

Artículo Original

PROPUESTA DE UNA PLANTA DE BIODIESEL Y ALCOHOLES DE ALTO PESO MOLECULAR PARA UNA INDUSTRIA AZUCARERA

PROPORSAL FOR A BIODIESEL AND HIGH MOLECULAR WEIGHT ALCOHOLS PLANT FOR A SUGAR INDUSTRY

Fernando Ramos Miranda¹ <https://orcid.org/0000-0002-0601-6228>
Lirianet Fuentes Ramírez^{2*} <https://orcid.org/0009-0001-2318-5920>

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos
"Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Abril 13, 2026; Revisado: Abril 25, 2026; Aceptado: Mayo 9, 2026

RESUMEN

Introducción:

La industria azucarera en Cuba se encuentra atravesando un proceso de reordenamiento y redimensionamiento para alcanzar mayores beneficios, tecnológicos, económicos y ecológicos, impuestos por las condiciones económicas y medio ambientales en que se desarrolla actualmente. Se han desarrollado propuestas de biorefinerías en la industria azucarera, siendo una herramienta para disminuir los consumos de energía y los vertimientos de residuales contaminantes al medio ambiente en los procesos.

Objetivo:

Evaluar la factibilidad técnica y económica de la producción de biodiesel y alcoholes de alto peso molecular a partir de la cachaza generada en una fábrica de azúcar.

Materiales y Métodos:

Se realizó una evaluación de diferentes tecnologías y se tuvo en cuenta las normas de control de la calidad existentes de estos productos a implementar en la fábrica. Se analizó la factibilidad desde el punto de vista económico, ambiental y social. El proyecto se llevó a cabo mediante la aplicación de la metodología planteada por



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Lirianet Fuentes, Email: lframirez@uclv.edu.cu



(Ramos, 2014). Se propuso la tecnología planteada por (Albernas, 2007) que permite la obtención y/o desarrollo del biodiesel a partir de cachaza.

Resultados y Discusión:

Se determinó que la mejor alternativa evaluada es la VI, la cual propone la producción de biodiesel, por lotes con catalizador NaOH, a escala industrial, con AAPM. Se reportaron valores de, un TIR de 56 %, con un tiempo de recuperación de 3,4 años y un VAN de \$2 279 512,35

Conclusiones:

La inversión propuesta es económicamente factible para la empresa, ya que la misma aporta beneficios económicos.

Palabras clave: alternativas; biodiesel; tecnología; transesterificación.

ABSTRACT

Introduction:

The sugar industry in Cuba is undergoing a process of restructuring and resizing to achieve greater technological, economic, and ecological benefits, imposed by the current economic and environmental conditions. Proposals for biorefineries have been developed within the sugar industry, serving as a tool to reduce energy consumption and the discharge of polluting residues into the environment in industrial processes.

Objective:

To evaluate the technical and economic feasibility of producing biodiesel and high molecular weight alcohols from filter cake generated in sugar factory.

Materials and Methods:

An evaluation of different technologies was carried out, taking into account existing quality control standards for these products to be implemented in the factory. The feasibility was analyzed from an economic, environmental, and social perspective. The project was conducted by applying the methodology proposed by (Ramos, 2014). The technology outlined by (Albernas, 2007), which enables the production and/or development of biodiesel from filter cake, was suggested.

Results and Discussion:

It was determined that the best alternative evaluated is VI, which proposes the production of biodiesel, in batches with NaOH catalyst, on an industrial scale, with HMWA (High Molecular Weight Alcohols). Values of an IRR of 56%, with a payback period of 3.4 years and a ROR (Return on Investment Index) of \$ 2 279 512.35 were reported.

Conclusions:

The proposed investment is economically feasible for the company, as it provides economic benefits.

Keywords: alternatives; biodiesel; technology; transesterification.

