



Tecnología Química  
ISSN: 2224-6185  
Universidad de Oriente

de Armas-Martínez, Ana Celia; Morales Zamora, Marlen;  
Albernas Carvajal, Yailet; González Suárez, Erenio  
Proyección de una industria azucarera para transformarse en una  
biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación  
Tecnología Química, vol. 39, núm. 3, Septiembre-Diciembre, 2019, pp. 489-507  
Universidad de Oriente

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445560283001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

## **Proyección de una industria azucarera para transformarse en una biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación**

Projection of a sugar industry to become a biorefinery from second and third generation biofuels

MSc. Ana Celia de Armas-Martínez<sup>1\*</sup>

Dr C. Marlen Morales Zamora<sup>1</sup>

Dr C. Yailet Albernas Carvajal<sup>1</sup>

Dr Sc. Erenio González Suárez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química farmacia, Universidad Central “Marta Abreu de las Villas”, Villa Clara, Cuba.

\*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: [anaceliaam@uclv.cu](mailto:anaceliaam@uclv.cu)

### **RESUMEN**

La industria azucarera cubana abre posibilidades para el desarrollo de una biorrefinería por las características de sus corrientes y sus facilidades para la obtención de diferentes productos, coproductos y energía. Los esquemas planteados para el desarrollo de una biorrefinería en una industria azucarera cubana consideran la obtención de alcohol de segunda generación (2G) con autoabastecimiento energético del central (I), la obtención de alcohol a partir de Miel-Jugo de los filtros e Hidrolizado de Bagazo (II), la obtención de alcohol de primera generación (1G) y biodiesel de tercera generación (3G) (III), así como la combinación de las dos primeras alternativas con la tercera. Las alternativas II y V

son las que logran menor consumo de miel, aunque éstas se ven afectadas por la disminución de miel en el central en un 11% al desviar 144 t/d de jugo de los filtros. Mientras que, la alternativa I y la IV, son las de menor consumo de agua para la dilución de la miel. Por otra parte, al analizar la factibilidad económica de los esquemas propuestos la mejor alternativa desde el punto de vista técnico económico es la III con un VAN de \$ 22 843 162, una TIR de 29,5% y un periodo de recuperación de 4 años. Sin embargo, desde el punto de vista de integración de la industria azucarera a una biorrefinería es la (IV) con un VAN de \$ 17 088 391,70, una TIR de 34,9 % para un periodo de recuperación de 5,3 años.

**Palabras claves:** biorrefinería; primera generación; segunda generación; tercera generación.

## ABSTRACT

The Cuban sugar industry opens possibilities for the development of a biorefinery by the characteristics of its currents and its facilities for obtaining different products, co-products and energy. The schemes proposed for the development of a biorefinery in a Cuban sugar industry consider obtaining second-generation alcohol (2G) with self-supply of energy from the plant (I), obtaining alcohol from Honey-Juice filters and Hydrolyzate from Bagasse (II), the obtaining of first generation alcohol (1G) and third generation biodiesel (3G) (III), as well as the combination of the first two alternatives with the third. Alternatives II and V are those that achieve lower consumption of honey, although these are affected by the reduction of honey in the plant by 11% by diverting 144 t / d of juice from the filters. While, alternative I and IV are those with lower water consumption for the dilution of honey. On the other hand, when analyzing the economic feasibility of the proposed schemes the best alternative from the technical economic point of view is the III with a NPV of \$ 22 843 162, an IRR of 29.5% and a recovery period of 4 years . However, from the point of view of integration of the sugar industry to a biorefinery is the (IV) with a NPV of \$ 17 088 391.70, an IRR of 34.9% for a recovery period of 5.3 years.

