

Artículo Original

**ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE
PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA**

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES FOR THE PRODUCTION
OF BIOETHANOL FROM SUGARCANE BAGASSE**

Zilda Miguel Gomes-da Silva¹ <https://orcid.org/0000-0001-6206-2635>

Linet Gálvez-Cantero¹ <https://orcid.org/0000-0001-7173-3349>

Alicia María Gómez-Julián¹ <https://orcid.org/0000-0002-7984-6927>

María Caridad Julián-Ricardo^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-1800-7345>

Luis Beltrán Ramos-Sánchez¹ <https://orcid.org/0000-0002-6403-1936>

¹ Grupo de Desarrollo de BioProcesos. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz". Carretera Circunvalación Norte km 5½. Camagüey, Cuba.

Recibido: Noviembre 10, 2021; Revisado: Noviembre 25, 2021; Aceptado: Diciembre 5, 2021

RESUMEN

Introducción:

La biomasa lignocelulósica y en especial los subproductos agroindustriales han dejado de ser productos desecho-problema, para convertirse en materia prima potencial para diversos procesos, siendo la producción de bioetanol uno de los más importantes.

Objetivo:

Analizar alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar para que el proceso sea eficiente técnica, económica y ambientalmente, mediante la simulación del proceso.

Materiales y Métodos:

Se partió del diseño tecnológico de un caso base de una planta para la producción de bioetanol y se simularon tres alternativas tecnológicas: (1) la influencia de la humedad del bagazo, (2) la influencia de la velocidad de dilución y (3) la sacarificación y fermentación simultáneas.

Resultados y Discusión:

Con la comparación de los análisis técnicos, económicos y ambientales, se determinó que los mejores resultados se obtuvieron con la alternativa 3, que incluye el proceso de sacarificación y fermentación simultánea.

Conclusiones:

Con la alternativa 3 se obtiene una producción de 1 275 279,0 L/año de bioetanol a



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: María C. Julián-Ricardo, E-mail: maria.julian@reduc.edu.cu



95,85% de pureza, una productividad de 2,51 g/Lh, el costo unitario de 8,79 \$/L y con resultados ambientales satisfactorios.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar; bioetanol; fermentación; sacarificación; *SuperPro Designer*.

ABSTRACT

Introduction:

Lignocellulosic biomass and especially agro-industrial by-products have ceased to be waste-problem products, to become potential raw material for various processes, being the production of bioethanol one of the most important.

Objective:

To analyze by process simulation the technological alternatives for bioethanol production from sugarcane bagasse so that the process will be technically, economically and environmentally efficient,

Materials and Methods:

It was started from the technological design of a plant for the production of bioethanol base and three technological alternatives were simulated: (1) the influence of bagasse humidity, (2) the influence of dilution speed and (3) simultaneous saccharification and fermentation.

Results and Discussion:

With the comparison of the technical, economic and environmental analyzes, it was determined that the best results were obtained with alternative 3, which includes the simultaneous saccharification and fermentation process.

Conclusions:

Alternative 3 produces 1 275 279.0 L/year of bioethanol at 95.85% purity, a productivity of 2.51 g/Lh, a unit cost of 8.79 \$/L with satisfactory environmental results.

Keywords: sugarcane bagasse; bioethanol; fermentation; saccharification; *SuperPro Designer*.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles causa un importante deterioro ambiental, principalmente por la elevada emisión de gases de efecto invernadero. Tanto por su agotamiento como por su impacto negativo sobre el medio ambiente, en los últimos años se ha generado un gran interés hacia el desarrollo de fuentes de energías sustentables, como es el caso de los biocombustibles: bioetanol, biodiésel, biogás (Hernández-Galindo, 2017).

La biomasa lignocelulósica y en especial los subproductos agroindustriales se han convertido en materia prima potencial para diversos procesos tanto de tipo agrícola como industrial, siendo la producción de bioetanol uno de los más importantes. Sin embargo, son muchas las limitantes que se han presentado en torno a su obtención a partir de este tipo de materiales, debido a su estructura lignocelulósica de compleja degradación.

