

Proyección del central “Dos Ríos” en una industria biorrefinera de segunda generación

Projection of the “Dos Ríos” sugar mill into a second-generation biorefinery industry

Elaine Ojeda-Armaignac^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9316-1545>

Yanet Cervantes-Blanco¹ <https://orcid.org/0000-0002-0619-4489>

Cleydi Marián Alvarez-Hernández¹ <https://orcid.org/0009-0005-2432-9016>

¹Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: eoa@uo.edu.cu

RESUMEN

Las características de la industria azucarera cubana posibilitan su transformación en una biorrefinería a partir de la caña de azúcar como fuente de energía, productos químicos y coproductos. En este trabajo se propone un esquema de biorrefinería en el Central “Dos Ríos”, a partir de la integración del bioetanol de primera y segunda generación. Las materias primas fundamentales son el bagazo y la miel, en proporciones de mezclas de 27,48 % de miel y 72,52 % de hidrolizado de bagazo, las cuales garantizan alcanzar 4,82 % alcohólico. El esquema tecnológico propuesto incluye un central azucarero y una destilería para la obtención de etanol de 1GL y 2GL, con autoabastecimiento energético del central, la cual consta de cuatro etapas: pretratamiento (hidrólisis ácida y básica), hidrólisis enzimática, fermentación y destilación. Los balances de materiales evidencian que se puede incrementar la producción de derivados, ya que existe disponibilidad de bagazo sobrante (26 304 kg/d), y de miel (79 016 kg/d) que garantice la producción de 500 hL/d de etanol. La combinación de estos sustratos reduce el consumo de agua para dilución y de miel en un 88,46% de su valor inicial, aportan azúcares a la fermentación, incrementan capacidades de producción no aprovechadas, así como la adaptación de la industria azucarera como una biorrefinería integrada.

Palabras clave: industria azucarera; biorrefinería; bioetanol; segunda generación.

ABSTRACT

The characteristics of the Cuban sugar industry make it possible to transform it into a biorefinery using sugarcane as an energy source, chemicals, and byproducts. This work proposes a biorefinery scheme at the Dos Ríos sugar mill, integrating first- and second-generation bioethanol. The main raw materials are bagasse and molasses, in blended proportions of 27,48 % molasses and 72,52,% bagasse hydrolysate, which guarantee a 4,82,% alcohol content. The proposed technological scheme includes a sugar mill and a distillery for obtaining 1GL and 2GL ethanol, with energy self-sufficiency for the mill. The scheme consists of four stages: pretreatment (acid and base hydrolysis), enzymatic hydrolysis, fermentation, and distillation. Material balances show that derivative production can be increased, as surplus bagasse (26,304 kg/d) and molasses (79,016 kg/d) are available, guaranteeing the production of 500 hL/d of ethanol. The combination of these substrates reduces dilution water and molasses consumption by 88,46 % of their initial value, contributes sugars to fermentation, increases untapped production capacity, and allows the sugar industry to adapt to an integrated biorefinery.

Keywords: sugar industry; biorefinery; bioethanol; second generation.

Recibido: 16/01/2025

Aceptado: 20/04/2025

Introducción

Los combustibles fósiles tienen una accesibilidad, compatibilidad y asequibilidad relativamente fácil, pero son recursos no renovables limitados que se consumen a un ritmo mucho mayor del que se producen. Además, la inestabilidad en su precio y suministro, junto con el aumento de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, han hecho cada vez más

necesaria la búsqueda de alternativas, tanto para el desarrollo de combustibles y energía, como para la elaboración de productos que sirvan como materia prima para otras industrias. ⁽¹⁾

En este contexto, la biomasa se posiciona como una fuente renovable de energía, y de carbono, como materia prima idónea para la producción de energía y productos químicos, dado su carácter renovable y su amplia distribución. Asociado a este nuevo planteamiento nace el concepto de biorrefinería. Según el Manual sobre las Biorrefinerías en España, 2017, ⁽²⁾ una biorrefinería se define como *“una industria integrada que, usando biomasa como materia prima y una variedad de tecnologías diferentes, produce energía y/o biocombustibles, a la par que productos químicos, materiales, alimentos y piensos”*.

