

35

Fecha de presentación: mayo, 2022

Fecha de aceptación: agosto, 2022

Fecha de publicación: octubre, 2022

EVALUACIÓN ECONÓMICA

DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL CON UN ENFOQUE DE BIORREFINERÍA

ECONOMIC ASSESSMENT OF BIODIESEL PRODUCTION WITH A BIOREFINERY APPROACH

Diana D. Alcalá-Galiano Morell¹

E-mail: diana.galiano@reduc.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3081-8837>

Jesus A. Córdova López²

E-mail: jesuscordovaudg@yahoo.com.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9320-1033>

Hilda Oquendo Ferrer¹

E-mail: hilda.oquendo@reduc.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1705-5828>

Luis B. Ramos-Sánchez¹

E-mail: luis.ramos@reduc.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6403-1936>

¹ Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz. Camagüey. Cuba

² Universidad de Guadalajara. Jalisco. México

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Alcalá-Galiano Morell, D. D., Córdova López, J. A., Oquendo Ferrer, H., & Ramos-Sánchez, L. B., (2022). Evaluación económica de la producción de biodiésel con un enfoque de biorrefinería. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(S5), 352-361.

RESUMEN

En la actualidad el desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles, específicamente el biodiésel, tiene una gran importancia para la economía nacional. Esto se debe fundamentalmente a la necesidad de cambio de la matriz energética actual y a que puede ser empleado directamente en el sector del transporte automotor disponible en el país. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la factibilidad de la producción de biodiésel de segunda generación en un esquema de biorrefinería para la industria azucarera cubana. Este enfoque permite, además, la obtención de otros productos que ayudan a resolver problemas del desarrollo local. En este sentido, se consideró como caso de estudio una estructura tecnológica de biorrefinería para la empresa agroindustrial Siboney que permite, de manera factible, la producción de biodiésel y de otros productos comercializables. El esquema cuenta con nueve plantas y catorce productos. Los resultados resultaron muy favorables, con un VAN de 345 073 584,42 \$, una TIR de 74,10 % y un periodo de recuperación de la inversión de dos años. La rentabilidad del VAN resultó muy favorable y mostró que, por cada peso invertido, se obtienen 2,73 \$. Con el esquema propuesto, la ganancia de la fábrica se multiplicó 4,39 veces.

Palabras clave: biodiésel, biorrefinería, evaluación económica

ABSTRACT

Currently, the development of technologies for the production of biofuels, specifically biodiesel, is of great importance for the national economy. This is mainly due to the need to change the current energy matrix and to the fact that it can be used directly in the automotive transportation sector available in the country. The objective of this research is to evaluate the feasibility of the production of second generation biodiesel in a bio-refinery scheme for the Cuban sugar industry. This approach also allows obtaining other products that help solve local development problems. In this sense, a bio-refinery technological structure was considered as a case study for the agro-industrial company Siboney, which allows, in a feasible way, the production of biodiesel and other marketable products. The scheme has nine plants and fourteen products. The results were very favorable, with an NPV of \$345,073,584.42, an IRR of 74.10% and a payback period of two years. The NPV return was very favorable and showed that, for each peso invested, \$2.73 is obtained. With the proposed scheme, the factory's profit was multiplied 4.39 times.

Keywords: biodiesel, bio-refineries, economic evaluation

INTRODUCCIÓN

Cuba, país que actualmente tiene una producción de petróleo que apenas cubre la mitad de sus necesidades actuales anuales y que tiene pendiente un gran potencial de desarrollo económico, es muy sensible a los cambios que se esperan en los próximos 30 años. Dentro de las fuentes renovables de energía más extendidas en nuestro país, se encuentran: el aprovechamiento de la biomasa, la energía eólica y la energía fotovoltaica. En todos los casos, predomina como salida principal la generación de energía eléctrica, la que tiene algunas limitaciones estratégicas: primero, en un alto grado se basa en la compra de tecnologías establecidas internacionalmente, por lo que marcan un cierto grado de dependencia foránea que habría que analizar hacia el futuro, segundo, es una energía que resulta difícil de almacenar eficientemente, tercero no puede ser empleada directamente en el sector del transporte automotor actualmente disponible en el país y, cuarto, en el caso de la biomasa; quemarla directamente para generar energía implicaría dejar de producir una gran cantidad de productos que son de vital importancia para el futuro, un error que ya la humanidad cometió con el petróleo, (Li et al., 2021).

