración de una industria azucarera a una biorrefinería que obtenga productos de segunda y tercera generación.

Palabras clave: alternativa; biorrefinería; bioetanol segunda generación; biodiesel tercera generación.

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Ana C. de Armas, Email: anaceliaam@uclv.cu

ABSTRACT

The Cuban sugar industry opens possibilities for biorefinery development due the characteristics of its mass flow currents and its facilities for obtaining different products, co-products and energy. In present paper, biorefinery schemes were evaluated in a Cuban sugar factory with the integration of products and by-products. Two schemes were proposed for the development of a biorefinery in a Cuban sugar industry, considering the obtaining of second generation ethanol (2G) and third generation biodiesel (3G) (Alternative I), as well as obtaining ethanol from molasse -filters juices and bagasse hydrolyzed and biodiesel 3G (Alternative II). When analyzing these alternatives based on results of mass balances, the Alternative I is not feasible from a technical point of view, since the amount of bagasse used for hydrolyzate production makes the plant not self-sufficient energetically, consuming 2 868 609 kW-h / year of the National Electric System (SEN). When carrying out the economic evaluation it was obtained that alternative II is technically and economically feasible, since it has a NPV of \$ 19 129 956, a TIR of 41.9% and a payback of 4.4 years, achieving in this way the integration of a sugar industry to a biorefinery that obtains second and third generation products.

Key words: alternative; biorefinery; bioethanol second generation; third generation biodiesel.

1. INTRODUCCIÓN

La disminución de reservas de los recursos fósiles, petróleo fundamentalmente, unida al deterioro medioambiental que provoca su uso, está obligando a explorar diferentes formas de obtener productos que sustituyan, en alguna medida, a los que tienen este origen. Es por ello que surge la necesidad de reducir la dependencia de las materias primas petroquímicas, mediante el desarrollo de nuevas fuentes alternativas de energía y nuevas materias primas renovables como la biomasa.

En este contexto surge el concepto de biorrefinería, definido según el “Manual sobre las biorrefinerías en España” (2017), análogo al concepto convencional de la refinería de petróleo, una instalación donde, mediante diversos procesos de transformación de la biomasa, se genera bioenergía (calor, electricidad, biocombustibles) y un amplio espectro de bioproductos (materiales, productos químicos, alimentos y piensos), requiriéndose para ello la integración de diferentes procesos y tecnologías en una misma instalación.

Su tipificación se puede basar de acuerdo a diferentes aspectos definidos en Cárdenas (2012), donde consideran la materia prima utilizada, el tipo de tecnología, los productos generados así como la madurez de la tecnología, siendo este último uno de los más empleados.

Países como Bélgica, Holanda, Francia, Austria y Alemania producen, a escala comercial, en biorrefinerías de primera generación, teniendo como materias primas esencialmente el trigo y el maíz. En estas apenas existe flexibilidad en las capacidades de procesado y se producen básicamente biocombustibles y algunos coproductos (Salazar y Cárdenas, 2013).

Los biocombustibles son obtenidos por rutas simples de producción (Abels et al., 2013) empleando tecnología convencional (Álvarez, 2009). Salazar y Cárdenas (2013) destacan que este tipo de biorrefinería no se encuentra diseñado para hacer un uso eficiente de la biomasa, minimizar la utilización de energía y reciclar desechos, de manera de generar buenos ingresos.

Los modelos de segunda generación comprenden el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, siendo el mayor exponente la biorrefinería de etanol celulósico. En los últimos años, se han puesto en marcha las primeras instalaciones a escala comercial de este tipo en Italia, Brasil y Estados Unidos. Los procesos de producción tienen rutas de conversión más complejas que los de primera generación (Abels et al., 2013), destacando Álvarez (2009) la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch. Este tipo de biorrefinería permite el uso óptimo de los recursos disponibles y genera mayor retorno económico, además que integra múltiples procesos que conducen a competitividades alineadas por las refinerías petroquímicas (Ballesteros, 2016).

Por último se encuentran las biorrefinerías de tercera generación (o biorrefinerías avanzadas), las mismas aprovechan todas las posibilidades que ofrece la biomasa, reduciendo la generación de residuos. Los insumos son vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos (Álvarez, 2009).

Quintero (2017) señala a las microalgas como una materia prima promisoría en la obtención de biocombustibles de tercera generación. En la actualidad los principales esquemas que se obtienen, principalmente en el procesamiento de las microalgas, se han desarrollado como demostración y a escala de planta piloto en Estados Unidos, Austria, Australia y Argentina, por citar algunos ejemplos. Este tipo de biorrefinerías apunta al reciclaje total de los residuos de producción y a la auto sustentabilidad energética, lo que presupone impactos mínimos sobre el ambiente (Trigo et al., 2011).