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. ^(2, 3)

Los modelos de segunda generación comprenden el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, siendo el mayor exponente la biorrefinería de etanol celulósico, una de las más prometedoras dentro del panorama bioeconómico. ⁽⁴⁾

El Grupo Empresarial AZCUBA contempla entre sus objetivos estudiar y evaluar a escala industrial el impacto de la introducción de tecnologías que utilicen integralmente la caña de azúcar, como fuente de materias primas para productos químicos de alto valor agregado y biocombustibles en el concepto de biorrefinería, debido a las características de sus corrientes y sus facilidades para la obtención de diferentes productos, coproductos y energía.

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. ^(5,6,7)

En este contexto la Empresa Agroindustrial Azucarera “Dos Ríos” se inserta en la diversificación de su industria y la apertura de posibilidades para el desarrollo

de una biorrefinería, ya que tiene como eje central el proceso de producción de azúcar crudo, cuenta con una industria anexa para la producción de biofertilizante anexa, pero no posee destilería de alcohol.

En este trabajo se propone un esquema de biorrefinería, a partir de la integración del bioetanol de primera (1GL) y segunda generación 2(GL), empleando diferentes sustratos generados en el fraccionamiento de la caña de azúcar, para la transformación del Central “Dos Ríos” en una biorrefinería. La caracterización tecnológica de los procesos involucrados se realizó mediante los balances de masa y energía.

Materiales y métodos

Proyección de biorrefinería en una industria azucarera

La Empresa Agroindustrial Azucarera “Dos Ríos”, ubicada en el municipio Palma Soriano, en la provincia de Santiago de Cuba, Cuba, es una de las entidades que posee las facilidades de infraestructura para la adaptación de la industria azucarera a una biorrefinería, motivado por proyectos y programas del grupo azucarero AZCUBA, para potenciar la diversificación de este sector en el país. Dentro de sus instalaciones la empresa comprende un central de azúcar crudo, diseñado para una capacidad de producción de 4 600 t/d de caña, una fábrica de biofertilizante anexa, proyectada para una producción de 30 000 L, además posee terreno disponible para la ampliación.

En la presente investigación se propone una alternativa tecnológica, que tiene como objetivo lograr un aprovechamiento integral de corrientes derivadas del proceso azucarero, e integrar a esta industria como una biorrefinería de primera (1GL), y segunda generación (2GL).

Para lograr el desarrollo de la industria de la caña de azúcar en el concepto de biorrefinería se debe 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. ^(6,8)

El procedimiento seguido para el desarrollo paulatino de fábricas de azúcar como biorrefinería es el planteado por algunos autores,⁽⁶⁾ que considera recomendaciones específicas para la industria de la caña de azúcar en la formulación de oportunidades de negocios.

A continuación, de forma breve se describe tecnológicamente los procesos involucrados y se caracterizan partiendo de los balances de masa y energía, con el fin de conocer todas las corrientes y la disponibilidad que se pueda tener de las mismas para emplearlas en las demás producciones.

Producción de azúcar crudo

La propuesta tecnológica de biorrefinería tiene como proceso base la producción de azúcar crudo. El proceso de fabricación de azúcar comienza con la preparación de la caña que será alimentada a los molinos, cortando los tallos en pequeños pedazos, lo cual facilita la extracción del jugo con mayor eficiencia. En la molienda se obtiene el jugo, y como subproducto el bagazo, una parte del bagazo se usa como combustible para generar vapor y energía, y el bagazo sobrante se almacena en la casa de bagazo. El jugo proveniente de los molinos, pasa por las etapas de alcalización, clarificación, evaporación, cocción, cristalización y centrifugación, siendo esta la última en donde se obtiene el azúcar comercial y la meladura, subproducto utilizado frecuentemente para obtener alcohol mediante fermentación del azúcar remanente. ^(3,6)

Las ecuaciones principales utilizadas en los balances de materiales y energía para la producción de azúcar se muestran en la tabla 1.

Tabla 1- Ecuaciones principales utilizadas en los balances de materiales y energía para la producción de azúcar.