En este sentido surge el concepto de biorrefinería. El término abarca la integración de procesos y tecnologías para un uso eficaz de la biomasa como principal fuente de materia prima, logrando que las instalaciones operen de una manera sostenible y teniendo como objetivo principal su aprovechamiento más integral para generar un amplio espectro de productos y energía como: los biocombustibles líquidos y gaseosos, alimentos, medicamentos y productos varios para la industria y la vida cotidiana (Ahmad et al., 2020).

El desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles específicamente el biodiésel tiene gran importancia. Esto se debe fundamentalmente a la necesidad de cambio de la matriz energética y a que puede ser empleado directamente en el sector del transporte automotor disponible. El biodiésel, se obtiene fundamentalmente por la transesterificación del aceite y un alcohol, en presencia de un catalizador químico o enzimático. En la actualidad se apuesta por la catálisis enzimática debido a las desventajas que presenta la química como: la formación de jabón por la hidrólisis de los ácidos grasos se lleva a cabo a temperaturas relativamente altas, es necesario la neutralización del catalizador y, por lo tanto, se incurre en gastos de grandes volúmenes de agua y los procesos de separación del glicerol son más complejos. Por otro lado, el uso de enzimas (lipasas) como catalizador en la síntesis de ésteres, mejora la selectividad de la reacción, disminuyendo los rendimientos de los productos no

deseados y posibilita la utilización de aceites de menor calidad (Martínez-Ruiz et al., 2018).

A pesar de esto, existen pocos procesos industriales de producción de biodiésel por transesterificación enzimática. La principal limitación es el alto precio del biocatalizador. La lipasa usada está purificada y, a menudo, inmovilizada en soportes sólidos para mejorar la estabilidad de la enzima y permitir el reúso del biocatalizador. De esta manera, los costos de operación se incrementan, pero los procesos de recuperación del producto y del catalizador son más simples. Luego de someterse a procesos de extracción, purificación e inmovilización, la enzima sufre una disminución de la actividad enzimática global. Por consiguiente, la producción del biocatalizador es más cara (Martínez-Ruiz et al., 2018). Este párrafo no está muy clara la redacción

Existen reportes recientes en la literatura científica del uso de sólidos fermentados con actividad lipasa (SFS), directamente como catalizador en la reacción de transesterificación los cuales en su mayoría utilizan como soporte sólido el bagazo de la caña de azúcar (Aguieiras et al., 2019).

Esto, unido a las potencialidades de la industria azucarera cubana para transformarse en una biorrefinería que emplee integralmente la caña de azúcar como materia prima para generar un grupo de productos químicos y de biocombustibles como el biodiésel y el bioetanol, posibilitarían el desarrollo de una tecnología a escala industrial para la producción de biodiésel de segunda generación.

Sin embargo, en Cuba se ha trabajado mucho en la diversificación de la industria azucarera, pero aún no se aprovechan de forma eficiente todas las facilidades que brinda esta industria (Díaz de los Ríos, 2019), lo que permitiría la integración de otros procesos no considerados hasta el momento. En el caso del biodiésel, que enfrenta la fuerte competencia de los combustibles derivados del petróleo, su inserción en la industria azucarera podría ofrecer la posibilidad de resultar una producción más competitiva, al tiempo que genere interrelaciones productivas que favorezcan un desempeño más favorable del complejo de procesos integrados y de productos derivados, en la conformación de una biorrefinería dada. En este caso, en las condiciones productivas nacionales, resulta importante poder contar con un procedimiento que permita elegir entre disímiles productos, cuál integrar y qué cantidad producir de cada uno de ellos, para maximizar el beneficio socioeconómico resultante. En síntesis, el objetivo es evaluar la factibilidad de la producción de biodiésel de segunda generación en un esquema de biorrefinería para la industria azucarera cubana.

DESARROLLO

Posibilidades como biorrefinería de la industria azucarera cubana

El bagazo de la caña de azúcar es el principal residuo de la industria azucarera, el cual se emplea fundamentalmente en la generación de energía térmica y eléctrica y, en plantas de derivados. Es un material fibroso y su composición química es 41-52 % de celulosa, 25-30 % de pentosanos y 18-25 % de lignina (Hernández et al., 2017).