**Keywords:** biorefinery, first generation, second generation, third generation.

Recibido: 8/09/2018

Aceptado: 15/01/2019

## Introducción

El término biorrefinería se encuentra en la literatura científica desde el año 2001,<sup>(1)</sup> no obstante, hay autores que señalan<sup>(2)</sup> cómo desde el año 2007 se comienza a apreciar de manera significativa en publicaciones y memorias de eventos científicos. Como aparece en el Manual sobre las biorrefinerías en España,<sup>(3)</sup> es 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. Existen diferentes formas de clasificar los modelos de biorrefinerías, la más extendida se basa en el grado de integración y optimización del aprovechamiento de la biomasa, que corresponde a su vez con el grado de madurez de la tecnología. Según este criterio, las biorrefinerías podrían catalogarse de primera, segunda y tercera generación.<sup>(3)</sup>

En las biorrefinerías de primera generación apenas existe flexibilidad en las capacidades de procesado y se producen básicamente biocombustibles y algunos coproductos.<sup>(4)</sup> Los biocombustibles son obtenidos por rutas de producción simples empleando tecnología convencional como la fermentación, transesterificación y la digestión anaerobia.<sup>(5)</sup> No obstante, se han identificado algunas desventajas como que no se encuentran diseñadas para hacer un uso eficiente de la biomasa, minimizar la utilización de energía y reciclar desechos, de manera de generar buenos ingresos.<sup>(4)</sup>

Los modelos de segunda generación comprenden el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, como el bagazo de la caña de azúcar, siendo el mayor exponente la biorrefinería de etanol celulósico. Los procesos de producción tienen rutas de conversión más complejas que los de primera generación, se destacan la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch.<sup>(5)</sup> Este tipo de biorrefinería permite el uso óptimo de los recursos disponibles y generan mayor retorno económico, además que integra múltiples procesos que conducen a competitividades alineadas por las refinerías petroquímicas.

Por último, las biorrefinerías de tercera generación, (o biorrefinerías avanzadas) 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. Se plantean las microalgas como una materia prima promisoria en la obtención de biocombustibles denominados de tercera generación.<sup>(6)</sup> Aparte de una integración más eficaz de los procesos productivos, este tipo de biorrefinerías apunta al reciclaje total de los residuos de producción y al auto sustentabilidad energética, lo que presupone impactos mínimos sobre el ambiente.<sup>(7)</sup>

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 bioetanol. Algunos autores plantean que la biorrefinería de la caña de azúcar obliga a la integración de la destilería con la producción de azúcar y la caña 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.<sup>(8)</sup>

A partir de lo antes expuesto, se pretende en el presente trabajo la evaluación de diferentes esquemas de biorrefinería en una industria azucarera cubana, a partir de la integración de productos y coproductos como el bioetanol de segunda generación, empleando sustratos generados en el fraccionamiento de la caña y

biodiesel a partir de microalgas, para la transformación de una industria azucarera en biorrefinería.

## Métodos utilizados

### Perspectivas de biorrefinería en una industria azucarera

Para lograr el desarrollo de la industria de la caña de azúcar en el concepto de biorrefinería una de las principales direcciones de trabajo científico planteadas es 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.<sup>(9)</sup>

Se pueden plantear diferentes esquemas de biorrefinería que tengan como eje central la producción de azúcar. Los esquemas a considerar parten de una instalación azucarera que no presenta otra industria anexa a él, lo que significa que las alternativas propuestas no se verán limitadas por este factor. En este caso se plantean esquemas que consideran biorrefinerías de primera, segunda y tercera generación, los cuales se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Alternativa para esquemas de biorrefinería en una industria azucarera

Alternativa		Productos	Coproductos
I	Obtención de alcohol de segunda generación con autoabastecimiento energético del central (2G).	Etanol Azúcar	Furfural Aceite de fusel
II	Obtención de alcohol a partir de Miel-Jugo de los filtros e Hidrolizado de Bagazo.	Etanol Azúcar	Furfural Aceite de fusel
III	Obtención de alcohol de primera generación (1G) y biodiesel de tercera generación (3G).	Etanol Azúcar Biodiesel 3G	Aceite de fusel Glicerina Residuo sólido
IV	Obtención de alcohol de segunda generación con autoabastecimiento energético del central y biodiesel de tercera generación.	Etanol Azúcar Biodiesel 3G	Furfural Aceite de fusel Glicerina Residuo sólido
V	Obtención de alcohol a partir de miel, jugo de los filtros e hidrolizado de bagazo y biodiesel de tercera generación.	Etanol Azúcar Biodiesel 3G	Furfural Aceite de fusel Glicerina Residuo sólido

## Producción de azúcar crudo y de alcohol de 1G

Las alternativas a considerar tienen como proceso común la producción de azúcar, por lo que fue necesario caracterizar el mismo partiendo de 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 valores 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 del proceso de obtención de azúcar se tomó 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.