Proceso	Ecuaciones
Producción de azúcar crudo	$Agua\ imbibición + Caña = Bagazo + Jugo\ molinos$
	$Jugo\ de\ los\ filtros = 15\% * jugo\ molinos$
	$Vapor\ (G)\ generado\ en\ caldera\ (G_{caida}) = (G_{turbos} + G_{válvulareductora} + Gotros * Pérdidas$
	$Bagazo\ quemado\ (Bq) = \frac{G_{caida}}{Índice\ de\ Generación}$
	$Bagazo\ sobrante\ (Bs) = Bagazo - Bq$
	$Azúcar\ producida = Índice\ de\ cristalización + Masa\ de\ meladura$
	$Miel\ final = Índice\ de\ miel\ final + Masa\ de\ caña$

Proceso de obtención de etanol

Para la obtención de etanol, la tecnología desarrollada en el país utiliza como materia prima la miel del proceso de producción de azúcar crudo, por tanto, se

hace necesario estudiar la producción de alcohol por vía tradicional (a partir de mieles), que corresponde al alcohol de 1GL, antes de plantear los balances de masa para la producción del hidrolizado de bagazo. El proceso en general abarca tres etapas: preparación del mosto, fermentación y destilación-rectificación a través del cual se obtiene etanol extrafino a 96,30GL. ⁽⁶⁾

La miel diluida pasa a la etapa de prefermentación, que tiene como objetivo el crecimiento de la levadura que posteriormente se empleará en la fermentación alcohólica, lo cual se hace en presencia de nutrientes y aire que faciliten su crecimiento. Posteriormente se pasa a la fermentación, en esta etapa se añaden la levadura (*Saccharomyces Cerevisiae*), nutrientes (urea y fosfatos) y la miel diluida. En la etapa de fermentación es donde se adiciona el licor hidrolizado proveniente del proceso de hidrólisis del bagazo, para utilizarlo como una corriente azucarada, además contribuye a disminuir el contenido de agua en el proceso. La incorporación de este líquido hidrolizado en la obtención de etanol es lo que permite integrar el etanol de 1GL y 2GL, proceso que será descrito más adelante.

La batición fermentada se incorpora al sistema de destilación, que está compuesto por tres columnas: destiladora, rectificadora y repasadora. En la columna destiladora se obtienen las vinazas, que constituyen el residual principal del proceso y en la columna rectificadora el alcohol etílico rectificado a 94,5 °GL, además, en el fondo se obtiene una corriente de agua residual. ⁽³⁾

La miel utilizada como materia prima contiene aproximadamente 85°Brix y 48% de azúcares fermentables. Se asumió un rendimiento industrial de 44% y se emplearon las relaciones planteadas en la literatura. ⁽⁹⁾ Se considera trabajar con una destilería con capacidad de producción de 500 hL/d, al ser un modelo de destilería estandarizado en Cuba. Los balances de materiales y energía se realizaron en cada etapa del proceso empleando las ecuaciones reportadas en la literatura. ⁽¹⁰⁾ Las principales ecuaciones se presentan en la tabla 2.

Tabla 2- Principales ecuaciones utilizadas en los balances para la obtención de etanol.

Proceso	Ecuaciones
Disolutor	$Miel_{entrada} = \frac{Prod_{alcohol} * \rho_{alcohol}}{R} * ARF_{miel}$ $Miel_{diluida} * \circ B_{Md} = Me * \circ B_{Me} + L3 * \circ B_{L3}$ $Agua_{dilución} = Miel_{diluida} - Miel_{entrada} - L3$ $M_{diluida} = M_{entrada} + A_{dilución} + L3$
Fermentador	<p>Eficiencia fermentativa anaerobia de 78%</p> $F_{alcohol\ total} = F_{alcohol\ pre} + F_{alcohol\ ferm}$ $F_{CO2\ ferm} = AZ_{alcohol} * \% CO_2$
Columna destiladora	$F_{vino} + F_{vapor} = F_{vapores\ alcohólicos} + F_{vinaza}$ $F_{vino} * x_{F_{vino}} = F_{v.alcohólicos} * x_{F_{v.alcohólicos}}$

Obtención del hidrolizado de bagazo

La propuesta tecnológica contempla un esquema de segunda generación (2G), esto implica utilizar en mejor medida la biomasa lignocelulósica, no solo para producir energía, sino para aprovechar el contenido en glucosa y xilosa que contiene el bagazo. Por ello se propone disminuir el consumo de agua en la etapa de fermentación y usar la mezcla de sustratos azucarados formada por hidrolizado de bagazo y miel.