Entre los diferentes productos que se pueden obtener a partir del bagazo se encuentran: la celulosa, hidrolizados azucarados, el furfural, el etanol, el carbón activado, alimento para el ganado, tabloncillos aglomerados y moldeados, plásticos como el acetato de celulosa o rayón, y relleno en plásticos, así como concreto y otros materiales de la construcción (Longati et al., 2020). La utilización del bagazo como fuente de biomasa, es una alternativa muy viable en regiones y países productores de azúcar de caña.

La producción de azúcar es uno de los procesos más comunes y en varios países tiene un lugar importante en la economía y el desarrollo del país. En el caso de Cuba la producción de azúcar constituyó históricamente el sector principal de la economía. En los últimos años, sin embargo, se ha visto afectada fundamentalmente por dos razones: la variabilidad de la actividad agrícola, cuyos rendimientos dependen de las condiciones climáticas y las características del cultivo y la llegada en tiempo al país de los insumos necesarios. Esta variabilidad afecta, tanto la cantidad como la calidad de la caña de azúcar a procesar, lo que repercute en los rendimientos finales y afecta sensiblemente la planificación de las actividades a nivel operativo, táctico y estratégico (Novoa González, 2020).

En estos momentos, la mayoría de los centrales azucareros cubanos pueden considerarse como biorrefinerías de primera generación. Donde su producción principal es el azúcar, pero en algunos de ellos, además se produce alcohol y otros productos a partir del bagazo, miel final y cachaza dirigidos fundamentalmente a la producción de alimento animal y energía. La recuperación de este sector trae consigo el desarrollo, no solo de la producción de azúcar, sino también de los derivados, lo que constituye una solución sostenible para la reducción de la dependencia energética de las fuentes fósiles, además de contribuir a que la economía del ingenio sea más eficiente (Furtado et al., 2019).

En el país, se han trazado disímiles esquemas de obtención de productos a partir de la caña de azúcar, que de

una u otra forma tributan a una biorrefinería. Estos productos se han elaborado de acuerdo con los intereses de cada región, disponibilidad de mercado y facilidades para su desarrollo. Las biorrefinerías representan una alternativa con potencial para aumentar la eficiencia de la industria azucarera cubana, en cuanto a generación de energías renovables y al aprovechamiento de la biomasa de caña de azúcar y resolver problemas en las localidades alejadas a los centrales. Aunque sin dudas en Cuba, todavía es necesario superar aspectos técnicos y económicos, que pueden estar relacionados con el tratamiento previo, catálisis (heterogénea y enzimática), separación, cinética del proceso y proceso de integración de instalaciones existentes. Mientras que, desde el punto de vista económico, se encuentran los concernientes a la logística de las materias primas, la integración de procesos en la infraestructura existente y, la reducción de los costos de producción (González Suárez et al., 2020).

El diseño de un complejo productivo integrado en lo que se ha dado en llamar bajo el concepto de biorrefinería, requiere de la solución del problema de optimización de la síntesis de procesos integrados altamente no lineales, una tarea muy compleja que requiere la elaboración de modelos matemáticos representativos de cada planta involucrada. El análisis de la literatura ha evidenciado la poca existencia de trabajos en ese sentido. De Armas Martínez (2019), realizó una evaluación de esquemas de biorrefinería de segunda y tercera generación en una industria azucarera cubana, utilizó como función objetivo maximizar la ganancia global del esquema de biorrefinería. Este trabajo muestra cómo es posible a partir de la biomasa la caña, el bagazo sobrante y las microalgas obtener una variedad de productos. Sin embargo, económicamente solo lograron rentabilidad de forma independiente en la producción de etanol, aunque el esquema integrado sí resulta rentable para los dos períodos de zafra analizados. Esto es indicativo de que es necesario explorar una mayor cantidad de productos y materias primas en el caso del biodiésel que permitan llegar a soluciones más factibles.

Fundamentación y esquema general

Sobre esta base, hay muchos productos que se pueden obtener a partir del bagazo de la caña de azúcar como: la celulosa, el furfural, el etanol, el carbón activado, los alimentos para el ganado, los tabloncillos aglomerados y moldeados, plásticos como el acetato de celulosa o el rayón, y rellenos en plásticos, así como el concreto y otros materiales de la construcción (Katakajwala et al., 2019).

