

Artículo Original

**INCIDENCIA DE VARIABLES TECNOLÓGICAS EN LA
RENTABILIDAD DE UNA PLANTA DE ETANOL DE BAGAZO
DE CAÑA DE AZÚCAR**

**IMPACT OF TECHNOLOGICAL VARIABLES ON THE PROFITABILITY OF AN
ETHANOL PRODUCTION PLANT FROM SUGARCANE BAGASSE**

Adiánez Sánchez González^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2654-0262>

Eulogio Castro Galiano² <https://orcid.org/0000-0003-1719-6049>

Leyanis Mesa Garriga³ <https://orcid.org/0000-0003-4449-5239>

Erenio González Suárez¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Yaillet Albernas Carvajal¹ <https://orcid.org/0000-0003-4363-4401>

Geidy Díaz Hernández¹ <https://orcid.org/0009-0001-2546-4181>

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales. Universidad de Jaén, España.

³ Instituto de Pesquisas em Bioenergia (IPBEN), Universidad Estadual de Sao Paulo (UNESP),
Rio Claro, Sao Paulo, Brasil.

Recibido: Mayo 13, 2026; Revisado: Junio 14, 2026; Aceptado: Julio 21, 2026

RESUMEN

Introducción:

La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica enfrenta desafíos económicos por incertidumbres tecnológicas y de mercado.

Objetivo:

Evaluar la incidencia de las principales variables tecnológicas y económicas en la rentabilidad de una planta de etanol 2G, considerando distintas capacidades y variantes de proceso.

Materiales y Métodos:

Se diseñó una planta base de 500 hL/día de etanol con cuatro variantes. Se estimaron costos de inversión y operación, aplicando análisis de sensibilidad univariable y Plackett-Bürman. Se evaluó rentabilidad (VAN, TIR, PRD) para 500, 3500 y 5000 hL/día de etanol.



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: Adiánez Sánchez, Email: asgonzalez@uclv.cu



Resultados y Discusión:

A 500 hL/día ninguna variante es rentable, aunque las variantes 3 y 4 (175 °C, furfural como coproducto) muestran mejores indicadores. El capital fijo es la variable más significativa. El fraccionamiento y la hidrólisis enzimática concentran entre el 85 - 95 % de los costos de equipamiento. A 3500 y 5000 hL/día, las variantes 3 y 4 son altamente rentables (VAN positivo, TIR > 60 %, PRD de 1,5 -2 años).

Conclusiones:

La producción de etanol de bagazo no es rentable a baja escala sin coproductos de alto valor. El furfural (pretratamiento a 175 °C) es clave para la viabilidad económica. El capital fijo es la variable de mayor incidencia, por lo que deben optimizarse el diseño y la integración energética de las etapas de fraccionamiento e hidrólisis enzimática. Las variantes con sacarificación y fermentación integradas son superiores técnica y económicamente.

Palabras clave: análisis económico; bagazo de caña; bioetanol; coproductos; Plackett-Bürman.

ABSTRACT

Introduction:

The production of bioethanol from lignocellulosic biomass faces economic challenges due to technological and market uncertainties.

Objective:

To evaluate the impact of the main technological and economic variables on the profitability of a second-generation (2G) ethanol plant, considering different capacities and process variants.

Materials and Methods:

A base plant with a capacity of 500 hL/day of ethanol was designed, including four variants. Investment and operating costs were estimated, applying univariate sensitivity analysis and the Plackett-Bürman design. Profitability (NPV, IRR, PBP) was assessed for ethanol production capacities of 500, 3500, and 5000 hL/day.

Results and Discussion:

At 500 hL/day, none of the variants are profitable, although Variants 3 and 4 (175 °C, furfural as a coproduct) show better indicators. Fixed capital is the most significant variable. Fractionation and enzymatic hydrolysis account for 85–95% of equipment costs. At 3500 and 5000 hL/day, Variants 3 and 4 are highly profitable (positive NPV, IRR > 60%, PBP of 1.5–2 years).

Conclusions:

Ethanol production from sugarcane bagasse is not profitable at a small scale without high-value coproducts. Furfural (pretreatment at 175 °C) is key to economic viability. Fixed capital is the most influential variable; therefore, the design and energy integration of the fractionation and enzymatic hydrolysis stages must be optimized. Variants with integrated saccharification and fermentation are technically and economically superior.