El proceso de obtención de etanol de (2GL), a partir de hidrolizado de bagazo, como se muestra en la figura 1, consta de cuatro etapas fundamentales: pretratamiento, hidrólisis enzimática, fermentación y destilación. ⁽¹¹⁾ La materia prima utilizada es el bagazo sobrante, que usualmente es destinado para la generación de vapor y electricidad, pero también constituye un residuo disponible para la producción de bioetanol de 2GL. ⁽¹²⁾

El pretratamiento del bagazo consta de dos etapas de hidrólisis: ácida y básica, para incrementar el balance global de los procesos de conversión posteriores. El objetivo del pretratamiento es romper la estructura de la fibra de lignocelulosa para facilitar el ataque enzimático, produciendo el fraccionamiento de la biomasa en sus componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina), la reducción de la cristalinidad de la celulosa y el aumento del área superficial accesible. ^(13,14)

En el pretratamiento ácido, la biomasa se somete a la acción de una solución de ácido sulfúrico al 2% en base a la fibra seca, en presencia de vapor a 175 °C y 9 atm con una relación sólido líquido de 1:4 kg/L, el tiempo de residencia de esta etapa es de 40 minutos. ⁽¹³⁾ En esta etapa se requieren altas temperaturas para lograr rendimientos aceptables en glucosa, lo que provoca a

su vez una mayor descomposición de los azúcares procedentes de la hemicelulosa, generando compuestos como el furfural, ^(13,14) se obtiene además, una corriente sólida con gran contenido en glucosa en forma de celulosa lista para pasar a la segunda etapa que también cuenta con la acción del vapor.

En la hidrólisis básica el sólido se trata con una solución de hidróxido de sodio al 3 % en base a fibra seca y etanol al 30 % v/v, a una temperatura de 185°C, la relación sólido- líquido es de 1:7 kg/L, el tiempo de residencia es de 60 min. Se considera que solo se pierde un 1% del etanol respecto a fibra seca, pues se incluye un sistema de recuperación del mismo por condensación.⁽¹³⁾ Posteriormente se realiza una filtración, en la que se obtiene una segunda masa sólida con una cantidad pequeña de lignina y una corriente líquida con un gran contenido de ésta.

La biomasa obtenida pasa a la etapa de hidrólisis enzimática, mediante la acción de enzimas celulasas por un término de 24 - 48 h y se lleva a cabo a 45 °C. Esta biomasa se filtra para emplear este líquido rico en glucosa como agente disolutor en la fermentación. De esta forma este hidrolizado rico en glucosa se incorpora al proceso tradicional de obtención de etanol como otra corriente azucarada en la fermentación, lo cual reduce el consumo de agua fresca y miel en el proceso. ⁽⁶⁾