En este sentido, se propone evaluar la producción de biocombustibles de segunda generación en medio de una

Diseño óptimo de la estructura tecnológica de la biorrefinería

En el trabajo de (Alcala-Galiano Morell, 2022) se elaboró un modelo físico de la biorrefinería compuesto por los balances de masa y energía que permitieron calcular el consumo de las materias primas o de los productos de cada una de las plantas, según fuera el caso, así como el consumo de vapor.

Se confeccionó también un modelo económico de la biorrefinería que permitió calcular el costo total de producción (CTP) y el valor total de la producción (VTP) de cada una de las plantas en \$/d. Con estos dos elementos, se calculaba la ganancia. Los costos de producción se estimaron a partir del costo de las materias, según el método C (Peters & Timmerhaus, 1991) por ser este un método reconocido y sencillo, apropiado para tareas de síntesis de procesos, las que conllevan un gran volumen de cálculos iterativos. En algunos casos especificados se usaron los costos reportados en las fichas técnicas del central.

Haciendo uso de ambos modelos, se elaboró una tarea de optimización, la que fue resuelta en una estructura de programación no lineal con restricciones, haciendo uso del programa Matlab. El nivel óptimo de las 17 variables y las capacidades productivas de los productos en la solución óptima se muestran en la tabla 1 y tabla 2, respectivamente.

Tabla 1. Valores óptimos de las variables estudiadas (Alcala-Galiano Morell, 2022)

No.	Variable	UM	Valor óptimo
1	Potencia eléctrica	MW	2,82
2	Producción de Bagacillo Miel Urea	t/d	26,39
3	Producción de hongo comestible	t/d	1
4	Producción de extracto de lipasas	t/d	20
5	Fracción de bagazo para bioetanol	$t_{\text{Bagazo}}/t_{\text{BagazoTotal}}$	0,23
6	Producción de bloques multi nutricionales	t/d	0
7	Producción de bagazo hidrolizado	t/d	0
8	Producción de BAGAMÉS	t/d	0
9	Tiempo de residencia (Reactor biodiésel)	h	118,46
10	Temperatura (Reactor biodiésel)	°C	30,28
11	Fracción de miel final para vender	$t_{\text{Miel}}/t_{\text{MielProducida}}$	0,69
12	Fracción de bioetanol para vender	$t_{\text{EtanolVendido}}/t_{\text{EtanolProducido}}$	0
13	Velocidad de dilución (Hidrólisis enzimática)	1/h	0,26
14	Sólidos reciclados (hidrólisis enzimática)	$\text{Flujo}_{\text{reciclado}}/\text{Flujo}_{\text{Total}}$	0,79
15	Azúcares iniciales (Fermentación alcohólica)	g/L	80,98
16	Temperatura (Fermentación alcohólica)	°C	38
17	Velocidad de dilución (Fermentación alcohólica)	1/h	0,1

Tabla 2. Capacidades productivas óptimas, calculadas para los principales productos que conducen a una máxima ganancia de la empresa (Alcala-Galiano Morell, 2022)

Planta	Productos	UM	Cantidad
Central	Azúcar	t/d	164,29
	Miel final vendida	t/d	39,71
	Electricidad vendida	MW h/d	12,85
BMU	Bagacillo Miel Urea	t/d	26,39
HC	Hongo comestible	t/d	1
Bioetanol	CO ₂	t/d	3,72
	Levadura residual	t/d	1,77

Lipasas	Extracto líquido	t/d	20
Biodiésel	Biodiésel	t/d	30494
	Glicerol	L/d	2012,2
Cemento	Cemento puzolánico	t/d	57,60
Biogás	Electricidad	MW h/d	59,45
	Bioabono	t/d	8,52
BRE	Bagazo Residual Enriquecido	t/d	125,66

Evaluación de los indicadores de eficiencia de las inversiones

La ganancia obtenida por el esquema de biorrefinería estudiado es de 1 013 257,59 \$/d, es válido destacar que este valor multiplica el desempeño económico de la empresa aumentando la ganancia unas 4,39 veces.