Por otra parte, es necesario estudiar la producción de alcohol por vía tradicional (a partir de mieles), que corresponde al alcohol de 1G, en aras de facilitar el desarrollo de las alternativas. 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<sup>0</sup>GL.

La materia prima utilizada contiene aproximadamente 85<sup>0</sup>Brix y 48% de azúcares fermentables. Se asume un rendimiento industrial de 44% y se emplearán las relaciones planteadas en, <sup>(10)</sup> las cuales se reportan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Relación de materias primas y producción de alcohol

COMPUESTOS	RELACIÓN
Melazas	0,38 t/HI
Antiespumante	0,08 kg/HI
Levadura	0,001 kg/HI
Ácido Sulfúrico	2,76 kg/HI

Se considera trabajar con una destilería con capacidad de producción de 500 HI de alcohol diario al ser un modelo de destilería estandarizado en Cuba. Las principales ecuaciones empleadas en la realización de los balances para la producción de azúcar crudo y de alcohol de 1G aparecen en la tabla 3.

**Tabla 3.** Principales ecuaciones utilizadas en los balances para la producción de azúcar crudo y alcohol

PROCESO	ECUACIONES
Producción de azúcar crudo	$Agua\ imbibición + Caña = Bagazo + Jugo\ molinos \quad (1)$ $Jugo\ de\ los\ filtros = 15\% * Jugo\ molinos \quad (2)$ $Vapor\ (G)\ generado\ en\ caldera$ $(G_{cald}) = (G_{Turbos} + G_{Válvula\ Reductora} + G_{Otras}) * Pérdidas \quad (3)$ $Bagazo\ quemado\ (Bq) = \frac{G_{cald}}{\text{Índice\ de\ Generación}} \quad (4)$ $Bagazo\ sobrante\ (Bs) = Bagazo - Bq \quad (5)$ $Azúcar\ producida = \text{Índice\ cristalización} * Masa\ de\ meladura \quad (6)$ $Miel\ final = \text{Índice\ de\ miel\ final} * Masa\ de\ caña \quad (7)$
Producción de alcohol	$Miel\ de\ entrada\ (Me)$ $Me = \text{Producción\ de\ alcohol} * \text{Índice\ consumo\ de\ miel} \quad (8)$ $Miel\ diluida\ (Md) = Agua + Me \quad (9)$ $Brix_{Me} * Me = Brix_{Md} * Md \quad (10)$ $Alcohol_{total} = Alcohol_{pie\ cuba} + Alcohol_{fermentación} \quad (11)$ $Vino\ en\ col.\ destiladora + Vapor = Vapores\ alc + Vinazas \quad (12)$ $Vino\ en\ col.\ destiladora * Comp.\ alcohol\ vino$ $= Vapores\ alc * Composición\ vapores\ alcohólicos \quad (13)$

## Desarrollo de las alternativas

### Desarrollo Alternativa I

De acuerdo a algunos autores, <sup>(11)</sup> se obtienen por tonelada de azúcar de caña, aproximadamente, entre 0,27 y 0,3 t de bagazo que usualmente es destinado para la generación de vapor y electricidad. Sin embargo, constituye un residuo disponible para la producción de bioetanol de segunda generación. <sup>(12)</sup>

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. <sup>(13)</sup> La materia prima empleada es el bagazo obtenido de una fábrica de azúcar el cual se almacena con aproximadamente 60% de humedad. <sup>(14)</sup>

El pretratamiento consta de dos etapas de hidrólisis: ácida (HA) y básica (HB), para incrementar el balance global de los procesos de conversión posteriores, produciéndose el fraccionamiento de la biomasa en sus componentes principales

(celulosa, hemicelulosa y lignina). <sup>(14)</sup> En el pretratamiento ácido se requieren altas temperaturas para lograr rendimientos aceptables en glucosa, ello provoca mayor descomposición de los azúcares procedentes de la hemicelulosa, generando compuestos como el furfural. <sup>(12)</sup> En la segunda etapa de pretratamiento, que 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 solo se pierde un 1% del etanol respecto a fibra seca pues se incluye un sistema de recuperación del mismo por condensación. <sup>(11)</sup> La biomasa obtenida pasa a la etapa de hidrólisis enzimática, mediante la acción de enzimas celulosas por un término de 24-48 h. <sup>(15)</sup>

De esta forma se cumple lo expresado por <sup>(16)</sup> al obtenerse un líquido rico en glucosa que se puede emplear como agente disolutor de la miel final lo cual reduce el consumo de agua fresca del proceso. Al plantear los balances de masa y energía para la obtención del hidrolizado de bagazo se considera la disponibilidad de bagazo, garantizando el autoabastecimiento energético del central.