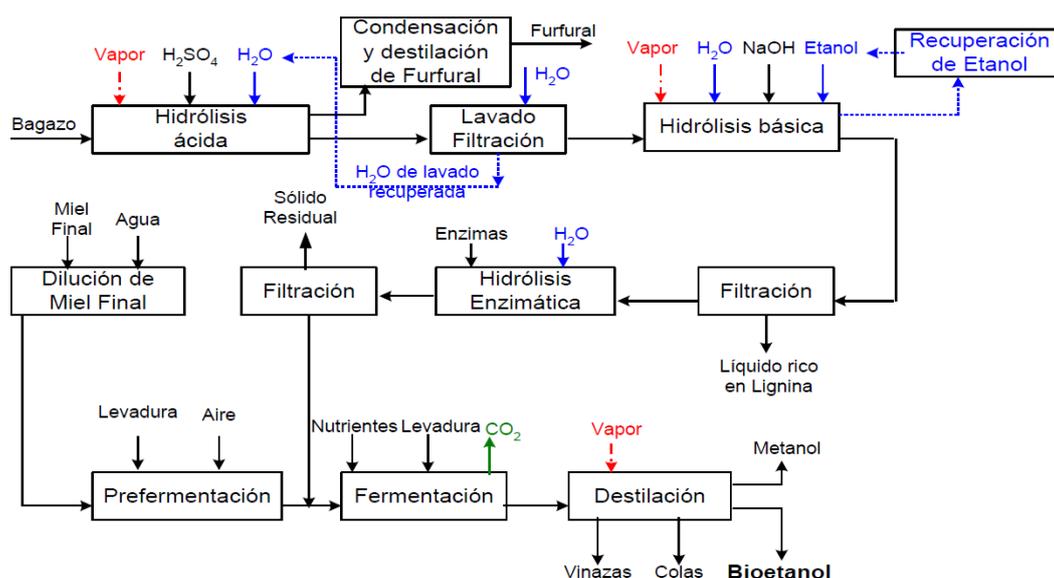


Fig. 1- Proceso de obtención de etanol empleando miel e hidrolizado de bagazo, por hidrólisis y fermentación separada. ⁽¹³⁾

A partir de la descripción tecnológica se plantean los balances de masa y energía para la obtención del hidrolizado de bagazo, con sacarificación y fermentación separadas. Se considera la disponibilidad de bagazo, garantizando el autoabastecimiento energético del central, y se tuvo en cuenta su composición como: 46,88% de glucosa, 29,66% de xilosa y 18,51% de lignina.⁽¹⁰⁾ Las principales ecuaciones empleadas en los balances para la producción del hidrolizado de bagazo fueron reportadas por la literatura ^(3,13) y aparecen en la tabla 3.

Tabla 3- Principales ecuaciones utilizadas en los balances para la obtención de hidrolizado de bagazo.

Proceso	Ecuaciones
Hidrólisis ácida	$A_{c.sulfúrico} = \frac{Bagazo\ inicial * \% Ac}{100}$ $A_{gua1} = H1 * B - Ac$ $Flujo\ vapor = \frac{qc}{\lambda_v}$ <p><i>E1: Eficiencia de recuperación de glucosa 75%</i></p> $S_{sólido\ 1er\ tratamiento} = G_{glucosaS1} + X_{xilosaS1} + L_{ligninaS1}$
Hidrólisis básica	<p><i>E2: Eficiencia de recuperación de glucosa 82%</i></p> $A_{gua\ 2} = S1 * H2 - Et - NaOH - A_{g1}$ $S_{sólido\ 2do\ tratamiento} = G_{glucosaS2} + X_{xilosaS2} + L_{ligninaS2}$
Hidrólisis enzimática	$F_{Agua} = F_{(Agua+Enzima)} - F_{Enzima}$ $Sólido_3 = G_{glucosaS3} + X_{xilosaS3} + L_{ligninaS3}$ $L3 = Glucosa13 + Xilosa13 + Agua13$

Resultados y discusión

En la tabla 4 se presentan los principales resultados de los balances de masa y energía realizados en el central.

Tabla 4- Principales resultados en la producción de azúcar crudo

Proceso	Corriente	Valor	Unidad
Producción de azúcar	Bagazo	1379,52	t/d
	Bagazo sobrante	131,52	
	Azúcar	427,68	
	Miel	329,45	
	Vapor producido en la caldera	2880,00	
	Electricidad Generada	6,6	MW
	Electricidad Consumida	5,8	
Electricidad Entregada al SEN	0,8		

Los resultados alcanzados muestran que el central produce 1 379 520 kg/d de bagazo, de este total de bagazo 131 520 kg/d constituye el bagazo sobrante, y la quinta parte de este bagazo sobrante (26 304 kg/d) es lo que se utiliza en el hidrolizado del bagazo. Además, se producen 79 016 kg/d de miel para 150 días de zafra, para cubrir la producción de etanol se necesitan 5 021,98 kg/d, lo que permite almacenar el resto de la miel para trabajar en tiempo de no zafra (73 994,02 kg/d). Este almacenamiento da una cobertura de operación a la destilería de 300 días al año.

Los balances de materiales evidencian que se puede incrementar la producción de derivados, ya que existe disponibilidad de bagazo y miel, que garanticen la generación de electricidad y la venta como materia prima para otros fines. Por tanto, estos subproductos pueden utilizarse con la finalidad de obtener 500 hL de etanol, quedando un excedente de ambos sustratos para el período de no zafra.