Otro aspecto importante es el hecho de que la planta con mayor aporte a la ganancia total fue la de producción de biodiésel. Esto se debe fundamentalmente, a la disminución del costo de producción del biodiésel debido a que se utiliza como catalizador un sólido fermentado seco (SFS) que es muy barato y un aceite de producción nacional, el aceite de *Jatropha curcas*, que son los elementos que más influyen en el costo. Por otro lado, se tomó como precio del biodiésel 14,59 CUP/L o su equivalente de 0,61 USD/L, valor al cual la empresa Siboney compra el diésel, dato este suministrado por el departamento económico del central. En la actualidad el precio del biodiésel se reporta en 5,58 USD por galón (1,47 USD por litro), muy superior al producido en la biorrefinería nacional, lo que evidencia la competitividad de esta planta y reafirma los beneficios económicos del uso del biocatalizador nacional en la síntesis de biodiésel.

Es válido destacar, además, que el biodiésel producido permite suplir la demanda de diésel de la empresa aproximadamente 15 veces. Esta producción se logra con un consumo de 27 506 L/d de aceite de *Jatropha curcas*. En la actualidad, en Cuba, en la región de Guantánamo existe una pequeña planta de producción de este aceite perteneciente a LABIOFAM, con rendimientos de 301,35 litros de aceite por hectárea. Esto significa que se necesitaría sembrar once mil hectáreas para suplir la demanda anual de la biorrefinería. Si comparamos este valor con las 894 mil hectáreas de tierras ociosas disponibles en Cuba¹ sería una producción posible e implicaría darles uso a tierras ociosas y con menor calidad. Sin embargo, se han encontrado reportes de plantaciones en Argentina, donde se logra un rendimiento de 1 419 litros de aceite

por hectárea, por lo que aumentar los rendimientos en Cuba es una tarea ineludible si se desea que estas producciones sean sostenibles y no compitan con la alimentación humana o animal.

El bioetanol producido en la solución óptima fue destinado totalmente a las producciones de biodiésel. Esto fue debido al bajo precio acordado nacionalmente para el etanol en el sector azucarero. Este etanol de origen lignocelulósico requeriría de un precio diferenciado si se deseara estimular su producción como biocombustible, una de sus aplicaciones importantes cuando se mezcla con gasolina.

Otro de los productos, que destaca es la electricidad producida a partir del biogás disponible. Con este derivado, se estimó que se puede producir una potencia eléctrica estimada de 2,9 MW, que equivale a producir más de 4,6 veces la cantidad que entrega el central actualmente al SEN. Por eso es por lo que esta planta es una de las que mayor ganancia aporta al complejo productivo. El uso del biogás para la producción de electricidad está reportado como una de las aplicaciones más beneficiosas de este biocombustible, además, de ser un tema de gran actualidad.

El resto de las producciones tiene impacto en la alimentación animal, con productos como crema de levadura, el bagacillo miel urea y el bagazo residual enriquecido, lo cual puede impactar directamente en las producciones de carne y leche teniendo en cuenta que este central se encuentra en la cuenca lechera de la provincia de Camagüey.

En la alimentación humana se incluyó el hongo comestible. Este es un producto con un alto contenido de proteínas y su consumo trae beneficios para la salud humana (Pineda Insuasti, 2014). En el diseño, el nivel óptimo se extendió hasta el límite superior considerado. Esto indica que es posible producir aún más, pero para esto se necesita hacer un estudio de demanda, teniendo en cuenta que este producto no está en la dieta tradicional del país.

El crudo enzimático, por su parte, tiene múltiples aplicaciones en la fabricación de detergentes biodegradables, en la industria de la leche y los quesos, en las panaderías para mejoramiento de sabores, la industria de bebidas, la producción de biodiésel, entre otros (Cujilema Quitio, 2018). Este es otro producto que necesitaría de un estudio de mercado, pues el país importa esta enzima para las pocas producciones actuales en las que se utiliza. El óptimo se colocó también en el límite superior, por lo que admite posiblemente mayores producciones.

¹ Información sacada del Periódico Granma del 6 de agosto de 2018. Periodista Lissy Rodríguez Guerrero.

Centro de Investigación Indio Hatuey³, de la Universidad de Matanzas, para la construcción de dos grandes digestores de biogás, a instalar en esta provincia. Estos precios se multiplicaron por 24, que es el valor oficial del dólar norteamericano en Cuba.

En la Tabla 3, se muestran los principales resultados económicos de la biorrefinería, que fueron utilizados para el cálculo de los indicadores de eficiencia de la inversión. En el caso de las ventas y el costo de producción no se tuvo en cuenta el aporte del central para evaluar solamente la factibilidad de la ampliación.