1. INTRODUCCIÓN

También denominado biogasóleo o diéster, es un combustible diesel producido a partir de materias de base renovables, como los aceites vegetales, que se puede usar en los motores diesel. En el contexto actual de transición energética, los biocombustibles de segunda generación cobran especial relevancia para reducir la dependencia de combustibles fósiles (Suhara et al., 2024; El-Araby, 2024).

En el mundo, actualmente, existen varias formas o alternativas para la producción del biodiesel. Estas se basan fundamentalmente en la elección de las diferentes materias primas y en el uso de metanol o etanol (Figueredo, 2016). El biodiesel se obtiene de diversos tipos de materias primas como son: aceites vegetales, aceites de freír usados, grasas o sebos de animales y ceras (Maheshwari et al., 2022).

En Cuba, resulta muy atractivo utilizar el aceite presente en la cachaza, residuo de la industria azucarera, debido a su gran disponibilidad y fácil extracción del aceite contenido en ella. Estudios recientes han caracterizado en detalle la composición lipídica de la cachaza cubana, confirmando su potencial. Para la producción de biodiesel existen dos alternativas. Una alternativa se representa por la reacción de transesterificación utilizando metanol (alcohol metílico) como agente transesterificante, obteniendo como coproductos los ésteres metílicos que constituyen el biodiesel y alcoholes de alto peso molecular (AAPM). Una segunda variante implica el uso de etanol (alcohol etílico) como agente transesterificante, obteniendo esta vez como producto el biodiesel, ahora representado por los ésteres etílicos, y alcoholes de alto peso molecular. Desde el punto de vista de las reacciones químicas ambas son equivalentes ya que los ésteres metílicos y etílicos tienen similares propiedades como combustible, por tanto ambos se consideran biodiesel (Pérez-Bravo et al., 2022).

Para el caso de Cuba, la ruta etílica ofrece una gran ventaja debido a la oferta de etanol que existe disponible en el país, dada su producción a gran escala y con una calidad apropiada. Desde el punto de vista ambiental, el uso de etanol lleva gran ventaja sobre el metanol, pues este último es obtenido a partir de derivados del petróleo, mientras que, el etanol es producido fundamentalmente a partir de biomasa (Nogales-Delgado, 2025).

El uso de etanol para la reacción de transesterificación es de interés no solo por la utilización de otro recurso renovable, sino por las diferentes propiedades que le confiere al biodiesel (Mohammed et al., 2023). Así, el producto obtenido a partir de grasas, presenta un menor punto de escurrimiento cuando se usa etanol con respecto al uso de metanol. Por otro lado, la reactividad del etanol es muy diferente a la del metanol, tanto por una diferencia en la polaridad de la molécula, como por una mayor miscibilidad mutua que se tiene en presencia de etanol. Esto implica mayor velocidad de reacción, porque se eliminan o disminuyen los problemas de transferencia de masa.

La selección de la ruta tecnológica más adecuada para la producción de biodiesel en una fábrica de azúcar no depende únicamente de criterios químicos, sino también de aspectos económicos, ambientales y sociales. Para abordar esta complejidad y elegir entre las múltiples alternativas disponibles, se recurre al método Delphi, el cual se engloba dentro de los métodos de prospectiva, que estudian el futuro, en lo que se refiere a la evolución de los factores del entorno tecno-socio-económico y sus interacciones. Así este trabajo tiene como objetivo, evaluar la factibilidad técnica y

económica de la producción de biodiesel y alcoholes de alto peso molecular a partir de la cachaza generada en una fábrica de azúcar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrollará la metodología que comienza con la aplicación del método Delphi para la selección de las alternativas a evaluar en la instalación de una planta para la producción de biodiesel. La metodología desarrollada incorpora criterios de evaluación tanto económicos como medioambientales y sociales de la tecnología propuesta.

2.1. El método Delphi y su aplicación

El método Delphi está considerado como el método heurístico más efectivo y de mayor utilización para la toma de decisiones, sin embargo, se ha desarrollado poco para la decisión de alternativas tecnológicas cuando se quiere decidir el futuro de inversiones con relativo bajo costo (Jiménez et al., 2024).