El uso de bagazo sobrante, para obtener el licor hidrolizado, permite disminuir el consumo de miel y agua en la fermentación, y aprovechar un residuo lignocelulósico con contenido de azúcares a fermentar. En la tabla 5 se muestran los principales resultados alcanzados para la obtención del hidrolizado de bagazo.

Tabla 5- Resultados de los balances para la obtención de hidrolizado de bagazo.

Etapa	Resultado		Valor	Unidad de medida
Hidrólisis ácida	Ac	ácido sulfúrico para el pretratamiento	526,08	kg/d
	Ag ₁	agua que entra en la etapa	104689,92	
	S ₁	sólido pretratado	19757,59	
	Mv	flujo de vapor	4404,46	
Hidrólisis básica	Et	etanol suministrado	41490,9432	kg/d
	NaOH	hidróxido de sodio suministrado	592,73	
	Ag ₂	agua que entra a la etapa	50118,43	
	S ₂	sólido pretratado	15510,47	
	Mv	flujo de vapor	2044,27	
Hidrólisis enzimática	F _E	flujo de enzima	4,8	m ³ /d
	F _A	flujo de agua	336,36	m ³ /d
	S ₃	sólido pretratado	6321,70	kg/d
	L3	Líquido salida hidrólisis enzimática	139100,38	

El líquido hidrolizado de bagazo obtenido en la hidrólisis enzimática (139 100,38 kg/d), es alimentado a la etapa de fermentación. Con los resultados del

proceso de hidrólisis se realizan los balances de materiales para la obtención de etanol de 1GL y 2GL, resultados que se muestran en la tabla 6.

Las proporciones de mezclas utilizadas (27,48 % de miel y 72,52 % de hidrolizado de bagazo) garantizan alcanzar 4,82 % alcohólico, valor que se encuentra en el rango de 4 - 6,5 % permitido para fermentaciones previas a la etapa de destilación de etanol. ⁽¹⁵⁾

Tabla 6- Resultados de los balances para la producción de etanol de 2GL

Equipo	Resultados		Valor	Unidad de Medida	
Disolutor	M_e	Miel para fermentación	43 527,27	kg/d	
	A_d	Agua de dilución	48 968,18		
Hidrolizado de bagazo	L_3	Hidrolizado de bagazo entrada al fermentador	139 100,38		
Fermentador	$F_{alcohol\ total}$	alcohol total producido	2 629,50		
	$F_{CO_2\ total}$	CO ₂ total producido	2 506,24		
	F_v	Vino	188 722,00		
	% alcohólico	Por ciento alcohólico	4,82		%
Columna de destilación	$F_{alcohol\ total}$	alcohol total producido	500		hL/d
	F_{vz}	Vinaza	385 120,00		kg/d

El proceso de fermentación se favorece con la utilización de las mezclas de diferentes sustratos, si se tiene en cuenta que se aprovecha el licor hidrolizado para la dilución de las mieles, además de aportar azúcares a la mezcla a fermentar, con un ahorro en el consumo de miel y agua, como materias primas principales. ^(16,17) En la tabla 7 se comparan los resultados obtenidos teniendo en cuenta el uso de miel y agua con hidrolizado, y sin hidrolizado de bagazo.

Tabla 7- Principales resultados obtenidos con los diferentes sustratos

Flujos necesarios	Unidad de medida	M	M+HB
Miel para fermentar	kg/d	43 527,27	5 021,98
Agua para dilución		127 589,32	14 720,66
Hidrolizado de Bagazo		-	139 100,38

El consumo de agua para dilución y de miel se reducen en un 88,46 % de su valor inicial cuando se realiza la fermentación con hidrolizado de bagazo como complemento. Las mezclas de sustratos permiten extender los días de

operación en la destilería en tiempo de no zafra, contribuyen a disminuir el consumo de miel y agua en la fermentación, aportan azúcares a la fermentación, incrementan capacidades de producción no aprovechadas, así como la adaptación de la industria azucarera como una biorrefinería integrada.