## **Desarrollo Alternativa II**

De forma general, <sup>(17)</sup> plantea que la utilización de las mezclas de diferentes sustratos favorece el proceso de fermentación, si se tiene en cuenta que se aprovechan los jugos de los filtros y el licor hidrolizado para la dilución de las mieles, aportando azúcares a la mezcla a fermentar.

Los balances se plantearon a partir del punto óptimo del diseño de mezclas realizado en, <sup>(17)</sup> en proporciones de 47,2% de miel, 17,8% de jugo de los filtros y 35% de hidrolizado de bagazo, alcanzándose para esas condiciones 5,26% alcoholílico. Para los balances se fijan las mismas condiciones de trabajo de la planta de etanol.

## **Desarrollo Alternativa III**

En las etapas de destilación-rectificación de alcohol se separan diferentes corrientes siendo las vinazas las que se obtienen en mayor cantidad. Por las

características que presenta se han desarrollado estudios que la consideran como medio de cultivo para el crecimiento de microalgas,<sup>(6)</sup> las que constituyen la materia prima principal para la obtención de biocombustibles de tercera generación como el biodiesel. Es por ello que aprovecharlas en este sentido presentaría un doble beneficio: mejorar la calidad de los vertimientos por la remoción de componentes contaminantes orgánicos e inorgánicos solubles y permitir el crecimiento de biomasa aprovechable para la obtención de diversos productos.<sup>(2)</sup>

La producción de biodiesel a partir de microalgas es un proceso conformado, en términos generales, por las etapas de producción de biomasa rica en lípidos, recuperación o cosecha de la biomasa, extracción de lípidos por vía mecánica y mediante la lixiviación con solventes orgánicos, y por último la transesterificación.

<sup>(18)</sup> El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. La mezcla obtenida es neutralizada con ( $H_2SO_4$ ) para evitar que el catalizador básico en exceso reaccione con los ácidos grasos libres, ya que se formarían jabones indeseados en el producto final. Por último, 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.<sup>(19)</sup>

Los balances para la producción de biodiesel se establecieron para una capacidad de 150 kg/día de biomasa de *Chlorella vulgaris*.

Las principales ecuaciones consideradas para la realización de los balances en cada alternativa se muestran de forma resumida en la tabla 4.

**Tabla 4.** Principales ecuaciones empleadas en los balances de las alternativas

ALTERNATIVAS	ECUACIONES
Alternativa I.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Producción de HB:</i></li> <li>▪ <i>Producción de alcohol 2G:</i></li> </ul>
Alternativa II.	
Alternativa III.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Producción de alcohol 1G:</i></li> </ul> <p>Ecuaciones planteadas en la tabla 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Producción de biodiesel 3G:</i></li> </ul>
Alternativa IV.	Ecuaciones empleadas en la Alternativa I y en la producción de biodiesel de 3G de la Alternativa III.
Alternativa V	Ecuaciones empleadas en la Alternativa II y en la producción de biodiesel de 3G de la Alternativa III.

## Resultados y discusión

### Producción de azúcar crudo y etanol por vía tradicional (1G)

Los principales resultados de los balances para la producción de azúcar crudo y de alcohol de 1G, se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.** Principales resultados en la producción de azúcar crudo y alcohol 1G

PROCESO	CORRIENTE	VALOR	UNIDAD
Producción de Azúcar	Agua de Imbibición	2300	t/día
	Caña pretratada	9200	
	Masa de bagazo	2300	
	Jugo de filtros	1380	
	Vapor generado	5779	
	Bagazo sobrante	809	
	Azúcar producida	809	
	Miel final	415,94	
Producción de alcohol	Miel de entrada	8020,83	Kg/h
	Agua para dilución	25786,56	
	Alcohol formado en fermentación	1810	
	Vinazas salida de la destiladora	37014,79	
	Alcohol superfino	1227,53	

### Desarrollo de las alternativas

En la Alternativa I al considerar el autoabastecimiento energético del central, el flujo de bagazo disponible para la producción de hidrolizado es de 800 kg/h, a partir de esta capacidad se realizaron los balances en las etapas de pretratamiento para la obtención del hidrolizado, así como en el proceso de obtención de alcohol en las etapas que se vieron afectadas por el uso de esta corriente.