Cuba no se encuentra ajena a esta situación y dentro de su potencial industrial, la industria azucarera, abre una perspectiva extraordinaria para transformarse en una biorrefinería que emplee integralmente la caña de azúcar como fuente de energía y de productos químicos, como el biodiesel y el bioetanol. Rivero et al., (2010) plantean que la biorrefinería de la gramínea obliga a la integración de la destilería con la producción del central y la caña de azúcar como materia prima principal, lo que posibilita no sólo el empleo de las mieles finales, sino también de los jugos, mieles intermedias y el uso del bagazo y residuos de cosecha como energéticos, evitando la quema y requema de cañaverales y el necesario manejo agroecológico de dicha planta.

González y col., (2012) plantearon que para lograr el desarrollo de la industria azucarera en el concepto de biorrefinería es necesario desarrollar y optimizar los esquemas tecnológicos de producciones integradas de azúcar, etanol, electricidad y coproductos químicos derivados de la caña, considerando la incertidumbre en los balances de materiales y energía, la disponibilidad de las instalaciones y la incertidumbre operacional vinculada a los fenómenos de espera.

Considerando lo antes expuesto, en el presente trabajo se propone la evaluación de esquemas de biorrefinería en una industria azucarera cubana, con la integración de productos y coproductos como el bioetanol de segunda generación, empleando sustratos generados en el fraccionamiento de la caña, y el biodiesel de microalgas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Perspectivas de biorrefinería en una industria azucarera

Inicialmente se propone un esquema que permita identificar de forma detallada los procesos de las industrias a analizar, así como facilitar el criterio de selección de la propuesta final, que posibilite convertir una fábrica azucarera en una industria biorrefinera. Para ello se elabora el diagrama heurístico que se muestra en la figura 1, el cual es la herramienta fundamental empleada en el presente artículo para el análisis de alternativas.

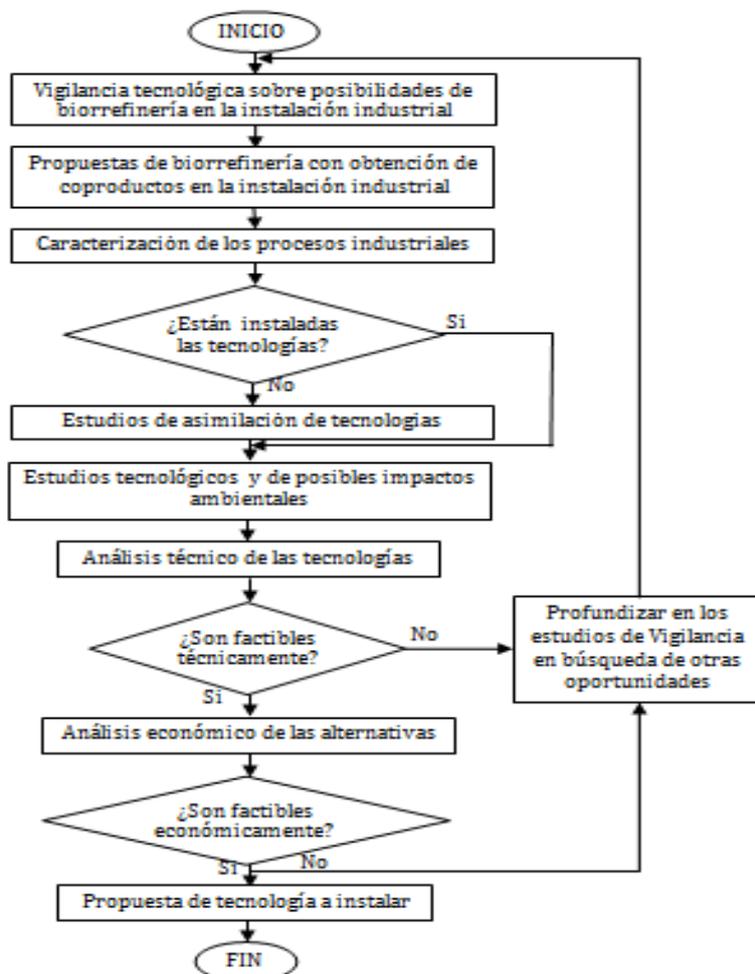


Figura 1. Diagrama heurístico para el análisis de alternativas de una biorrefinería

Como posibilidades de biorrefinería en la industria azucarera se consideran dos esquemas que tienen como eje central la producción de azúcar, además de la obtención de alcohol de 2G y biodiesel de 3G y los coproductos derivados de estas producciones. Estos son:

1. Obtención de alcohol de 2G y biodiesel de 3G y como coproductos: furfural, aceite de fusel y glicerina (Alternativa I).
2. Obtención de alcohol a partir de Miel-Jugo de los filtros e Hidrolizado de Bagazo y biodiesel de 3G y como coproductos furfural, aceite de fusel y glicerina (Alternativa II).