La efectividad económica de la inversión de la biorrefinería se determinó a partir de los indicadores dinámicos Valor actual neto (VAN), Tasa interna de rendimiento (TIR), Período de recuperación al descontado (PRD) y Rentabilidad del Van (RVAN), que se calcularon para 10 años como horizonte de planeación y una tasa de interés del 15 %.

Tabla 3. Resumen de los principales resultados económicos de la biorrefinería

Descripción	UM	Biorrefinería
Costo de producción (ampliación)	\$/a	353 374 609,20
Ventas (ampliación)	\$/a	447 281 520,00
Ganancia (ampliación)	\$/a	93 906 910,80
Costo total del equipamiento	\$	77 200 901,07
Costo de inversión	\$	126 223 473,25

En la Tabla 4 se muestran los indicadores económicos de la factibilidad de la inversión para la biorrefinería. Como se observa los resultados obtenidos son favorables con un VAN positivo y elevado, una TIR mayor al por ciento de interés bancario y un periodo de recuperación de la inversión de dos años. La rentabilidad del VAN indicó que, por cada peso invertido, se obtienen 2,73 \$. Con estos resultados se demuestra que la propuesta de producción de biocombustibles, específicamente biodiésel, en un contexto de biorrefinería aplicado a un central azucarero pequeño, productor de alimentos fundamentalmente, es económicamente viable, además de dar soluciones a problemas locales.

Tabla 4. Indicadores económicos de la factibilidad de la inversión para la biorrefinería

VAN (\$)	345 073 584,42
TIR (%)	74,10

3 Información ofrecida gentilmente por el Dr. C. Luis Cepero, de Indio Hatuey

RVAN (\$/\$)	2,73
PRD (años)	En el segundo año

Impacto preliminar de estas producciones en el territorio

Las nueve plantas resultantes en la solución óptima final generan nuevos empleos para el municipio, un nivel mayor de ingresos que se traducirá en una mayor satisfacción de las necesidades de muchas familias.

La producción de biodiésel puede cubrir los gastos fundamentales del parque automotor de la industria, pudiendo liberarse el petróleo para movimientos de la población y otros sectores del municipio. Al mismo tiempo, al provenir el biodiésel de una fuente renovable, no fósil, la utilización de este biocombustible haría mucho más ecológica a las producciones cañeras, aspecto este muy significativo en este sector.

Se proponen alimentos que mejoran el déficit existente para el ganado en el municipio y provincia y que después se traduce en un incremento de leche y carne para la población.

Se propone el cemento puzolánico que puede ser una solución local para cubrir la escasez de cemento y poder acometer nuevas construcciones con una adecuada calidad.

CONCLUSIONES

Este análisis, mostró cómo, aparte de sus beneficios económicos, la producción de biodiésel en el marco de una biorrefinería tiene aportes sociales, al contribuir al desarrollo local. Adicionalmente, para Cuba representa una alternativa sostenible en los esfuerzos por la sustitución del petróleo. El biodiésel es un producto que puede utilizarse directamente en el parque automotor existente sin necesidad de realizar modificaciones a los motores e incluso puede combinarse con el diésel del petróleo.

Las inversiones propuestas generan nuevas fuentes de empleo, mayor satisfacción de las necesidades de la población y permitirán resolver problemas locales.

Dentro de los factores más importantes para la rentabilidad de la producción de biodiésel está el uso de un biocatalizador producido en la propia fábrica, la baja temperatura a la que ocurre la síntesis, así como el uso de un aceite barato de origen nacional, lo que permite una tecnología renovable e independiente totalmente, de factores externos al país, lo que reduce el impacto ambiental de esta tecnología.