Cuando se emplea materia prima proveniente de biomasa lignocelulósica, que no tiene función alimenticia, los biocombustibles se denominan, de segunda generación (Edeh, 2021), estos pueden producirse a partir de residuos agrícolas e incluso de materiales lignocelulósicos crudos y generalmente involucra cuatro pasos: pretratamiento, sacarificación, fermentación y recuperación del producto (Bušić y col., 2018). La sacarificación es el paso crítico y más importante en la producción de bioetanol, comunmente, se lleva a cabo por la vía enzimática con la utilización de las celulasas. La principal dificultad para un mayor uso de estas enzimas es su costo, sobre todo porque se requieren grandes cantidades (León, 2017).

A pesar de los avances alcanzados en las diferentes tecnologías desarrolladas, se mantiene la necesidad de incrementar el rendimiento de bioetanol y minimizar el costo de producción, para ello se investiga la combinación de diferentes etapas mediante procesos integrados, en este sentido una alternativa que puede favorecer el proceso es la sacarificación y fermentación simultáneas (Albernas-Carvajal y col., 2016). También es determinante el estudio de los valores de las variables de operación que más influyen en el proceso de producción, como son la humedad del material lignocelulósico y la velocidad de dilución en el proceso fermentativo continuo.

El objetivo de este trabajo es analizar alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar para que el proceso sea eficiente técnica, económica y ambientalmente, mediante la simulación del proceso.

La simulación se realizó con el programa *SuperPro Designer* desarrollado por *Intelligent, Inc.*, debido a que es uno de los más completos y reconocidos paquetes de simulación y diseño de procesos, siendo un simulador muy versátil que puede satisfacer las necesidades de los ingenieros en gran variedad de industrias (Julián-Ricardo y col., 2018).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Alternativas propuestas

Se realizó la simulación de un caso base tomando como referencia el proceso diseñado por Aden y col., (2002), que utilizó como materia prima residuos de la cosecha de maíz y recomendó su modelo para otros materiales lignocelulósicos como el bagazo de caña de azúcar. Se seleccionaron para el análisis las siguientes alternativas tecnológicas: (1) Influencia de la humedad del bagazo, (2) Influencia de la velocidad de dilución y (3) Sacarificación y fermentación simultánea (SFS). La metodología que se utilizó para el análisis de las tres alternativas se basó en la propuesta por Pérez-Martínez y col., (2012) para el diseño de procesos de la industria azucarera y sus derivados.

2.2. Descripción del proceso de producción de bioetanol (caso base)

El flujo de alimentación se fijó en 1 000 kg/h, suficientes para realizar investigaciones en una planta piloto. El esquema tecnológico cuenta con tres etapas: Preparación de las materias primas, Fermentación y Recuperación de bioetanol.

2.2.1. Etapa de preparación de las materias primas

Se asume un nivel de humedad de 50% para el bagazo, en consecuencia, la corriente de materia prima del diagrama de flujo contiene cantidades iguales del bagazo seco y agua

(el nivel de humedad). Se consideró que el bagazo de caña tiene la composición promedio que se muestra en la tabla 1, que son datos promedios, obtenidos de los informes de final de zafra de los últimos cinco años de la Empresa Azucarera Siboney.

Tabla 1. Composición promedio del bagazo de caña

<i>Componente</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Celulosa	%	46,6
Hemicelulosa	%	25,2
Lignina	%	20,7
Otros sólidos	%	4,0
Ceniza	%	3,5

La hidrólisis ácida del bagazo de caña se realiza en un reactor bien mezclado utilizando vapor de agua a alta presión (1 000 kPa y 180 °C) y con un tiempo de residencia de 30 min, con el objetivo de iniciar la conversión de la celulosa y la hemicelulosa en glucosa y xilosa respectivamente y lograr una mayor susceptibilidad del bagazo a la hidrólisis enzimática posterior, las conversiones se representaron usando reacciones estequiométricas cuyos coeficientes y extensiones estequiométricas fueron extraídos de Aden y col., (2002).