2.2 Análisis de los procesos comunes en las alternativas.

Siguiendo lo planteado por el diagrama heurístico se estudian los procesos incluidos en las alternativas que permitan convertir una fábrica de azúcar en una industria biorefinera.

2.2.1 Producción de azúcar crudo.

En las dos alternativas propuestas, la producción de azúcar crudo constituye un proceso común, por ello se realizan los balances de masa y energía, con el fin de conocer la disponibilidad de las corrientes para emplearlas en las producciones a proponer.

La producción de azúcar crudo comienza con la preparación de la caña que será alimentada a los molinos, lo cual facilita la extracción del jugo con mayor eficiencia. En la molienda se obtiene el jugo así como el bagazo, el cual es utilizado en las calderas para generar vapor, representando aproximadamente el 25% del peso de la caña molida. El jugo proveniente de los molinos, con una concentración de sólidos solubles entre 15 y 16°Bx, pasa por las etapas de alcalización, clarificación, evaporación, cocción, cristalización y centrifugación, siendo ésta la última en donde se obtiene el azúcar comercial.

Para realizar los balances de masa del proceso de obtención de azúcar se toma como base una capacidad de molida de 9 200 t/d con vistas a ampliar en futuras inversiones la capacidad de molida actual de la industria azucarera considerada en el presente estudio.

2.2.2 Producción de alcohol de primera generación (1G).

Antes de plantear los balances de masa para la producción del hidrolizado de bagazo es necesario estudiar la producción de alcohol por vía tradicional (a partir de mieles), que se corresponde al alcohol de 1G. El proceso en general abarca tres etapas: preparación del mosto, fermentación y destilación-rectificación a través del cual se obtiene etanol extrafino a 96,3°GL.

La materia prima utilizada contiene 85°Brix y 48% de azúcares fermentables. Se asume un rendimiento industrial de 44% y se emplean las relaciones propuestas por (Albernas et al., 2012), las cuales se reportan en la tabla 1.

Tabla 1. Relación de materias primas y producción de alcohol

Compuestos	Relación
Melazas	0,38 t/Hl
Antiespumante	0,08 kg/Hl
Levadura	0,001 kg/Hl
Ácido Sulfúrico	2,76 kg/Hl

Se plantean los balances para una destilería con capacidad de producción de 500 Hl/d de alcohol al ser un modelo estandarizado en Cuba.

2.2.3 Producción de biodiesel de 3G.

La producción de biodiesel a partir de microalgas tiene las siguientes etapas: a) producción de biomasa rica en lípidos, b) recuperación o cosecha de la biomasa, c)

extracción de lípidos por vía mecánica y mediante lixiviación con solventes orgánicos y d) la transesterificación (Fernández-Linares et al., 2012, Arias et al., 2013).

La transesterificación es precedida por una esterificación donde los ácidos grasos libres reaccionan con metanol en presencia ácido sulfúrico como catalizador, permitiendo así no trabajar con elevadas temperaturas ni tiempos largos de reacción. Todo ello garantiza un ahorro de tiempo y un aumento del rendimiento final, pues reaccionan los ácidos grasos libres (que no están formando triglicéridos) y se transforman en ésteres metílicos (Núñez y García, 2012). El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. La mezcla obtenida es neutralizada con ácido sulfúrico para evitar que el catalizador básico en exceso reaccione con los ácidos grasos libres, ya que se formarían jabones indeseados en el producto final. Finalmente, la mezcla resultante es evaporada para separar el metanol en exceso y decantada con el fin de obtener dos fases, una mezcla de glicerina, sales e impurezas (jabones, catalizadores ácidos) y el biodiesel (Monteiro, 2010).