Por otra parte, se desarrolló la Alternativa II, donde 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.

Para el caso de las alternativas IV y V se combinan los resultados de las dos primeras alternativas con la tercera. Los principales resultados para cada una se resumen en la tabla 6.

**Tabla 6.** Principales resultados de las alternativas

CORRIENTE	ALTERNATIVAS				
	I	II	III	IV	V
Producción de Azúcar					
Jugo de filtros (t/día)	Tabla 5	1236	Tabla 5	Tabla 5	1236
Vapor generado (t/día)		5779			5779
Bagazo sobrante (t/día)		809			809
Azúcar (t/día)		797,71			797,71
Producción hidrolizado de bagazo					
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (kg/h)	10	28	-	10	28
Agua total (kg/h)	4714,28	13182	-	4714,28	13182
Furfural (kg/h)	48	134,25	-	48	134,25
Vapor total (kg/h)	196,20	548,57	-	196,20	548,57
Etilanol (kg/h)	1262	3529,50	-	1262	3529,50
NaOH (kg/h)	18,03	50,42	-	18,03	50,42
Enzima (m <sup>3</sup> /h)	0,14	0,40	-	0,14	0,40
Glucosa en líquido HE (kg/h)	246,80	690,21	-	246,80	690,21
Líquido en HE (kg/h)	4230,54	11832,84	-	4230,54	11832,84
Sólido salida HE (kg/h)	192,26	537,80	-	192,26	537,80
Producción de alcohol					
Miel (kg/h)	7799,07	6280,71	Tabla 3.1	7799,07	6280,71
Miel en no zafra (kg/h)	-	7272,12		-	7272,12
Agua para dilución (kg/h)	20455,30	25786,56		20455,30	25786,56
Agua para dilución en no zafra (kg/h)	-	14702,42		-	14702,42
Alcohol total en fermentación (kg/h)	1041	1,75		1041	1,75
Producción de biodiesel					
Alga seca (kg/día)	-	-	150	150	150
Metanol (kg/día)	-	-	6,81	6,81	6,81
Glicerina (kg/día)	-	-	103,43	103,43	103,43
Biodiesel (kg/día)	-	-	81,67	81,67	81,67

Una de las principales ventajas que presenta el empleo de corrientes azucaradas en el proceso fermentativo es que permite un ahorro considerable en el consumo de miel y agua, como materias primas principales. Las alternativas II y V son las que logran menor consumo de miel, 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.

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.

## **Evaluación económica de los esquemas de biorefinería propuestos**

El cálculo de los indicadores se efectuó aplicando la metodología planteada en.<sup>(20)</sup>

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 7.

**Tabla 7. Análisis económico por alternativa**

Alternativa	I	II	III	IV	V
<b>Costo Total de Inversión (CTI) (\$)</b>					
Costo Equipos	2 548 346,80	2 972 093,60	2 242 549,35	2 685 262,15	3 109 008,95
Costos Directos	7 316 303,65	8 532 880,70	6 438 359,10	7 709 387,60	8 925 964,70
Costos Indirectos	4 828 760,40	5 631 701,30	4 249 317	5 088 195,80	5 891 136,70
<b>CTI (\$)</b>	<b>12 565 541,30</b>	<b>14 654 696,80</b>	<b>11 057 800,14</b>	<b>13 240 651,70</b>	<b>15 330 087,85</b>
<b>Costo Total de Producción (CTP) (\$/año)</b>					
Materia prima	36 851 274,60	37 939 165,55	36 936 217,90	36 855 965,60	37 939 219,70
Costos Variables	37 473 444,35	38 591 612,10	38 115 805,05	37 685 751,20	38 799 278,25
Costos Fijos	1 007 733,65	1 175 302,65	886 807,25	1 061 876,30	1 229 445,30
Gastos generales	1 649 201,20	1 709 926	1 665 766,05	1 662 614,25	1 723 145,70
<b>CTP</b>	<b>40 259 749,80</b>	<b>41 626 406,55</b>	<b>40 783 175,10</b>	<b>40 546 137,60</b>	<b>41 907 960,25</b>

Se determinaron los indicadores dinámicos de rentabilidad: VAN, TIR y PRD, con el objetivo de valorar la factibilidad de inversión de las alternativas propuestas; tomando una tasa de interés del 15%. Los resultados del cálculo para todas las propuestas se resumen en las tablas 8 y 9.