El material hidrolizado que se encuentra a alta presión y temperatura pasa por el tanque *flash* adiabáticamente a presión atmosférica. Una fracción del agua se evapora y sale por la corriente S-104, la temperatura de la corriente *flash* se reduce a 50 °C usando un enfriador. Se utiliza un filtro de cinta para eliminar el material suspendido que incluye lignina y las fracciones no hidrolizadas de celulosa y hemicelulosa, en las condiciones de operación se realiza la remoción de un 98% de cenizas, de celulosa y hemicelulosa y un 90% de lignina. La corriente de filtrado (S-108) que incluye los azúcares fermentables generados (glucosa y xilosa) se envía a un mezclador y una mezcla que sale desde el mismo filtro (S-105) se usa para la adición de las enzimas (para ese diseño se utilizó enzima celulasa), luego el procedimiento P-5 representa la hidrólisis enzimática usando un reactor igual al de la hidrólisis ácida y con un tiempo de residencia de 1 h, la estequiometría se tomó de Aden y col., (2002).

Se utiliza un segundo filtro de cinta para la eliminación del material suspendido. La corriente de filtrado que es igual a la del primer filtro incluye los azúcares fermentables (S-106), se envía al mismo mezclador que la corriente S-108 y de ahí se le envía a la etapa de fermentación, en el filtro 2 también sale una corriente con residuos (S-113).

2.2.2. Etapa de fermentación

El procedimiento P-10 representa el fermentador de producción que opera a un tiempo de residencia de 48 h a 37 °C. El flujo de inóculo que se alimenta se fijó en un 10% del flujo de bagazo y se utilizó como microorganismo *Zymomonas mobilis* en una concentración de 1%. Al fermentador entra una corriente de medio de cultivo que viene de la primera etapa que se mezcla con el sulfato de amonio a 5%. El objetivo de ese paso es convertir la glucosa y xilosa en etanol, según la estequiometría planteada por Aden y col., (2002).

2.2.3. Etapa de recuperación de bioetanol

El caldo del fermentador se envía a la etapa de destilación específicamente al tanque de almacenamiento, se utiliza una columna de destilación para recuperar y purificar el bioetanol, que pasa por un intercambiador de calor para la disminución de la temperatura y de ahí para un tanque de almacenamiento para recoger el bioetanol.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caso base

Estos resultados se obtuvieron del software *SuperPro Designer*, para un proceso que trabaja 7 920 horas al año, que son 330 días, equivalentes a 11 meses de 30 días, con lo que se reserva un mes para el mantenimiento de la instalación. El diagrama del flujo tecnológico del proceso de producción de bioetanol descrito como caso base, se muestra en la figura 1.