Los balances de masa para la producción de biodiesel se establecieron para una capacidad de 150 kg/día de biomasa de microalga *Chlorella* que se pueden obtener de su crecimiento en vinaza residual de la destilería considerando lo planteado por Ríos et al., (2013), quienes expresan que las principales características de las vinazas permiten su uso como fuente de cultivo de microalgas y aprovecharlas en este sentido mejoraría la calidad de los vertimientos por la remoción de componentes contaminantes orgánicos e inorgánicos solubles y permitiría el crecimiento de biomasa aprovechable para la obtención de diversos productos.

Las principales ecuaciones consideradas para la realización de los balances para la producción de azúcar crudo, alcohol de 1G y biodiesel de 3G se muestran de en la tabla 2.

Tabla 2. Principales ecuaciones utilizadas en los balances para la producción de azúcar crudo, alcohol y biodiesel de 3G

Proceso	Ecuaciones
Producción de azúcar crudo	<p>$Agua\ imbibición + Caña = Bagazo + Jugo\ molinos$</p> <p>$Jugo\ de\ los\ filtros = 15\% * Jugo\ molinos$</p> <p>$Vapor\ (G)\ generado\ en\ caldera\ (G_{cald}) = (G_{Turbos} + G_{Válvula\ Reductora} + G_{otros} * Pérdidas)$</p> <p>$Bagazo\ quemado\ (Bq) = \frac{G_{cald}}{Índice\ de\ Generación}$</p> <p>$Bagazo\ sobrante\ (Bs) = Bagazo - Bq$</p> <p>$Azúcar\ producida = Índice\ de\ cristalización * Masa\ de\ meladura$</p> <p>$Miel\ final = Índice\ de\ miel\ final * Masa\ de\ caña$</p>
Producción de alcohol	<p>$Miel\ de\ entrada\ (Me) = Producción\ de\ alcohol * Índice\ consumo\ de\ miel$</p> <p>$Miel\ diluida\ (Md) = Agua + Me$</p> <p>$Brix_{Me} * Me = Brix_{Md} * Md$</p> <p>$Alcohol_{total} = Alcohol_{pie\ cuba} + Alcohol_{fermentación}$</p> <p>$Vino\ en\ columna\ destiladora + Vapor = Vapores\ alcohólicos + Vinazas$</p> <p>$Vino\ en\ columna\ destiladora * Composición_{alcohol\ vino} = Vapores\ alcohólicos * Composición_{vapores\ alcohólicos}$</p>
Producción de biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Producción de alcohol 1G:</i> <p>Ecuaciones planteadas en la tabla 3</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Producción de biodiesel 3G:</i>

	$\text{Biodiesel} = (n_0B + \left(n_0T * RE \left(\frac{\text{Biodiesel}}{\text{Triglicérido}} \right) * \text{Conversion} \right) * M_m B$ <p> n_0B: moles iniciales de biodiesel n_0T: moles iniciales de triglicérido RE: relación estequiométrica $M_m B$: masa molar biodiesel </p>
--	---

2.3 Diseño de las alternativas

2.3.1 Obtención de alcohol de 2G y biodiesel de 3G (Alternativa I).

El bagazo que usualmente es destinado para la generación de vapor y electricidad, constituye un residuo disponible para la producción de bioetanol de segunda generación (Narra et al., 2016).

La obtención de alcohol a partir de miel e hidrolizado de bagazo (HB) consta de cuatro etapas fundamentales: pretratamiento, hidrólisis enzimática (HE), fermentación y destilación (Mesa et al., 2016, Albernas-Carvajal et al., 2017).

El pretratamiento estudiado por Albernas-Carvajal et al., (2014) como una serie de etapas discontinuas, consta de una etapa de hidrólisis ácida (HA), una de hidrólisis básica (HB) y por último la hidrólisis enzimática (HE). Tiene como objetivo incrementar el balance global de los procesos de conversión posteriores, produciéndose el fraccionamiento de la biomasa en sus componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Albernas Carvajal et al., 2014).

Mesa et al., (2016) expresaron que en el pretratamiento ácido se requieren altas temperaturas para lograr rendimientos aceptables en glucosa, lo que provoca mayor descomposición de los azúcares procedentes de la hemicelulosa, generando compuestos como el furfural (Lenihan et al., 2010, Morales, 2012). Por otra parte, la HB también cuenta con la acción del vapor, el sólido se trata con una solución de hidróxido de sodio al 3% en base a fibra seca y etanol al 30% v/v. En esta etapa, (Albernas et al., 2012), considera un 1% de pérdida de etanol respecto a fibra seca, al incluir un sistema de recuperación del mismo por condensación. Finalmente, la biomasa obtenida pasa a la etapa de hidrólisis enzimática, mediante la acción de enzimas celulasas por un término de 24-48 h (Mesa, 2010).