Keywords: economic analysis; sugarcane bagasse; bioethanol, co-products; Plackett-Bürman.

1. INTRODUCCIÓN

La fragilidad de los mercados energéticos en la actualidad representa un recordatorio de la persistente importancia de la seguridad energética y de las formas en que unos sistemas energéticos más eficientes y menos contaminantes pueden reducir los riesgos para la seguridad energética (Agencia Internacional de Energía [IEA por sus siglas en inglés]), (IEA, 2024).

El modelo energético global, basado en la quema de combustibles fósiles, enfrenta una crisis dual: el inevitable agotamiento de las reservas de petróleo y la generación de contaminación ambiental a niveles preocupantes. Esta problemática ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía renovables y sostenibles. En este contexto, el bioetanol ha emergido como una alternativa prometedora para el sector del transporte, pudiendo ser producido a partir de una amplia gama de materias primas (IEA, 2011), (Espinoza et al., 2025), (Morejón & Llano, 2025).

El bioetanol de primera generación, obtenido de cultivos alimentarios como la caña de azúcar o el maíz, presenta limitaciones relacionadas con el uso de suelo y la competencia con la cadena alimentaria. Por ello, el foco de atención se ha desplazado hacia el bioetanol de segunda generación (2G), producido a partir de biomasa lignocelulósica, como residuos agrícolas y forestales (Gurunath et al., 2022), (Göncü et al., 2025). En países con tradición azucarera, el bagazo de caña de azúcar se presenta como una materia prima con un potencial extraordinario para este fin (Nhleko & Sekoai, 2025). La biomasa de segunda generación tiene ventajas frente a los cultivos alimentarios; entre ellas, su abundancia ya que son productos de desechos agroindustriales o materiales de cultivos energéticos (no alimentarios) que pueden ser producidos en áreas que no son aptas para otros cultivos, además de que requieren menos energía y recursos para su producción (Martínez et al., 2023).

Sin embargo, el camino hacia la producción comercial de etanol 2G está plagado de desafíos técnicos y económicos. La compleja estructura de la biomasa lignocelulósica requiere etapas de pretratamiento e hidrólisis enzimática para liberar los azúcares fermentables, lo que incrementa significativamente los costos de inversión y operación en comparación con las tecnologías convencionales (Castillo & Llano, 2025). La incertidumbre en los datos de diseño, en el comportamiento de los procesos a escala industrial y en la volatilidad de los precios de las materias primas y la energía, hace que la evaluación económica precisa sea una herramienta indispensable para la toma de decisiones (Gregg et al., 1998), (Peters et al., 2003). Buthelezi et al. (2025) refieren que una evaluación tecno-económica (ETE) proporciona un análisis exhaustivo de la viabilidad financiera de estos procesos, lo que permite tomar decisiones de inversión y desarrollar políticas para el avance de los biocombustibles.

Diversos autores han abordado la evaluación tecno-económica de la producción de etanol 2G. Primeramente, en el caso de NREL, (2002), desarrollaron para el Departamento de Energía de EE. UU. un modelo detallado de proceso y costos para la conversión de residuos de maíz, estableciendo un precio de venta de 1,07 dólares por galón para 2010. Estudios como los de Gregg et al. (1998) demostraron que el reciclaje de enzimas y el aumento del tiempo de hidrólisis pueden reducir los costos de producción. Un hallazgo común en todos estos trabajos es la necesidad de generar coproductos de alto valor, como lignina o furfural, para mejorar la economía global del proceso. Hamden et al. (2026)

expresaron que el bioetanol 2G, producido a partir de biomasa lignocelulósica y residuos agroindustriales, se alinea con los principios de la economía circular y ofrece una mayor sostenibilidad. Logra reducciones de GEI (gases de efecto invernadero) del 70 al 90 % y produce hasta 340 L por tonelada de biomasa seca. Sin embargo, los altos costos de pretratamiento y el procesamiento complejo dificultan su implementación a gran escala. El presente trabajo tiene como objetivo valorar la incidencia de las principales variables tecnológicas y económicas en la rentabilidad de una planta de etanol 2G, considerando distintas capacidades y variantes de proceso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Definición de las variantes tecnológicas

El esquema tecnológico original que funge como base de las variantes tecnológicas propuestas se muestra en la figura 1 y en este se considera un pretratamiento en dos etapas, seguido de hidrólisis enzimática, fermentación alcohólica y destilación. El proceso parte del bagazo de caña y produce etanol, con la posibilidad de obtener furfural como coproducto en la primera etapa de fraccionamiento, a 175 °C. El uso de etanol en la segunda etapa de fraccionamiento busca mejorar la calidad de la lignina obtenida.