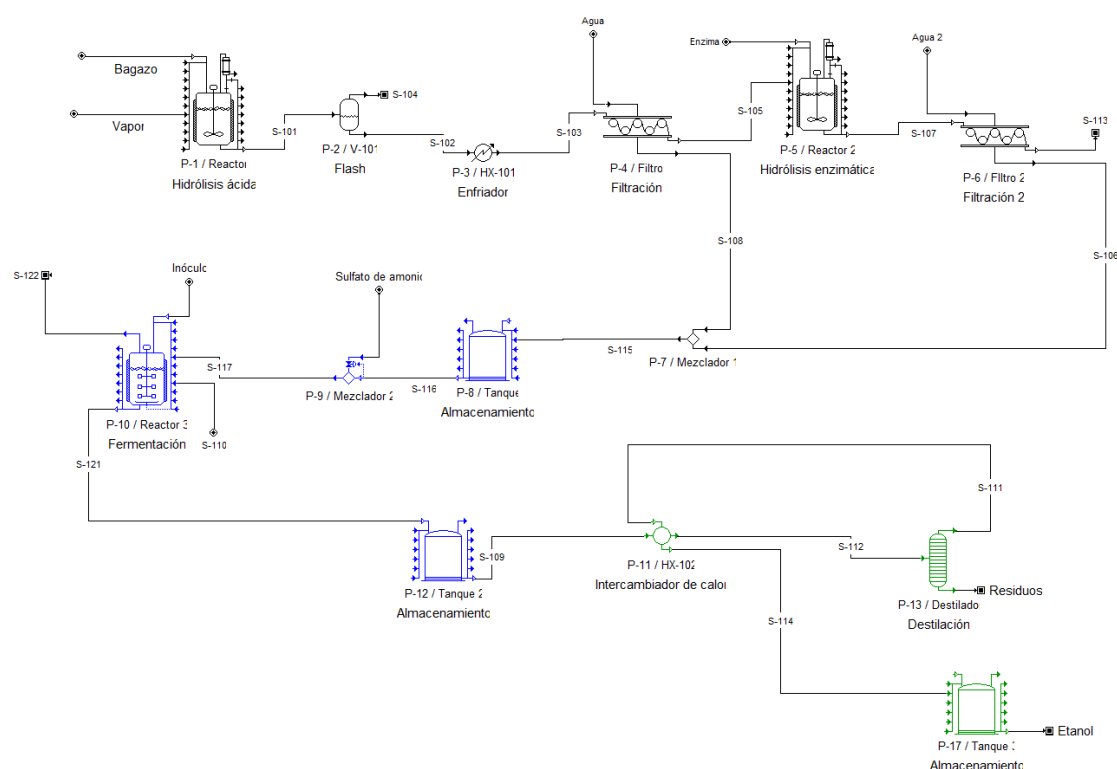


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de bioetanol (caso base)

Del balance de masa total del proceso, se obtuvo un flujo de 145,4 kg/h de bioetanol; con 87,58% de pureza y con un rendimiento bioetanol/bagazo de 14,5%, un rendimiento superior a lo obtenido por Aden y col., (2002) que alcanzó solo un rendimiento de 8,43% de bioetanol/residuos de maíz. Se asumieron 20 años de vida útil para la construcción de la planta. La inversión de capital total para la planta piloto es de \$37973000, lo que genera un costo de producción unitario de 10,04 \$/L de bioetanol producto.

Durante el proceso se producen emisiones que no se consideran peligrosas porque son productos del metabolismo de los microorganismos en el fermentador, y también se producen residuales en el segundo filtro los cuales se pueden reciclar para la etapa de hidrólisis ácida y los residuales que salen del destilador que tienen un flujo importante,

que se les debe buscar una disposición apropiada o reciclarla en la industria para la producción de alimento animal.

3.2 Influencia de la humedad del bagazo (alternativa 1)

En la alternativa 1 se estudiaron dos variantes a partir del diagrama de flujo del caso base, en la variante 1A se estudió el proceso para un nivel de humedad de 40% y en la variante 1B con 60% de humedad. En la tabla 2 los resultados demuestran que, aunque la pureza del bioetanol casi se mantiene constante en los dos casos comparándose con el caso base, se puede observar que para un 40% de humedad tiene un mayor flujo de bioetanol al final del proceso, además con un rendimiento superior al de caso base y la 1B, y tiene mayor productividad.