De esta forma se obtiene un líquido rico en glucosa que se puede emplear como agente disolutor de la miel final (Morales, 2012). Al plantear los balances de masa y energía para la obtención del hidrolizado de bagazo se consideran las condiciones óptimas alcanzadas en (Morales, 2012) para estudio de mezclas utilizando miel e hidrolizado de bagazo, siendo de 50% para cada corriente, alcanzándose, según resultados experimentales de la autora, 4,78% alcohólico. Las ecuaciones empleadas aparecen en la tabla 4.

2.3.2 Obtención de alcohol a partir de miel, jugo de los filtros (JF) e hidrolizado de bagazo y biodiesel de 3G (Alternativa II).

En la producción de azúcar crudo, el jugo de los filtros es un material azucarado de baja calidad, pero con un contenido de azúcares aún considerable, por lo que es devuelto al proceso (Alaric, 2012). Este autor analizó el efecto que tiene el desvío del jugo de los filtros de la producción de azúcar, sus resultados demuestran que, para una extracción total el azúcar producido se reduce en 5,3 % y las mieles producidas en 70 %. Por otra

parte, con el efecto negativo que causa en la producción de azúcar y miel, se muestra un ahorro energético y un aumento de la disponibilidad de bagazo para otros usos, como, materia prima lignocelulósica para la obtención de alcohol de segunda generación (Alaric, 2012).

A partir de esto y coincidiendo con lo planteado por Morales (2012), quien expresa que la utilización de las mezclas de diferentes sustratos favorece el proceso de fermentación, teniendo en cuenta el aprovechamiento del jugo de los filtros y del licor hidrolizado para la dilución de las mieles, es que se considera la presente alternativa con el objetivo de lograr mayor vínculo central-destilería.

Los balances se plantearon a partir del punto óptimo del diseño de mezclas realizado en Morales (2012), en proporciones p/p de 47,2% de miel, 17,8% de jugo de los filtros y 35% de hidrolizado de bagazo, alcanzándose para esas condiciones 5,26% alcohólico. Se fijan iguales condiciones de trabajo de la planta de etanol los que aparecen en la tabla 3.

Tabla 3. Principales ecuaciones empleadas en los balances de las alternativas

<i>Alternativas</i>	<i>Ecuaciones</i>
Alternativa I	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Producción de HB:</i> $\text{Ácido sulfúrico} = 1,25\% * \text{Bagazo}$ $\text{Agua total} = \text{Agua en HA} + \text{Agua en HB} + \text{Agua en HE}$ $\text{Vapor total} = \text{Vapor en HA} + \text{Vapor en HB}$ $\text{Eficiencia de recuperación de glucosa HA: } 75\%$ $\text{Eficiencia de recuperación de glucosa HB: } 61,2\%$ $\text{Tasa de conversión de glucosa en HE: } 0,7304$ $\text{Líquido salida HE} = \text{Glucosa extraída} + \text{Xilosa} + \text{Agua}$ ▪ <i>Producción de alcohol 2G:</i> $\text{Miel diluida (Md)} = \text{Agua} + \text{Me} + \text{HB}$ $\text{Brix}_{Md} * \text{Md} = \text{Brix}_{Me} * \text{Me} + \text{Brix}_{HB} * \text{HB}$
Alternativa II	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Producción de alcohol empleando Miel-HB-JF:</i> $\text{Miel diluida (Md)} = \text{Agua} + \text{Me} + \text{HB} + \text{JF}$ $\text{Bx}_{Md} * \text{Md} = \text{Bx}_{Me} * \text{Me} + \text{Brix}_{HB} * \text{HB} + \text{Brix}_{JF} * \text{JF}$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diseño de las alternativas.

En la Alternativa I, al considerar las proporciones de mezcla planteadas en Morales (2012), para un 50% de hidrolizado de bagazo y 50% de miel diluida es necesario procesar 3 247 kg/h de bagazo, para alcanzar el flujo de hidrolizado establecido. A partir de esta capacidad se realizaron los balances en las etapas de pretratamiento, así como en el proceso de obtención de alcohol donde se vio afectado por el uso de esta corriente.

Por otra parte, en la Alternativa II las proporciones de mezcla indican que 144 t/d de jugo de los filtros no se van a incorporar al proceso. Unido a ello, para sustituir en un 35% del mosto a fermentar con hidrolizado de bagazo es necesario procesar 2 237 kg/h de bagazo. Finalmente en ambas alternativas se une la producción de biodiesel de 3G.