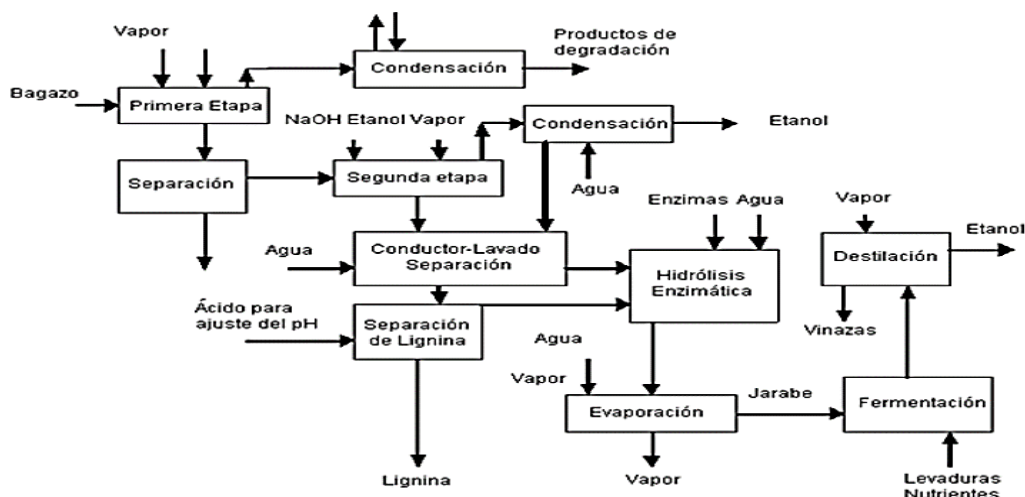


Figura 1. Esquema tecnológico para la producción de etanol a partir de bagazo

A partir de este esquema, se definieron cuatro variantes tecnológicas que resultan de combinar dos condiciones en la primera etapa de pretratamiento con dos configuraciones para la sacarificación y fermentación:

- Variante 1: Presacarificación y Fermentación con primera etapa de pretratamiento a 120 °C.
- Variante 2: Sacarificación y Fermentación Simultáneas con primera etapa de pretratamiento a 120 °C.
- Variante 3: Presacarificación y Fermentación con primera etapa de pretratamiento a 175 °C.
- Variante 4: Sacarificación y Fermentación Simultáneas con primera etapa de pretratamiento a 175 °C.

2.2. Bases de diseño y estimación de costos

El estudio se realizó considerando una capacidad base de 500 hL de etanol por día, operando 300 días al año. Para cada variante, se desarrollaron los balances de masa y energía basados en rendimientos experimentales reportados por Mesa (2010). A partir de estos balances, se dimensionaron los equipos principales (reactores, intercambiadores de calor, columnas de destilación, etc.) utilizando ecuaciones de diseño de la literatura especializada (Levenspiel, 1990), (Treybal, 1986).

La estimación de los costos de inversión se realizó mediante el método del exponente de capacidad (regla del 0,6), partiendo de una cotización base para una planta de 100 L/día y utilizando factores de la literatura (Peters et al., 2003), para calcular el capital fijo invertido y el capital de trabajo. Los costos de operación se calcularon siguiendo la metodología de Peters et al. (2003), considerando materias primas (bagazo, enzimas, NaOH, etc.), servicios (vapor, agua de enfriamiento), mano de obra, mantenimiento, depreciación, etc.