**Tabla 8. Valor de la producción y ganancias en cada alternativa**

Alternativa	I	II	III	IV	V
Valor de producción (\$/año)	46 697 682,85	47 735 104,20	48 112 168,55	47 127 361,10	47 735 104,20
Ganancia (\$/año)	5 636 358,85	5 173 835,25	6 623 606,80	5 736 583	4 849 215,30

**Tabla 9. Indicadores Dinámicos de Rentabilidad en cada alternativa**

Alternativa	I	II	III	IV	V
VAN (\$)	17 094 728	13 391 632,75	22 843 162,85	17 088 391,70	11 365 553
TIR (%)	35,8	29,5	45,2	34,9	27
PRD (años)	5,4	6,2	4	5,3	6,5

La alternativa V es la que presenta mayor periodo de recuperación, 6,5 años, la misma incluye mayor equipamiento pues considera la producción de hidrolizado de bagazo, empleo de jugo de los filtros y producción de biodiesel de 3G, además se ve afectada por una disminución en los productos principales obtenidos en el central al desviar el jugo de los filtros.

Las demás alternativas, excepto la segunda, son económicamente viables pues tienen periodos de recuperación menores de cinco años y medio. La inversión para producir alcohol de 1G y biodiesel de 3G es la más factible desde el punto de vista económico siendo la que más rápido se recupera. Sin embargo, al analizar diferentes esquemas de biorrefinerías y estudiar la integración de éstas, buscando mejor aprovechamiento de diferentes fuentes de biomasa y mayor obtención de productos y coproductos, la alternativa IV se hace factible ante estas condiciones pues solo se recupera nueve meses más tarde que la alternativa III.

## Conclusiones

1. La industria azucarera cubana constituye una industria potencial para la implementación de esquemas de biorrefinerías de primera, segunda y tercera generación que favorezcan la obtención de diferentes productos.
2. El empleo del hidrolizado de bagazo en las alternativas para la producción de alcohol logra una reducción en la demanda de miel, permitiendo que la destilería se abastezca con miel proveniente del central mayor periodo de tiempo, así como una disminución del consumo de agua en la etapa de fermentación.
3. La tecnología de producción de biodiesel de tercera generación consta de las etapas de extracción de aceite, transesterificación y purificación.
4. La mejor alternativa desde el punto de vista de integración de la industria azucarera en una biorrefinería es la que obtiene alcohol de segunda generación y biodiesel de tercera generación, siendo el central autoabastecido energéticamente (IV), con un VAN de \$ 17 088 391,70, una TIR de 34,9 % en un periodo de recuperación de 5,3 años.

## Referencias Bibliográficas

1. WYMAN, Charles. E. 2001. "Economics of a biorefinery for coproduction of succinic acid, ethanol, and electricity". *Abstracts of Papers of the American Chemical Society Part 1* [en línea]. 2001, U119-U119, [consultado 10 enero 2017].
2. KAFAROV, Viatcheslav., GONZÁLEZ, Angel D. "Biorrefinería basada en microalgas: temas a considerar". *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro* [en línea]. 2011, diciembre, 4 (4), 5-22. [Consultado 10 enero 2017]. ISSN 0122-5383
3. Manual sobre biorrefinerías en España. 2017. Disponible en: [http://www.bioplat.org/setup/upload/modules\\_docs/content\\_contURI\\_4020.pdf](http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_contURI_4020.pdf)