En ambas alternativas se consideró la producción de biodiesel a partir de biomasa obtenida de la microalga *Chlorella*. El crecimiento de esta microalga en vinazas residuales de destilería puede lograr hasta un 80% de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), disminuyendo los valores desde 66 110 mg/l hasta 13 225 mg/l

(Moraña et al., 2016). La DQO inicial tratada por estos autores se corresponde a la obtenida en vinazas de destilerías cubanas, similares a las caracterizadas por (Chanfón y Lorenzo, 2014, Urbano, 2017). La efectividad de reducción de la DQO y con ello de la carga contaminante, demuestra que la especie de microalga *Chlorella* puede crecer satisfactoriamente en vinazas procedentes de las destilerías cubanas. Con esto se da cumplimiento al orden planteado en el diagrama heurístico propuesto al analizar el impacto ambiental. Los resultados de los balances en los procesos considerados se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Principales resultados de las alternativas

<i>Proceso</i>	<i>Corriente</i>	<i>Alternativas</i>	
		<i>I</i>	<i>II</i>
Producción de Azúcar	Jugo de filtros (t/día)	1 380	1 236
	Azúcar (t/día)	809	797
	Miel final (t/día)	415	378
	Electricidad entregada (kW-h)	-2 868 609	24 704
Producción hidrolizado de bagazo	H ₂ SO ₄ (kg/h)	40	28
	Agua total (kg/h)	19 134	13 182
	Furfural (kg/h)	194	134
	Vapor total (kg/h)	796	548
	Etanol (kg/h)	5 121	3 529
	NaOH (kg/h)	73	50
	Enzima (m ³ /h)	0,58	0,40
	Glucosa en líquido HE (kg/h)	1 001	690
	Líquido en HE (kg/h)	17 170	11 832
	Sólido salida HE (kg/h)	780	537
Producción de alcohol	Miel (t/d)	169	150,7
	Miel en no zafra (t/d)	-	174,5
	Agua para dilución (kg/h)	9 599	9 676
	Agua para dilución en no zafra (kg/h)	-	14 702
	Alcohol total en fermentación (t/h)	1,58	1,75
	Jugo de filtros (t/día)	-	144
Producción de biodiesel	Alga seca (kg/día)	150	150
	Metanol (kg/día)	6,81	6,81
	Glicerina (kg/día)	103,43	103,43
	Biodiesel (kg/día)	81,67	81,67

La mayor reducción de miel se alcanza en la Alternativa I, de forma tal que para esas condiciones se logra abastecer con miel del propio central a la destilería durante todo el año, disminuyendo así los gastos por compra de la misma (tabla 5). Sin embargo, esta propuesta no resulta factible técnicamente pues consume energía del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), lo cual va en contra de los principios de la industria azucarera cubana y a su vez del concepto de biorrefinería, en el cual además de obtener productos se produce energía. A partir de este criterio y siguiendo lo indicado en el diagrama heurístico, esta alternativa se propone que sea reanalizada con el objetivo de lograr su factibilidad técnica en el concepto de biorrefinería.

En la Alternativa II (tabla 5), es necesario comprar solamente un 8% del total de miel a consumir lo que permite que operar 256 días con la producida por el central, cabe

destacar que esta alternativa también se ve afectada por la disminución de miel en el central en un 11% al desviar 144 t/d de jugo de los filtros.

Tabla 5. Consumo de miel y días de operación por alternativa

<i>Parámetro</i>	<i>Alternativas</i>	
	<i>I</i>	<i>II</i>
Miel consumida en zafra (t/año)	-	18 086
Miel consumida en no zafra (t/año)	-	31 415
Miel total consumida (t/año)	47 295	49 501
Miel producida por el central (t/año)	49 800	45 360
Miel a comprar (t/año)	-	4 141
Días de operación con miel del propio central	280	256

Por último, a través de los balances para la producción de biodiesel de tercera generación, considerando las etapas de extracción de aceite, transesterificación y purificación, se logra obtener 0,55 kg de biodiesel / kg de microalga.

3.2 Evaluación económica de la alternativa seleccionada.

El cálculo de los indicadores se efectuó aplicando la metodología planteada en (Peters y Timmerhaus, 2006). Realizándose el estimado del costo total de la inversión sobre la base del costo total del equipamiento, para el cual, se consideraron los aspectos que para la planta inciden en la inversión fija y la inversión de trabajo. Por otra parte, los costos totales de producción se obtuvieron, principalmente, a partir de los consumos en materias primas, mano de obra y requerimientos del proceso. Los principales resultados de estos cálculos aparecen en la tabla 6.