Conclusiones

La propuesta tecnológica de biorrefinería incluye la producción de azúcar y etanol de primera y segunda generación, el cual consta de cuatro etapas: pretratamiento (hidrólisis ácida y básica), hidrólisis enzimática, fermentación y destilación, aprovechando la combinación de los sustratos: miel y bagazo sobrante, generados en la producción de azúcar de caña.

Se corroboró con los balances de materiales que para la producción de 500 hL/d de etanol el central "Dos Ríos" cuenta con los flujos necesarios de los sustratos, garantizando la producción de bioetanol durante todo el año.

La combinación de estos sustratos permite un ahorro de miel y agua de dilución en un 88,46%, incrementando capacidades de producción no aprovechadas, y la adaptación de la industria azucarera como una biorrefinería integrada.

Referencias bibliográficas

1. CALDERÓN J, Lara A, CAMPOVERDE JA. Towards a Sustainable Future: Alternative Energy Policies and Perspectives. *SCT Proceedings in Interdisciplinary Insights and Innovations*. 2025; **3**(415). <https://doi.org/10.56294/piii2025415>
2. MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD. Manual sobre biorrefinerías en España. BioPlat. Plataforma Tecnológica de la Biomasa.. Gobierno de España, 2017. Disponible en: http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_contURI_4020.pdf
3. PÉREZ PAY, A., et al. Evaluación de tecnologías para la obtención de productos químicos de alto valor agregado y biocombustibles. *Universidad y Sociedad*. 2023. **15**(4), 138-153. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/372393631_Evaluacion_de_tecnologias_para_la_obtencion_de_productos_quimicos_de_alto_valor_agregado_y_biocombustibles
4. CHANDEL, A., & SILVEIRA, M.H.L. Advances in Sugarcane Biorefinery Technologies, Commercialization, Policy Issues and Paradigm Shift for

Bioethanol and By-Products. 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/C2015-0-02033-0>

5. ABELS, Christian, CARSTENSEN, Frederike, WESSLING, Matthias. "Membrane processes in biorefinery applications". *Journal of Membrane Science* [online]. 2013, **444**, 285–317. ISSN 0376-7388.

6. DE ARMAS-MARTINEZ, Ana Celia; et al. Proyección de una industria azucarera para transformarse en una biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación. *Tecnología Química* [online]. 2019, **39**(3), pp. 489-507. Disponible en:

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852019000300489&lng=es&nrm=iso. ISSN 2224-6185.

7. 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* [online]. 2010, diciembre **9** (3), 261-283. ISSN 1665-2738

8. 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

9. ALBERNAS, Yaillet., et al. Evaluación Económica de las Alternativas de pretratamiento para la producción de etanol a partir de bagazo. *Centro Azúcar* [online]. 2012, abril-junio, **39** (2), 58-64. ISSN: 2223-4861

10. ARMAS, A. C. de. Evaluación de esquemas de biorrefinerías de segunda y tercera generación en una industria azucarera cubana. Tesis doctoral. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. 2019.

11. ALBERNAS, Yaillet, et al. Preliminary design for simultaneous saccharification and fermentation stages for ethanol production from sugar cane bagasse. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2017, **126**, 232–240. ISSN: 0263 8762. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/39247/dx.doi.org/10.1016/j.chemd.2017.08.029>

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. ALBERNAS, Yaillet. Procedimiento para la síntesis y el diseño óptimo de plantas discontinuas de obtención de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar Tesis doctoral. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. 2013.

14. 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.

15. FABELO, J. A. "Estudio de la Etapa de Fermentación Alcohólica Utilizando Diferentes Sustratos". Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química, Santa Clara. 1998.

16. RODRÍGUEZ, R. Evaluación prospectiva para transformar una fábrica de azúcar en biorrefinería. Trabajo de diploma. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. 2016. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7334>

17. GUADALUPE LOPEZ, L.R. Optimización de la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica de *Jatropha platyphylla* Mull. CON *Kluyveromyces marxianus*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. 2022. Disponible en: <http://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1006/1302>

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Elaine Ojeda Armaignac: conceptualización, análisis formal, redacción, revisión y edición.

Yanet Cervantes Blanco: conceptualización, análisis formal, revisión.

Cleydi Marián Álvarez-Hernández: realización de cálculos, análisis formal.

Los autores aprobaron la versión final para su publicación.