Hay que destacar, además, el notable incremento de las producciones de energía eléctrica, casi 3 MW de

potencia, generadas con motores que consumen el biogás producido con la cachaza y la vinaza de la nueva biorrefinería.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguieiras, E. C. G., Barros, D., Fernandez-Lafuente, R., & Freire, D. M. G. (2019). Production of lipases in cottonseed meal and application of the fermented solid as biocatalyst in esterification and transesterification reactions. *Renew Energy*, *130*, 574–581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.095>
- Ahmad, B., Yadav, V., Yadav, A., Ur Rahman, M., Zhong Yuan, W., & Wang, X. (2020). Integrated biorefinery approach to valorize winery waste: A review from waste to energy perspectives. *Science of The Total Environment*, *719*, 1-9.
- Alcala-Galiano Morell, D. D. (2022). *Evaluación de la producción de biodiésel en un ambiente de biorrefinería azucarera*. (Tesis Doctoral). Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz.
- Cujilema Quitio, M. C. (2018). *Diseño de un proceso a escala piloto para la producción de lipasas por fermentación sólida*. (Tesis doctoral). Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz.
- De Armas Martínez, A. C. (2019). *Evaluación de esquemas de biorrefinería de segunda y tercera generación en una industria azucarera cubana*. (Tesis doctoral). Universidad Central Marta Abreu. Cuba.
- Díaz de los Ríos, M. (2019). *El procesamiento de la caña de azúcar con esquemas flexibles y énfasis en la alimentación, la energía y la preservación del medio ambiente* Taller "El azúcar y su contribución al desarrollo económico y social del país", La Habana, Cuba.
- Furtado, J., Escobar, J. C., Coradi, R., Silva, E., Loureiro da Costa, J. E., Martínez, A., & Almazán, O. (2019). Biorefineries productive alternatives optimization in the brazilian sugar and alcohol industry. *Applied energy*, *259*, 2-19.
- González Suárez, E., De Armas Martínez, A. C., Kafarov, V. V., Miño Valdés, J. E., Galindo Llanes, P., & Ramos Miranda, F. (2020). Propuestas de desarrollo de instalaciones de la industria de la caña de azúcar como biorrefinerías. *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica. Claves para el desarrollo*, *6*, 321-328.
- Hernández, A., González, V. M., & Freide, M. L. (2017). Aprovechamiento de las posibles fuentes de biomasa para entregar más electricidad en la fábrica de Azúcar Antonio Sánchez. *Centro Azúcar*, *44*, 88-97.
- Katakojwala, R., Naresh Kumar, A., Chakraborty, D., & Venkata Mohan, S. (2019). Valorization of sugarcane waste: Prospects of a biorefinery. In M. N. Vara Prasad, P. J. de Campos Fava, M. Vithanage, & S. Venkata Mohan (Eds.), *Industrial and Municipal Sludge*. (pp. 47-60). Butterworth-Heinemann.
- Klein, B. C., Ferreira Chagas, M., Lopes Junqueira, T., Alves Ferreira Rezende, M. C., Cardoso, T. d. F., Cavalett, O., & Bonomi, A. (2018). Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied energy*, *209*, 290-305.
- Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., . . . Zhao, Y. (2021). Review and outlook on the international renewable energy development. *Energy and Built Environment*, *1*, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.12.002>
- Longati, A. A., Batista, G., & Goncalves Cruz, A. J. (2020). Brazilian integrated sugarcane soybean biorefinery: Trends and opportunities. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *26*, 100400-100425.
- López González, L. M., Pereda Reyes, I., & Romero Romero, O. (2017). Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Waste Management*, *68*, 139-145.
- Martínez-Ruiz, A., Tovar-Castro, L., García, H. S., Saucedo-Castañeda, G., & Favela-Torres, E. (2018). Continuous ethyl oleate synthesis by lipases produced by solid-state fermentation by *Rhizopus microsporus*. *Bioresource Technology*, *265*, 52-58.
- Novoa González, A. (2020). Importancia estratégica de la agroindustria azucarera en Cuba. *Inter Press Service en Cuba*, *14*.
- Ouedraogo, M., Sawadogo, M., Sanou, I., Barro, M., Nassio, S., Seynou, M., & Zerbo, L. (2022). Characterization of sugar cane bagasse ash from Burkina Faso for cleaner cement production: Influence of calcination temperature and duration. *Results in Materials*, *14*(100275), 1-11.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (4ta ed.). McGraw-Hill International Editions.

Pineda Insuasti, J. A. (2014). *Desarrollo de una tecnología para la producción a pequeña escala de la biomasa del hongo ostra (Pleurotus ostreatus)*. (Tesis Doctoral). Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz".

Vandenberghe, L. P. S., Valladares-Diestra, K. K., Bittencourt, G. A., Zevallos Torres, L. A., Vieira, S., Karp, S. G., . . . Soccol, C. R. (2022). Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167.