Tabla 6. Análisis económico Alternativa II

<i>Alternativa II</i>			
<i>Costo Total de Inversión (CTI) (\$)</i>		<i>Costo Total de Producción (CTP) (\$/año)</i>	
Costo de Equipamiento	3 109 008	Materia prima	37 916 957
Costos Directos	8 036 788	Costos Variables	38 670 736
Costos Indirectos	1 949 348	Costos Fijos	839 747
CTI (\$)	10 499 123	Gastos generales	1 684 442
		CTP	41 302 708

Se determinaron los indicadores dinámicos de rentabilidad: VAN, TIR y PRD, con el objetivo de valorar la factibilidad de inversión de la alternativa propuesta; tomando una tasa de interés del 15%. Los resultados del cálculo se resumen en la tabla 7, a partir de los cuales se obtuvieron los indicadores dinámicos de rentabilidad que aparecen en la tabla 8.

Tabla 7. Valor de la producción y ganancias de la Alternativa II

<i>Alternativa</i>	<i>II</i>
Valor de producción (\$/año)	47 735 104
Ganancia (\$/año)	5 773 310

Tabla 8. Indicadores Dinámicos de Rentabilidad de la Alternativa II

<i>Alternativa</i>	<i>II</i>
VAN (\$)	19 129 956
TIR (%)	41,9
PRD (años)	4,4

Según los resultados del análisis económico, la alternativa resulta viable desde este punto de vista. La misma se recupera en 4,4 años y por lo tanto puede ser considerada como un ejemplo de biorrefinería a emplear en una industria azucarera cubana, a través de la cual se logre el aprovechamiento de la caña como fuente de biomasa, la obtención de productos principales como el azúcar, el bioetanol de 2G, el biodiesel de 3G, coproductos y finalmente la producción de energía en el central.

4. CONCLUSIONES

1. Al integrar una industria cubana azucarera en el concepto de biorrefinería se logra la diversificación de sus producciones obteniéndose bioetanol de 2G y biodiesel de 3G y coproductos como el furfural, aceite de fusel y glicerina que permiten incrementar su rentabilidad.
2. La Alternativa I no resulta viable técnicamente pues consume 2 868 609 kW-h/año del SEN, contradiciendo los principios de la industria azucarera cubana y del concepto de biorrefinería.
3. El empleo del hidrolizado de bagazo y jugo de los filtros en la Alternativa II reduce la compra de miel hasta un 8% del total a consumir, permitiendo que la destilería se abastezca con la proveniente del central 256 días de los 280 que se planifica la operación anual.
4. La Alternativa II es la que resulta factible desde el punto de vista técnico y económico al tener un VAN de \$ 19 129 956, una TIR de 41,9 % en un periodo de recuperación de 4,4 años.

REFERENCIAS

- Abels, C., Carstensen, F., Wessling, M., Membrane processes in biorefinery applications., *Journal of Membrane Science*, Vol. 444, 2013, pp. 285–317.
- Alaric, R., Estrategia para la producción de biocombustibles en Guatemala., Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2012.
- Albernas, Y., Mesa, L., González, E., González, M., Díaz, M. & Castro, E., Evaluación Económica de las Alternativas de pretratamiento para la producción de etanol a partir de bagazo., *Centro Azúcar*, Vol. 39, No 2, 2012, 58-64.
- Albernas-Carvajal, Y., Corsano, G., Morales, M., González, M., Santos, R., González, E., Optimal design for an ethanol plant combining first and second-generation technologies., *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol. 5, No. 5, 2014, pp. 97 – 120.
- Albernas-Carvajal, Y., Corsano, G., González, M., González, E., Preliminary design for simultaneous saccharification and fermentation stages for ethanol production from