El método consta de cuatro fases:

- 1) Definición de objetivos: En esta primera fase se plantea la formulación del problema y un objetivo general que estaría compuesto por el objetivo del estudio, el marco espacial de referencia y el horizonte temporal para el estudio.
- 2) Selección de expertos: Esta fase presenta dos dimensiones:
 - Dimensión cualitativa: Se seleccionan en función del objetivo prefijado y atendiendo a criterios de experiencia, posición, responsabilidad, acceso a la información y disponibilidad.
 - Dimensión cuantitativa: Elección del tamaño de la muestra en función de los recursos, medios y tiempo disponible.

En la formación del panel se inicia la fase de captación que conducirá a la configuración de un panel estable. En el contacto con los expertos conviene informarles de:

- Objetivos del estudio
 - Criterios de selección
 - Calendario y tiempo máximo de duración
 - Resultados esperados y usos potenciales
 - Recompensa prevista (monetaria, informe final, otros)
- 3) Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios: Los cuestionarios se elaboran de manera que faciliten la respuesta por parte de los encuestados. Las respuestas serán cuantificadas y ponderadas (año de realización de un evento, probabilidad de un acontecimiento, etc.).
 - 4) Explotación de resultados: El objetivo de los cuestionarios sucesivos es disminuir la dispersión y precisar la opinión media consensuada. En el segundo envío del cuestionario, los expertos son informados de los resultados de la primera consulta, debiendo dar una nueva respuesta. Se extraen las razones de las diferencias y se realiza una evaluación de ellas. Si fuera necesario se realizaría una tercera oleada.

2.1.1. Selección de expertos

Se realiza una selección de los expertos, así como la organización del grupo en correspondencia con las características y objetivos del trabajo. Para la selección de los

expertos que trabajarán en las rondas necesarias, para llevar a término la metodología propuesta, se considerarán conocimientos de:

- La industria azucarera y la producción de biodiesel.
- Los problemas sociales y ambientales inherentes a la industria azucarera y a la producción de biodiesel.
- El proceso inversionista.

Se le proporcionará información específica a cada experto para complementar sus conocimientos y se les aplicará oportunamente un coeficiente de importancia de acuerdo al tema que se esté tratando y al nivel de conocimiento que tenga. Se describe la composición y estructura de los expertos que fueron seleccionados atendiendo a las consideraciones:

- Voluntariedad.
- Vinculación estrecha con el tema.
- Seriedad y profesionalidad (Figueredo, 2016).

2.1.2. Rondas y listado de las alternativas a evaluar

En el caso estudiado, para la fábrica de azúcar de 2242,5 t/d de capacidad, con una proyección cañera de 6 775 ha de área agrícola y una prospección cañera de 38-44 t/ha en 6 años, se obtienen en las dos primeras rondas el siguiente listado de alternativas (tabla 1).

Tabla 1. Alternativas de la primera ronda

Alternativa	Catalizador	Régimen	Escala
I	NaOH	continuo	1
II	NaOH	continuo	2
III	NaOH	continuo	3, con AAPM
IV	NaOH	semicontinuo	1
V	NaOH	semicontinuo	2
VI	NaOH	batch	1, con AAPM
VII	NaOH	batch	2
VIII	NaOH	batch	3, con AAPM
IX	NaOH	batch	2, con AAPM
X	NaOH	continuo	3
XI	NaOH	batch	3
XII	NaOH	batch	3
XIII	NaOH	semicontinuo	3

2.2. Descripción del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite de cachaza

Según Albernas (2007) la tecnología para la producción de biodiesel a partir del aceite extraído de la cachaza, consta de cinco etapas fundamentales, las cuales son descritas a continuación.

2.2.1. Extracción del aceite de la cachaza

Esta primera etapa tiene el propósito de extraer el aceite de la cera de la cachaza, utilizando como solvente orgánico la nafta; la proporción utilizada es de 3 litros por kg de cachaza. La operación se realiza en un mezclador con temperatura de 65 °C, por una hora.