Es importante señalar que los precios de las materias primas y productos (etanol: 0,80 \$/L, furfural: 800 \$/t) utilizados en este análisis corresponden a valores de referencia reportados por (Mesa, 2010). Dado el tiempo transcurrido y la volatilidad inherente a los mercados de commodities, se recomienda, para estudios posteriores, una actualización inmediata de dichos valores a precios de 2025 o del primer semestre de 2026, con el fin de garantizar la vigencia y precisión de los resultados económicos presentados ya que una limitación relevante de este estudio radica en la antigüedad de los precios empleados. Al resultar imperativa la revisión y actualización de los precios se consultaron distintos sitios donde aparecen reportados estos precios y se encontró que para el etanol el precio en 2025 fue de 0,43 \$/L según el (Departamento de Agricultura de Estados Unidos [USDA por sus siglas en inglés]) (USDA, 2025). Por otra parte, para el furfural producido a partir de bagazo de caña, en 2025 el precio se estimó entre 715 - 1150 \$/t según (Globy, 2025), aunque se debe tener en cuenta que este es un rango de precios de referencia de mercado internacional comercial. Estos precios, ya actualizados, constituyen la base de la recomendación rauda expuesta en este apartado para investigaciones posteriores relacionadas con este tema.

2.3. Análisis de sensibilidad y diseño experimental

Se realizó un análisis de sensibilidad univariable para evaluar el efecto de nueve variables clave sobre el costo unitario (\$/L) y el costo por peso (\$/peso). Las variables se modificaron en un rango del 50 % al 150 % de su valor base. Las variables estudiadas fueron:

- Externas: Precio del bagazo, Precio de las enzimas, Precio del vapor, Precio del NaOH.
- Inherentes al proceso: Cantidad de enzimas, Hidromódulo en la segunda etapa, % de etanol en la segunda etapa, % de NaOH en la segunda etapa, Capital Fijo Invertido.

Para superar las limitaciones del análisis univariable y detectar posibles interacciones o efectos cuadráticos, se aplicó un diseño experimental factorial fraccionado de Plackett-Bürman de acuerdo con el fundamento metodológico planteado por (Gregor et al., 2024).

Se construyó una matriz de 12 experimentos para evaluar las 9 variables reales y 2 variables "falsas", que permiten estimar el error experimental. La matriz que se muestra en la tabla 1 se confeccionó para cada una de las 4 variantes tecnológicas, obteniendo modelos lineales para el costo unitario y el costo por peso. La significación estadística de los coeficientes de cada variable se determinó mediante la prueba t de Student, con un nivel de confianza del 85 %.

Tabla 1. Matriz de Plackett-Bürman para 12 experimentos

<i>N</i>	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅	<i>x</i> ₆	<i>x</i> ₇	<i>x</i> ₈	<i>x</i> _f	<i>x</i> ₁₀	<i>x</i> _f
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
3	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
4	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
5	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
6	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
7	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
9	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
10	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
11	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Donde:

- | | |
|---|--|
| <i>x</i> ₁ : Precio del bagazo | <i>x</i> ₆ : Hidromódulo segunda etapa |
| <i>x</i> ₂ : Precio de las enzimas | <i>x</i> ₇ : % de etanol segunda etapa |
| <i>x</i> ₃ : Precio del vapor | <i>x</i> ₈ : % hidróxido de sodio segunda etapa |
| <i>x</i> ₄ : Precio del hidróxido de sodio | <i>x</i> ₁₀ : Capital fijo invertido |
| <i>x</i> ₅ : Cantidad de enzimas | |

2.4. Evaluación de rentabilidad a diferentes capacidades

Finalmente, para las variantes más competentes, se evaluó el efecto de la economía de escala. Se recalcularon los costos de inversión y operación para capacidades de 3500 y 5000 hL/día, y se determinaron los indicadores dinámicos de rentabilidad: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación de la Inversión (PRD), considerando una tasa de descuento del 12 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Costos de producción a capacidad base (500 hL/día)

Al analizar comparativamente los resultados de los balances de materiales y energía reportados por (Mesa, 2010) se constató una diferencia fundamental entre las variantes. Aquellas con primera etapa a 120 °C (V1, V2) procesan menos bagazo (125 - 141 t/día) pero no generan furfural, utilizando las xilosas para la producción de etanol. En cambio, las variantes a 175 °C (V3, V4) procesan más bagazo (272 - 286 t/día) y producen entre 45 y 49 t/día de furfural, un coproducto de alto valor.