Tabla 2. Características técnicas de la alternativa 1

<i>Características</i>	<i>1A</i>	<i>1B</i>
Flujo de bioetanol (kg/h)	178,25	117,53
Pureza (%)	87,80	87,57
Rendimiento (%)	17,82	11,75
Volumen efectivo del fermentador (L)	1 539 90,3	1 030 49,6
Concentración de bioetanol a la salida del fermentador (g/L)	64,06	63,10
Velocidad de dilución (h^{-1})	0,018	0,016
Productividad (g/Lh)	1,16	1,12

3.3 Influencia de la velocidad de dilución (alternativa 2)

En la alternativa 2 se estudió la influencia de la velocidad de dilución en el proceso fermentativo, desde una velocidad de $0,0028 h^{-1}$ hasta $0,0202 h^{-1}$. En la figura 2 se puede observar la variación de las concentraciones con la velocidad de dilución y en la figura 3 la variación de la productividad con la velocidad de dilución.

En la figura 2 se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de dilución hay una ligera disminución en la concentración de la biomasa, un ligero aumento en la concentración de la glucosa y un incremento en la concentración del bioetanol, lo que indica que la formación del producto no es asociada al crecimiento de la biomasa.

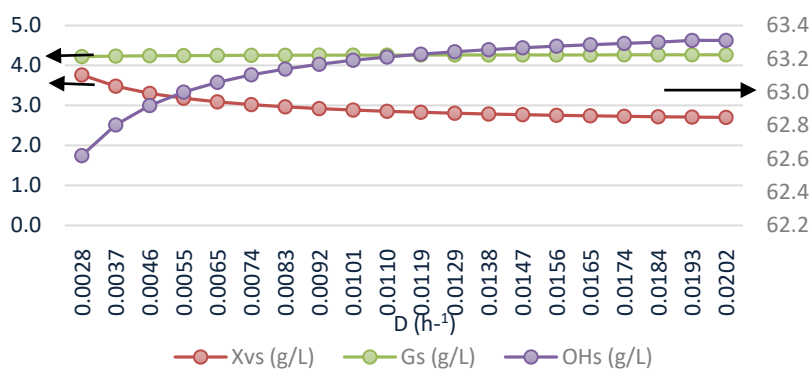


Figura 2. Variación de las concentraciones con la velocidad de dilución

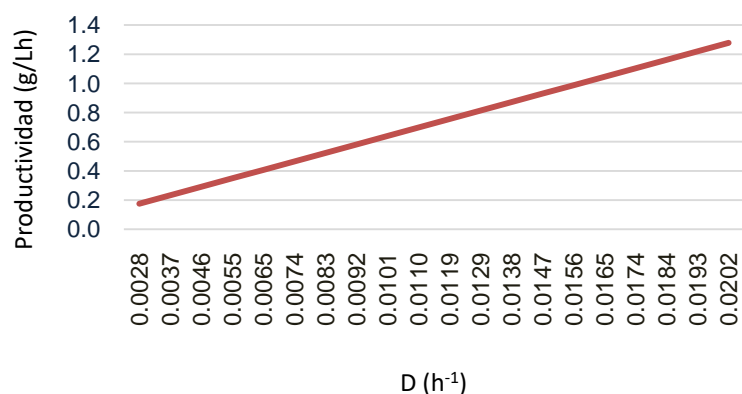


Figura 3. Comportamiento de la productividad del bioetanol en el fermentador

En la figura 3 se presenta el comportamiento de la productividad en función de la velocidad de dilución, demuestra que se pudiera diseñar una planta de mayor capacidad, porque hasta una velocidad de dilución de 0,0202 h⁻¹, que corresponde a un flujo de 2200 kg/h de bagazo, se observa como la productividad se mantiene aumentando.