- sugar cane bagasse., *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 126, 2017, pp. 232–240.
- Álvarez, C., *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional.*, *Economía informa*, Vol. 359, 2009, pp. 63 - 89.
- Arias, M.T., Martínez, A.J., Cañizares, R.O., *Producción de biodiesel a partir de microalgas: parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos.*, *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 18, No 1, 2013, pp. 43-68.
- Ballesteros, M., *Biorrefinerías: estado actual y desarrollo futuro.*, *Curso de bioeconomía: gestión y financiación de proyectos de bioeconomía*, Madrid, España, 2016, pp. 1-22.
- Cárdenas, R., *Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación.*, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ingeniería y Producción Industrial, Universidad Técnica de Valencia, España, 2012.
- Chanfón, J.M., Lorenzo, Y., *Alternativas de tratamiento de las vinazas de destilería. Experiencias nacionales e internacionales.*, *Centro Azúcar*, Vol. 41, No 2, 2014, pp. 56-67.
- Fernández-Linares, L.C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropesa, A., Badillo-Corona, J.A., *Producción de biocombustibles a partir de microalgas.*, *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, Vol. 8, No 3, 2012, pp. 101-115.
- González, E., Concepción, D., Mesa, L., Morales, M., Ramos, F., Moya, M., Castro, E., *Aspectos técnicos-económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de azúcar.*, Editorial Universidad de Jaén, España, 2012, pp. 69-75.
- Lenihan, P., Orozco, A., O'Neill, E., Ahmad, M.N., Rooney, D.W., Walker, G.M., *Dilute acid hydrolysis of lignocellulosic biomass.*, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 156, No. 2, 2010, pp. 395-403.
- Monteiro, C.M., *Situación de los biocombustibles de 2da y 3ra generación en América Latina y el Caribe.*, *OLADE/IICA*, 2010, pp. 1-87. Disponible en: <http://www.bivica.org/upload/biocombustibles-situacion.pdf>.
- Manual sobre biorrefinerías en España.*, *BioPlat, SUSCHEM*, 2017, pp. 7-67, Disponible en: http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_cont_URI_4020.pdf
- Mesa, L., *Estrategia Investigativa para la Tecnología de Obtención de Etanol y Coproductos del Bagazo de la Caña de Azúcar.*, Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2010.
- Mesa, L., Albernas, Y., Morales, M., Corsano, G., González, E., *Integration of Organosolv Process for Biomass Pretreatment in a Biorefinery.*, Chapter 11, in: S.I. Mussatto (Ed.), *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*, Elsevier, 2016, pp. 229–254.
- Morales, M., *Estrategia para la reconversión de una industria integrada de azúcar y derivados para la producción de etanol y coproductos a partir del bagazo.*, Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2012, Cuba.

- Moraña, L., Rolón, M., Salusso, M.M., Uso de microalgas autóctonas en biodepuración de vinazas de caña de azúcar., Acta VI Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento del Agua, Universidad Blas Pascal, Córdoba, Argentina, 9-11 noviembre, 2016, pp. 174-184.
- Narra, M., James, J.P., Balasubramanian, V., Comparison between separate hydrolysis and fermentation and simultaneous saccharification and fermentation using dilute acid pretreated lignocellulosic biomass., Proceedings of the First International Conference on Recent Advances in Bioenergy Research, Springer Proceedings in Energy, 2016, pp. 3-14.
- Núñez, M.J., y García, P., Biocombustibles: bioetanol y biodiesel., Universidad de Santiago de Compostela, 2012, pp. 1-16. Disponible en: http://www.enciga.org/files/boletins/61/biocombustibles_bioetanol_y_biodiesel.pdf
- Peters, M.S., and Timmerhaus, K., Plant Design and Economics for Chemical Engineers., McGrall-Hill International Editions, Fourth Editions, Colorado, 2006, pp. 140-141.
- Quintero, V., Modelamiento, integración y evaluación exergética de la producción conjunta de bioetanol de primera, segunda y tercera generación, a partir de caña de azúcar y biomasa de microalgas., Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctora en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Colombia. 2017.
- Ríos, O.A., Kafarov, V., y Barajas, C., Estudio del efecto de las vinazas en la composición de *Chorella vulgaris* utex 1803 para la producción de biocombustibles y productos de valor agregado., XIII Seminario internacional de medio ambiente y desarrollo sostenible, Hotel Bucarica, Bucaramanga, Colombia, Noviembre 2013.
- Rivero, J.C.S., Romero, G., Rodríguez, E.C., Pech, E. & Rosete, S.B., Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México., Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 9, No 3, 2010, pp. 261-283.
- Salazar, R., Cárdenas, G.J., La bioeconomía y las biorrefinerías., Avance agoindustrial. Vol 34, No 3, 2013, pp. 31-34.
- Trigo, E.J., Mentaberry, A., Cap E.J, Zelada, A., El potencial de la bioeconomía y las biorrefinerías en la Argentina., Informe técnico, 2011, pp. 1-34, Disponible en: http://www.argentinainnovadora2020.mincyt.gob.ar/?wpfb_dl=25
- Urbano, M., Digestión anaerobia de vinaza pura cubana en sistema UASB - Filtro Anaerobio., Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba. 2017.