A partir de esta tesis analítica de observación, combinando criterios cuantitativos, se calculan los principales indicadores económicos para la capacidad de 500 hL/día, mostrados en la tabla 2. Se observa que los costos totales de producción son mayores en las variantes 3 y 4 debido al mayor consumo de materias primas. Sin embargo, el costo unitario del etanol es comparable o incluso menor en algunas de ellas gracias al ingreso por la venta de furfural, que se refleja en un menor costo por peso. La Variante 1 (PSF, 120 °C) presenta el menor costo unitario (0,64 \$/L), mientras que la Variante 3 (PSF, 175 °C) presenta el menor costo por peso (0,64 \$/peso).

Tabla 2. Resumen de indicadores económicos para las cuatro variantes a 500 hL/día

V	Bagazo (t/día)	Furfural (t/día)	Capital Invertido (10⁶ \$)	CTP (\$/año 10⁶)	Costo Etanol (\$/año 10⁶)	Costo Unitario (\$/L)	Costo/Peso (\$/peso)
1	125	-	36,54	9,56	0,32	0,64	1,11
2	141	-	39,03	10,28	0,36	0,68	1,17
3	272	46	39,74	13,38	0,75	0,89	0,64
4	286	49	40,78	13,89	0,79	0,93	0,65

A continuación, en la tabla 3 se visualizan los resultados del cálculo de dos indicadores de rentabilidad importantes: VAN (\$/año) y la TIR (%), para las cuatro variantes objeto de estudio.

Tabla 3. Resultados del cálculo del VAN y la TIR para 500 hL/día

Variante	VAN (\$/año)	TIR (%)
1	-46997652,14	-
2	-52929055,33	-
3	-10642593,56	6
4	-11697645,88	6

Analizando la tabla 3, que muestra los valores del VAN y la TIR para la capacidad de producción de 500 hL/día de etanol de bagazo de caña, se observa que en las cuatro variantes definidas los valores del VAN son negativos y además la tasa interna de retorno es muy baja. Un análisis de los indicadores dinámicos para esta capacidad de 500 hL/día demuestra que no es rentable producir etanol y sus coproductos a este nivel de producción.

3.2. Análisis de sensibilidad e identificación de variables clave

El análisis de sensibilidad univariable mostró, para todas las variantes, que la variable con mayor pendiente en las gráficas de costo unitario y costo por peso era el Capital Fijo Invertido. Esto indica que una variación porcentual en la inversión inicial tiene un impacto mucho mayor en los costos finales que la misma variación en el precio de cualquier materia prima.

Los resultados del diseño de Plackett-Bürman confirmaron y profundizaron este hallazgo. Los coeficientes de los modelos lineales obtenidos (tabla 4, para la variante 1 como ejemplo) muestran claramente la magnitud del efecto de cada variable. La significación

estadística, determinada por comparación con el error estándar (ΔE_i), reveló que, en todas las variantes y para ambos indicadores de rentabilidad, el Capital Fijo Invertido (E10) es la única variable con un coeficiente superior al umbral de significación, siendo, por tanto, la variable de mayor incidencia en el rango estudiado. Las variables "falsas" (Ef) no resultaron significativas, lo que sugiere la ausencia de interacciones o efectos cuadráticos importantes en el modelo lineal ajustado.

Tabla 4. Coeficientes del modelo de Plackett-Bürman para la Variante 1 y significación de los coeficientes

<i>Coeficientes</i>	<i>Variable</i>	<i>Costo Unitario (CU)(\$/L)</i>	<i>Costo por peso (CP)(\$/peso)</i>
E0	Media	0,692	1,203
E1	Precio Bagazo	-0,075	-0,130
E2	Precio Enzimas	0,010	0,018
E3	Precio Vapor	-0,003	-0,006
E4	Precio NaOH	0,002	0,003
E5	Cant. Enzimas	0,005	0,008
E6	Hidromódulo	0,005	0,008
E7	% Etanol	0,009	0,015
E8	% NaOH	-0,034	-0,058
Ef	-	-0,086	-0,149
E10	Capital Fijo Inv.	0,298	0,517
Ef	-	-0,071	-0,123
ΔE (Significación)	0,1088	0,1891	

El modelo obtenido con estos coeficientes para cada una de las cuatro variantes aparece reportado detalladamente en (Mesa, 2010) y para los efectos de la presente investigación los modelos son coincidentes porque se trabajó con la data de la autora ya citada en las líneas iniciales de este apartado, procurando mantener el carácter analítico y ético – científico de este trabajo.