3.4 Sacarificación y fermentación simultánea (alternativa 3)

Con el balance de masa total del proceso de SFS, se obtuvo un flujo de bioetanol de 125,75 kg/h; con un rendimiento bioetanol/bagazo de 12,5%, un rendimiento superior a lo obtenido por Aden y col., (2002) que alcanzó solo un rendimiento de 8,43% de bioetanol/residuos de maíz. ICIDCA, (2016), usa la misma tecnología de SFS y obtiene rendimientos superiores a 33%, sin embargo con una productividad de 0,72 g/Lh. Así mismo, Albernas-Carvajal y col., (2016) y García y Garza, (2016) reportaron un mayor rendimiento bioetanol/material lignocelulósico, pero no calculan la productividad del proceso, que es una variable de suma importancia en cuanto a la eficiencia económica. La alternativa tres brinda como resultado técnico una producción 1 275 279 L/año de bioetanol a 95,85% de pureza, al fermentador se alimenta un flujo efectivo de 805,90 L/h y tiene una velocidad de dilución de 0,0166 h⁻¹, del mismo sale la concentración de la biomasa, sustrato y producto de 6,35 g/L, 12,89 g/L y 151,10 g/L respectivamente, obteniéndose así una productividad del producto de 2,51 g/Lh.

3.5 Análisis de las alternativas

En la figura 4 se muestra el resultado de la productividad para cada una de las alternativas propuestas, y se puede constatar que tiene una mayor productividad la alternativa 3.

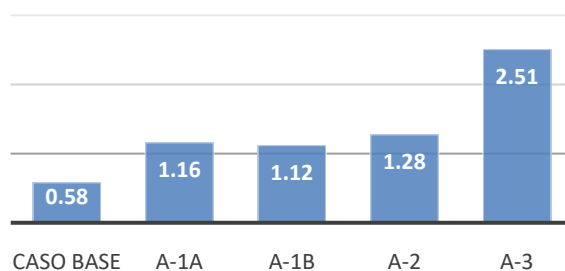


Figura 4. Comparación de las productividades de las alternativas

El análisis técnico se basa principalmente en los litros de bioetanol obtenidos anualmente en cada alternativa, representados en la figura 5, así como los por cientos de pureza del bioetanol, figura 6. La alternativa 1A tiene la mayor producción anual de bioetanol de 1 942 144,0 L con un 87,80% de pureza seguida por el caso base que tiene una producción anual de bioetanol de 1 587 133,0 L con un 87,58%, la alternativa 3 es la de menor producción anual con 1 275 279,0 L, sin embargo, con un 95,85% de pureza siendo este el de mejor calidad, ya que la pureza del bioetanol es uno de los parámetros más importantes a evaluar del mismo.

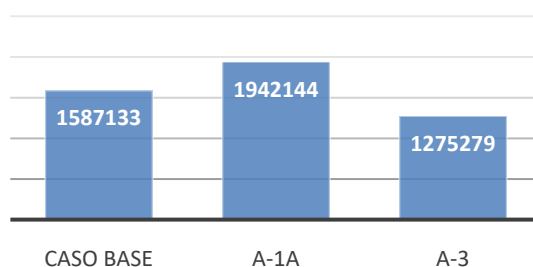


Figura 5. Producción de bioetanol (L/año)

Para el análisis económico se tomó en cuenta el costo unitario, siendo ese un punto importante a valorar en este aspecto. El caso base tiene el mayor costo unitario, como se muestra en la figura 7, seguido de la alternativa 3.

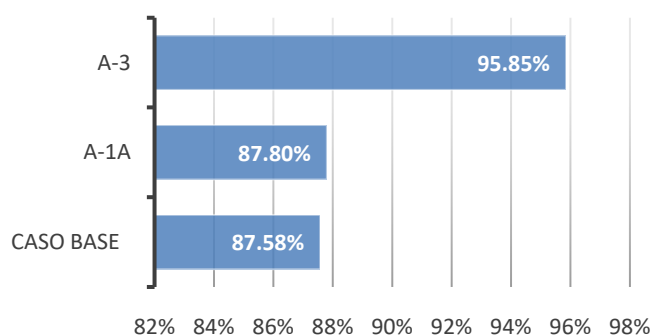


Figura 6. Pureza del bioetanol

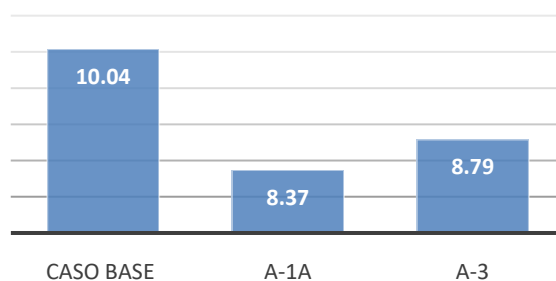


Figura 7. Costo unitario de producción (\$/L)