2.2.2. Recuperación del solvente orgánico

El solvente se recupera mediante la evaporación, logrando reincorporar al proceso hasta un 97 % del mismo, para su posterior reutilización. En esta etapa además se obtiene el aceite de cachaza “limpio”, el cual es posteriormente utilizado en la obtención del biodiesel; por tanto, la calidad de esta operación garantiza la calidad producto final.

2.2.3. Deshidratación del etanol

Esta etapa tiene como objetivo obtener el alcohol deshidratado (99 °GL) necesario para la producción de biodiesel, el cual se logra en una columna de adsorción de cama fija utilizando como adsorbente la zeolita natural (Pérez et al., 2021).

2.2.4. Preparación del etóxido

La preparación del etóxido no es más que preparar una solución de etanol obtenido de la etapa anterior con hidróxido de sodio, el cual es el agente catalizador de la próxima etapa. La solución se prepara a una temperatura de 65 °C.

2.2.5. Etapa de reacción (transesterificación)

En esta etapa ocurre la reacción de transesterificación, donde se hace reaccionar al aceite extraído libre de solvente y el etóxido; de la misma se obtiene el biodiesel y los alcoholes de alto peso molecular, los cuales pueden ser aprovechados por otros sectores industriales. Esta mezcla, fuertemente cáustica, es vertida en el reactor principal que contiene los lípidos fundidos. La reacción se realiza a 65 °C para agilizar la misma, y se mezcla vigorosamente para favorecer una reacción completa.

Después de transcurridos 50 minutos, se procede a una separación de los coproductos (los alcoholes pesados); luego de separados, el éster es lavado para eliminar jabones y otros subproductos de reacción indeseados, los cuales pueden contaminar el producto principal.

2.3. Indicadores económicos

Una vez dimensionados los equipos fundamentales de la planta, se efectuó el análisis económico sobre la base de calcular el costo de inversión, el costo de producción y los indicadores de rentabilidad. El estimado de estos indicadores se obtuvo aplicando la metodología referida por Peters et al., (2003), para lo cual se trabajó sobre el programa *Microsoft Excel*.

Estimado del costo total de inversión

Para el estimado del costo total de inversión, se determinó el costo del equipamiento utilizado, el cual tiene gran incidencia en este, específicamente en los elementos que contiene la inversión fija, de esta manera se tiene que:

$$\text{Costo Inversión Total (\$)} = \text{Inversión fija} + \text{Inversión de trabajo} \quad (1)$$

$$\text{Inversión fija (\$)} = \text{Costos directos} + \text{Costos Indirectos} \quad (2)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de los balances de materiales

A continuación, en la figura 1, se muestra el diagrama completo del proceso con los resultados del balance de materiales.

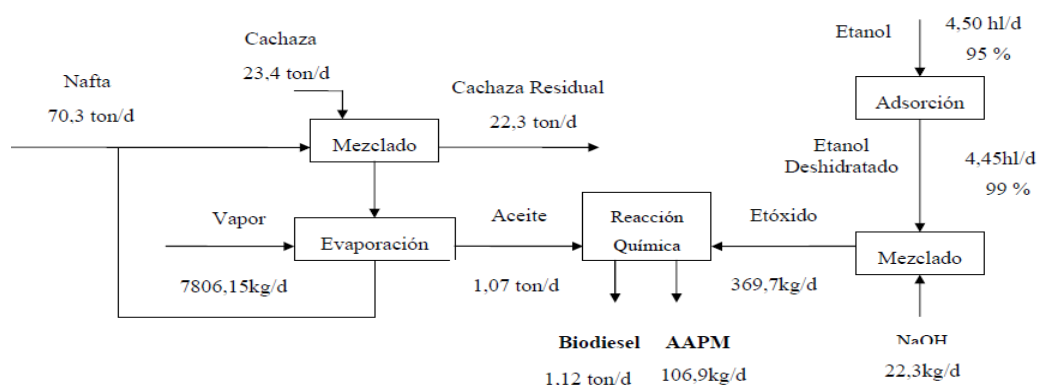


Figura 2. Resultados del balance de materiales. Fuente Figueredo (2016)

3.2. Selección de expertos

A continuación, en la tabla 2, se detalla la estructura y composición de los expertos seleccionados.