Este presente resultado es de vital importancia, ya que dirige los esfuerzos de investigación y desarrollo hacia la reducción del costo del equipamiento. Un análisis de la composición de los costos de los equipos reportados por (Mesa, 2010) mostró que las etapas de Pretratamiento 1, Pretratamiento 2 e Hidrólisis Enzimática representan entre el 85 % y el 95 % de la inversión en equipos. Por lo tanto, la optimización del diseño, el estudio cinético detallado de los reactores, la integración energética y el desarrollo de tecnologías más eficientes en estas tres etapas son las vías más prometedoras para mejorar la rentabilidad global del proceso y se recomienda para investigaciones futuras trabajar en la materialización de estos itinerarios hacia el perfeccionamiento de la rentabilidad integral.

3.3. Rentabilidad a diferentes capacidades

Los resultados de la evaluación dinámica para capacidades superiores se muestran en las tablas 5 y 6. Se confirma que las variantes 1 y 2 no son viables ni a 3500 ni a 5000 hL/día, presentando VAN negativos o TIR muy por debajo de la tasa de descuento,

demostrándose que las mismas no son rentables y nunca se llega a recuperar la inversión.

Tabla 5. Indicadores dinámicos para una capacidad de 3500 hL/día

Variable	VAN (\$/año)	TIR (%)	PRD (años)
1	-62115264,96	-	-
2	-74458811,03	-	-
3	318033917,22	66,33	2
4	322835818,52	65,75	2

Tabla 6. Indicadores dinámicos para una capacidad de 5000 hL/día

Variable	VAN (\$/año)	TIR (%)	PRD (años)
1	-40558945,98	5,47	-
2	-55949724,46	3,36	-
3	504021069,60	83,83	1,5
4	512105351,77	83,11	1,5

En cambio, las variantes que producen furfural (3 y 4) se vuelven altamente rentables al aumentar la escala (5000 hL/día). Dichas variantes (PSF y SSF, 175 °C) son las de mejor desempeño, con TIR superiores al 65 % a 3500 hL/día y que superan el 80 % a 5000 hL/día, con periodos de recuperación de la inversión de solo 1,5 a 2 años. La economía de escala es evidente: duplicar la capacidad (de 3500 a 5000 hL/día) mejora significativamente todos los indicadores, pero el aumento de la capacidad de la planta está limitado, fundamentalmente, debido al aumento del costo de transportación del bagazo y a la disponibilidad del mismo.

4. CONCLUSIONES

1. La producción de etanol 2G a pequeña escala (500 hL/día) no es económicamente viable en ninguna de las variantes evaluadas, como lo demuestran los valores negativos del VAN.
2. La generación de coproductos de alto valor es indispensable para la rentabilidad del proceso. Las variantes que operan la primera etapa de pretratamiento a 175 °C y producen furfural (V3 y V4) presentan un desempeño económico muy superior a aquellas que maximizan el etanol a partir de xilosas (V1 y V2). El mayor ingreso por la venta de furfural compensa con creces los mayores costos operativos.
3. El capital fijo invertido es, con notable diferencia, la variable de mayor incidencia sobre los indicadores de rentabilidad. Así lo demuestran tanto el análisis de sensibilidad univariable como el riguroso diseño experimental de Plackett-Bürman. Las etapas de pretratamiento (1 y 2) y de hidrólisis enzimática concentran la mayor parte de esta inversión (85 – 95 %).
4. Las configuraciones que integran la sacarificación y la fermentación (Presacarificación y SSF) son tecnológica y económicamente superiores a la configuración con etapas separadas (SHF). Las variantes 3 y 4, que combinan el pretratamiento a 175 °C con PSF o SSF, demostraron ser las más prometedoras,

alcanzando indicadores de rentabilidad relevantes a capacidades de 3500 y 5000 hL/día (TIR > 65 %, PRD < 2 años).