4. SALAZAR, Romina, CÁRDENAS, Gerónimo. "La bioeconomía y las biorrefinerías". *Avance agroindustrial* [en línea]. 2013, septiembre 34 (3), 31-34. [Consultado 11 diciembre 2016]. ISSN 0326-1131
5. ABELS, Christian, CARSTENSEN, Frederike, WESSLING, Matthias. "Membrane processes in biorefinery applications". *Journal of Membrane Science* [en línea]. 2013, octubre 444, 285–317. [Consultado 15 diciembre 2016]. ISSN 0376-7388.
6. 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 doctoral inédita, Universidad Industrial de Santander. Colombia, 2017.
7. TRIGO, E.J, Mentaberry, A., Cap E.J, Zelada, A. 2011. El potencial de la bioeconomía y las biorrefinerías en la Argentina. Agroindustria. Disponible en: [http://www.argentinainnovadora2020.mincyt.gob.ar/?wpfb\\_dl=25](http://www.argentinainnovadora2020.mincyt.gob.ar/?wpfb_dl=25)
8. 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* [en línea]. 2010, diciembre 9 (3), 261-283. [Consultado 15 diciembre 2016]. ISSN 1665-2738
9. GONZÁLEZ, E., CASTRO, E. Aspectos técnicos-económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de azúcar, España: ed. Universidad de Jaén, 2013, 163 p. ISBN: 9788484397434
10. ALBERNAS, Yailen., MESA, Layani., GONZÁLEZ, Erenio, GONZÁLEZ, Meylin. & CASTRO, Eulogio. Evaluación Económica de las Alternativas de pretratamiento para la producción de etanol a partir de bagazo. *Centro Azúcar* [en línea]. 2012, abril-junio, 39 (2), 58-64. [Consultado 25 enero 2017]. ISSN: 2223-4861
11. DANTAS, Guilherme A., LEGEY, Luis F.L., MAZZONE, Antonella. "Energy from sugarcane bagasse in Brazil: an assessment for productivity and cost of

- different technological routes". *Renew & Sustain Energy Reviews* [en línea]. 2013, mayo, 21, 356–364. [Consultado 25 enero 2017]. ISSN: 1364 0321.
12. 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, 3–14. Disponible en: [http://www.jurology.com/article/S0263-8762\(17\)30453-7](http://www.jurology.com/article/S0263-8762(17)30453-7).
13. MESA, L., ALBERNAS, Y., MORALES, M., CORSANO, G., GONZÁLEZ, E. Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery. , in: S.I. Mussatto (Ed.), Elsevier, 2016, 674 pp. ISBN: 978-0-12-802323-5.
14. ALBERNAS, Yailet, CORSANO, Gabriela, GONZÁLEZ, Meylin, GONZÁLEZ, Erenio. "Preliminary design for simultaneous saccharification and fermentation stages for ethanol production from sugar cane bagasse". *Chemical Engineering Research and Design* [en línea]. 2017, octubre, 126, 232–240. [Consultado 25 enero 2017]. ISSN: 0263 8762.
15. ALBERNAS, Yailet., CORSANO, Gabriela., MORALES, Marlen., GONZÁLEZ, Meylin., SANTOS, Ronaldo., GONZÁLEZ, Erenio. "Optimal design for an ethanol plant combining first and second-generation technologies". *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro* [en línea]. 2014, julio-diciembre, 5, No. 5, 97 – 120. [Consultado 16 febrero 2017]. ISSN: 0152 5383.
16. MESA, L. *Estrategia Investigativa para la Tecnología de Obtención de Etanol y Coproductos del Bagazo de la Caña de Azúcar*. Tesis doctoral inédita, Facultad de Química Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba, 2010.
17. 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 doctoral inédita, Facultad de Química Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba, 2012.

18. FERNÁNDEZ-LINARES, Luis C., MONTIEL-MONTOYA, Jorge, MILLÁN-OROPESA, Aarón, BADILLO-CORONA, Jesús A. "Producción de biocombustibles a partir de microalgas". *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable* [en línea]. 2012, serptiembre-diciembre, 8 (3), 101-115. [Consultado 16 febrero 2017]. ISSN: 1665 0441.
19. ARIAS, Marta T., MARTÍNEZ, Alfredo J., CAÑIZARES, Rosa O. "Producción de biodiesel a partir de microalgas: parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos". *Acta Biológica Colombiana* [en línea]. 2013, 18, No 1, 43-68. [Consultado 15 diciembre 2016]. ISSN: 1900 1649.
20. PETERS, M. S. and TIMMERHAUS, K. D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, McGraw-Hill International Editions, Fourth Editions, Colorado, 2006, 511 pp.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.