Tabla 2. Caracterización de los expertos seleccionados

<i>Experto</i>	<i>Grado científico</i>	<i>Ocupación</i>
1	Dra.C Físico-Químicas	Profesora Titular Universidad de Cienfuegos, candidato mínimo en tecnología azucarera UCLV/Instituto Tecnológico de Kiev.
2	Dr.C., M.Sc., Ing. Eléctrico	Profesor Titular Universidad de Cienfuegos, 20 años directivo de la industria azucarera.
3	Dr.C, M.Sc., Ing. Tecnológico	Profesor Titular Universidad de Cienfuegos, 10 años Jefe de Control Técnico en Papelera Damují; experto en integración de procesos.
4	Dr.C., Ing. Químico	Exprofesor Adjunto Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 30 años directivo de plantas químicas, experto en procesos inversionistas.
5	M.Sc., Economía Azucarera	Profesor Auxiliar Universidad de Cienfuegos, 16 años de experiencia en la industria azucarera.
6	Ing. Químico	10 años maestro de azúcar y directivo en la industria azucarera.
7	Tecnólogo azucarero	30 años maestro de azúcar y directivo de la industria azucarera.
8	Ing. Química	21 años como jefa del laboratorio en una

		industria azucarera.
9	Ing. Químico	26 años de experiencia en el laboratorio una industria azucarera

En la figura 3 se presenta la composición de los nueve expertos escogidos, destacándose el alto por ciento de doctores especializados en el tema solicitado.

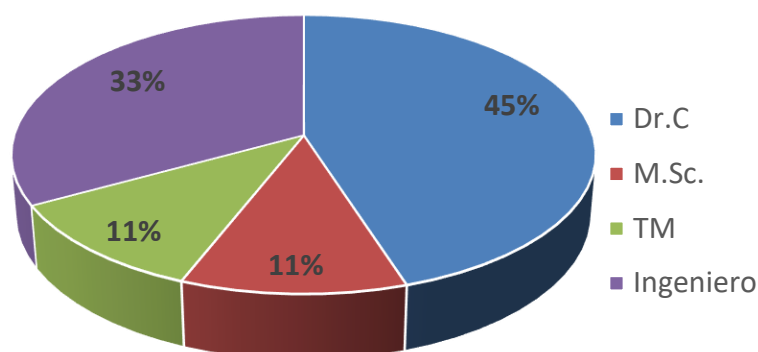


Figura 3. Composición de los expertos

3.3. Aplicación del método Delphi

A continuación se desarrolla la metodología propuesta según el orden indicado por Jiménez et al. (2024).

En el desarrollo de la fase I se realiza una discriminación de 13 alternativas tecnológicas originalmente, hasta la principal, mediante el método Delphi. Los expertos consideraron que en el caso de las alternativas X, XI y XII no debía continuarse el análisis. Con las diez restantes se procede a la ronda II donde se conforma una matriz escalada según el orden de importancia (el número más pequeño es la alternativa de más importancia). La tabla 3 muestra la matriz resultante y la tabla 4 muestra el resultado según el orden de importancia.