REFERENCIAS

- Buthlezi, A. S., Chetty, M. & Mohammadi, A. H. (2025), Techno-Economic assessment of biofuels production from sugarcane bagasse. *Energy Science & Engineering*, 13, 4270-4286. <https://doi.org/10.1002/ese3.70178>
- Castillo, H. P., & Llano, J. I. (2025). Optimización en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica: métodos y tecnologías sostenibles. [Tesis de grado de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29722>
- Espinoza, Y. M., Castro, F. I. G., Romero, A. G., & Sánchez-Ramírez, E. (2025). Co-producción de bioetanol y bioproductos en procesos intensificados: hacia la factibilidad económica de la bioindustria. *Digital ciencia@uaqro*, 18(1), 35-54. <https://doi.org/10.61820/dcuaq.2395-8847.v18n1.1399>
- Globy, (2025). Mercado B2B International. <https://cn.globy.com/b2bmarket/listing/products/furfural-a304f1>
- Göncü, B., Sarıışık, G., & Hoşgün, E. (2025). Valorization of lignocellulosic feedstock in bioethanol production via separate hydrolysis and fermentation: An integrated machine learning approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 142(1), 1039-1053. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.340>
- Gregg, D. J., Boussaid, A., & Saddler, J. N. (1998). Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresource Technology*, 63(1), 7-12. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1998BiTec..63....7G/doi:10.1016/S0960-8524\(97\)00103-X](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1998BiTec..63....7G/doi:10.1016/S0960-8524(97)00103-X)
- Gregor, M., Grznar, P., Mozol, S., & Mozolova, L. (2024). Plackett-burman design. *Acta Simulatio*, 10(01), 5-9. <https://doi.org/10.22306/asim.v10i1.104>
- Gurunath, R. B., Gobinath, R., & Giridhar, P. V. (2022). Bioethanol production from lignocellulosic biomass: Past, present and future trends. *Research Journal of Biotechnology*, 17(10), 124-132. <https://doi.org/10.25303/1710rjbt1240132>
- Hamden, Z., El-Ghoul, Y., Alminderej, F. M., & Majdoub, H. (2026). Biomass valorization toward sustainable bioethanol production: a critical review of feedstocks and techno-economic aspects. *Waste and Biomass Valorization*, 17, 4777-4811. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03339-4>
- IEA (2011). Technology Roadmap - Biofuels for Transport. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-biofuels-for-transport>
- IEA (2024). World Energy Outlook 2024. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024?language=es>
- Levenspiel, O. (1990). Ingeniería de las reacciones químicas. Editorial Reverté, S.A, 2da Edición, España.
- Martínez, G., Martínez, M., & Téllez, A. (2023). Bioetanol, biodiésel y biogás: materias primas, procesos de producción y aplicaciones. *Cienciacierta*, 1974(74), 116-146. <https://revistas.uadec.mx/index.php/CienciaCierta/article/view/330>
- Mesa, L. (2010). Estrategia investigativa para la tecnología de obtención de etanol y
-

- coproductos del bagazo de la caña de azúcar. [Tesis de Doctorado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba]. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6604>
- Morejón, H., & Llano, J. (2025). Optimización en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica: métodos y tecnologías sostenibles. [Tesis de grado de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29722>
- Nhleko, L., & Sekoai, P. T. (2025). Sugarcane Bagasse: A Sustainable Feedstock for Biorefinery Portfolios in South Africa. *Fermentation*, 11(489). <https://doi.org/10.3390/fermentation11090489>
- NREL (2002). Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. <https://research-hub.nlr.gov/en/publications/lignocellulosic-biomass-to-ethanol-process-design-and-economics-u/>
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., West, R. E. (2003). Plant design and economics for chemical engineers. New York: McGraw-Hill, 5ta edición.
- Treybal, R. E., (1986). Operaciones con transferencia de masa, segunda edición. México, McGraw-Hill.
- USDA, (2025). United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Marketing Service. Grain and feed market news: Ethanol report. https://www.ams.usda.gov/mnreports/ams_3616

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Adiánez Sánchez González. Redacción-primera redacción, redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. Eulogio Castro Galiano. Conceptualización y validación.
 - Dr.C. Leyanis Mesa Garriga. Metodología e investigación.
 - Dr.Sc. Erenio González Suárez. Conceptualización.
 - Dr.C. Yaillet Albernas Carvajal. Supervisión, análisis formal, visualización.
 - Estud. Geidy Díaz Hernández. Redacción - primera redacción.
-