Tabla 3. Matriz de la ronda II de expertos de la fase I

<i>Alternativas</i>	<i>Expertos</i>								
	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>	<i>E5</i>	<i>E6</i>	<i>E7</i>	<i>E8</i>	<i>E9</i>
I	6	8	8	7	7	8	7	8	9
II	5	5	5	6	6	4	6	4	4
III	2	2	2	1	2	3	1	1	3
IV	8	7	6	8	8	7	8	7	7
V	4	4	3	4	4	5	4	5	6
VI	1	1	1	2	1	1	2	3	1
VII	9	9	9	10	9	9	10	9	8
VIII	7	6	7	5	5	6	5	6	5
IX	3	3	4	3	3	2	3	2	2
X	10	10	10	9	10	10	9	10	10

Tabla 4. Resultado de la aplicación del método Delphi según orden de importancia

Alternativas	Orden de importancia
VI	-37
III	-33
IX	-25
V	-11
II	-5
VIII	3
IV	17
I	19
VII	33
X	39

La mejor alternativa seleccionada por los expertos es la número VI, la cual propone la producción de biodiesel, batch, catalizador NaOH, escala 1, con AAPM. Esta selección es consistente con estudios recientes que recomiendan procesos batch para biorefinerías de pequeña escala en países en desarrollo, por su menor inversión inicial y flexibilidad operativa (Konde et al., 2021).

3.4. Análisis de la alternativa de producción de biodiesel a nivel industrial

A partir de los resultados obtenidos por Ley (2006) y teniendo en cuenta la creciente necesidad de búsqueda de combustibles no tradicionales y la necesidad de incrementar el proceso de diversificación de la industria azucarera cubana, se analizó la posibilidad de realizar la producción a nivel industrial en una industria azucarera cubana. En ella se producen 76,6 t/d de cachaza, es decir, en una zafra se generan 7736 t de la misma. Por ello sería factible tratar 23,4 t/d, distribuyendo esta producción en 330 días por año, para buscar la continuidad del proceso. Esta cantidad de materia prima permite obtener 1,12 t/d de biodiesel y 106,9 kg/d de alcoholes de AAPM.

3.5. Cálculo de los indicadores económicos

Para lograr un resultado favorable, con respecto a su factibilidad, se realiza un estudio y análisis de los factores que inciden en estos indicadores. Uno de ellos es la separación de los coproductos para integrarlos a los ingresos de la planta total, específicamente el de los alcoholes de alto peso molecular. Estos pueden ser vendidos a precios que oscilan en un rango desde 11,38 \$/kg hasta 22,00 \$/kg. Para el análisis económico se fijó un precio de 20 \$/kg, teniendo en cuenta que el mercado actual de alcoholes grasos ha mostrado un crecimiento sostenido, con aplicaciones emergentes en surfactantes biodegradables y lubricantes verdes (Nath, 2024).

3.5.1. Indicadores de rentabilidad VAN, TIR y PRD

Una valoración de la factibilidad de la inversión se realizó sobre la base del cálculo de los indicadores dinámicos el VAN, la TIR (Tasa de Rendimiento Interna) y el PRD (Período de recuperación al descontado) (ecuación 3), tomando una tasa de interés del 15 %.

$$\text{Valor Actual Neto} = \sum_{k=1}^n \frac{\text{Flujo de caja}}{(1+i)^k} - \text{Inversión total} \quad (3)$$

A partir de esta expresión, además de obtener el VAN, se determina la TIR y el PRD. Los resultados obtenidos se determinaron por un programa realizado con la ayuda del *Microsoft Excel*, donde se evaluaron los indicadores económicos mediante la metodología planteada por Peters et al., (2003). Estos indicadores están en correspondencia con este tipo de planta en cuanto a su factibilidad, teniendo en cuenta la venta del producto principal y el coproducto. En la tabla 5 se muestran los resultados de la evaluación de los indicadores para el estudio de la factibilidad.

Tabla 5. Resultados de los indicadores de factibilidad de la inversión

Indicador	Valor
Valor Actual neto (VAN)	\$ 2 279 512,35
Tasa de Rendimiento Interna (TIR)	56 %
Período de Recuperación al Descontado (PRD)	3,4 años

4. CONCLUSIONES

- 1) La mejor alternativa evaluada es la VI, la cual propone la producción de biodiesel por lotes, con catalizador NaOH, a escala industrial y con obtención de AAPM.
- 2) La cantidad de cachaza disponible en la industria estudiada permite obtener una cantidad de biodiesel de 1,12 t/d que pudiera ser utilizado por la fábrica como complemento del combustible para su maquinaria agrícola.
- 3) La inversión propuesta es económicamente factible para la empresa, ya que la misma aporta beneficios económicos esperados anuales de 2279512,35 \$, una TIR de 56 %, con un tiempo de recuperación de 3,4 años.

REFERENCIAS

- Albernas, Y. (2007). *Impacto económico de la producción de biodiesel en la empresa mielera “Heriberto Duquesne”*. [Tesis presentada en Opción al Título Académico de Máster en Análisis de Procesos en la Industria Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas], Cuba.
- El-Araby, R. (2024). Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17(129) <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9>
- Figueredo, J. A. (2016). *Propuesta de una planta de biodiesel y alcoholes de alto peso molecular para la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”*. [Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad de Cienfuegos], Cuba. http://biblioteca.ucf.edu.cu/biblioteca/tesis/tesis-de-grado/ingenieria/quimica/curso-2016-2017/T_GJose%20Alejandro%20Figueredo%20Suz.pdf

- Jiménez, R., Álvarez-González, A. L., Iturralde, L. A., Bravo, E., Castillo, Y., Rodríguez, B., Álvarez-Alvarado, J. M., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2024). Delphi/AHP-Based method for biomass sustainable assessment in the sugar industry. *Eng*, 5(3), 2300-2319. <https://doi.org/10.3390/eng5030119>
- Konde K. S., Nagaranjan, S., Kumar, V., Patil, S. V., & Ranade, V. V. (2021). Sugarcane bagasse based biorefineries in India: potential and challenges. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(1), 52-78. <https://doi.org/10.1039/D0SE01332C>
- Ley, N. (2006). *Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de biocombustibles*. [Tesis de Doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas], Cuba. <https://dspace.uclv.edu.cu/items/c21846bd-4f3c-4ea7-ac06-623d2d23d6e1>
- Maheshwari, P., Belal M., Yusuf, M., Jaromír, J., Bokhari, A., Beg, M., Al-Othman, A., Kumar, R., & Jaiswal, A. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>
- Mohammed, A., Bahari, A., Mohammed, N., Farhan, K., Khalil, O., Abdulqader, M., & Hamndi, H. (2023). Production of first and second-generation biodiesel for diesel engine operation: A review. *NTU Journal for Renewable Energy*, 5(1), 8-23. <https://doi.org/10.56286/ntujre.v5i1.512>
- Nath, S. (2024). Biotechnology and biofuels: paving the way towards a sustainable and equitable energy for the future. *Discover Energy*, 4, 8. <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00032-w>
- Nogales-Delgado, S. (2025). Biodiesel production and life cycle assessment: Status and prospects. *Energies*, 18(13), 3338. <https://doi.org/10.3390/en18133338>
- Pérez, J. S., Piloto, R. R., Díaz, A. G., & Hernández, J. S. (2021). Producción de biodiésel. *Prod. Biodiésel*, 4, 78. https://www.academia.edu/download/74799281/Cap.4_Produccion_de_Biodiesel.pdf
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. R., & Gallardo-Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, e481. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.481>
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., & West, R.E. (2003). *Plant Design and Economic for Chemical Engineers*. McGraw-Hill International.
- Ramos, F. E. (2014). *Metodología de evaluación para la conversión de fábricas de azúcar a biorefinerías mediante lógica difusa*. [Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas], Cuba.
- Suhara, A., Karyadi, Herawan, S. G., Tirta, A., Idris, M., Roslan, M. F., Putra, N. R., Hananto, A. L., & Veza, I. (2024). Biodiesel Sustainability: Review of Progress and Challenges of Biodiesel as Sustainable Biofuel. *Clean Technologies*, 6(3), 886-906. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030045>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Fernando Ramos Miranda. Metodología, gestión de proyectos, redacción - revisión y edición.
- Ing. Lirianet Fuentes Ramírez. Investigación, redacción - primera redacción, redacción - revisión y edición.