La emisión de CO₂, así como los residuales provenientes del proceso de destilación y filtración fueron los parámetros más importantes a tener en cuenta respecto al análisis

ambiental. Teniendo en cuenta que los residuos del filtro con flujos importantes se pueden reciclar para la etapa de hidrólisis ácida y los residuales del destilador pueden tener una disposición apropiada o reciclar en la industria para la producción de alimento animal, se puede plantear que el CO₂ es el único residual que no recibe tratamiento en la planta, pero en ninguna de las alternativas representa un impacto negativo sobre el medio ambiente ya que se emite en pocas cantidades. En la figura 8 se muestra la cantidad de dióxido de carbono emitido en cada una de las alternativas.

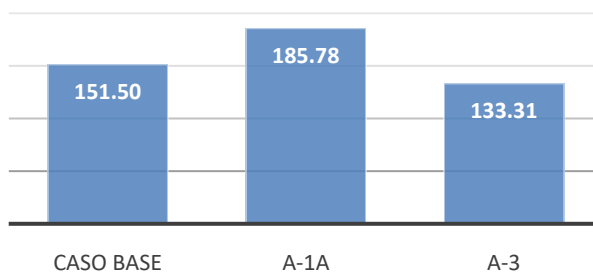


Figura 8. Dióxido de carbono emitido en el proceso (kg/h)

De acuerdo el análisis técnico, económico y medioambiental, la alternativa tres es la más factible, ya que se logra una mayor productividad y pureza de bioetanol y un costo unitario medio entre las otras alternativas estudiadas, además de tener un impacto negativo bajo en el medio ambiente.

4. CONCLUSIONES

La simulación de diferentes alternativas del proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar indica que:

1. La alternativa tres que incluye el proceso de sacarificación y fermentación simultánea, brinda los mejores resultados, tiene un costo unitario de 8,79 \$/L, una productividad de 2,51g/Lh y una pureza de 95,85%.
2. El proceso tiene un impacto negativo bajo sobre el medio ambiente en todas las alternativas analizadas.
3. La herramienta elaborada sobre *SuperPro Designer* permite la simulación del proceso de obtención de bioetanol a partir de otros residuos lignocelulósicos.

REFERENCIAS

- Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., Wallace, B., Montague, L., Slayton, A., & Lukas, J., Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover., National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2002, pp. 12-72.
- Albernas-Carvajal, Y., Pedraza, J., Corsano, G., Rodríguez, L., & González Suárez, E., Primera aproximación a la cinética de la obtención de etanol mediante sacarificación y fermentación simultánea del bagazo., *Afinidad*, Vol. 73, No. 57, 2016, pp. 191-196. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/313859>
- Bušić, A., Marđetko, N., Kundas, S., Morzak, G., Belskaya, H., Šantek, M., Komes, D.,

- Novak, S. & Šantek, B., Bioethanol production from renewable raw materials and its separation and purification: a review., *Food Technology & Biotechnology*, Vol. 56, No. 3, 2018, pp. 289-311. <https://www.researchgate.net/publication/325564836>
- Edeh, I., Bioethanol Production: An Overview., In *Bioethanol Technologies*, F. Inambao. (Ed.), Pietermaritzburg, Sudáfrica: Universidad de KwaZulu-Natal, 2021, pp. 1-22. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94895>
- García, P., y Garza, Y., Sacarificación y fermentación simultánea de olote pretratado., *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, Vol. 5, No. 9, 2016, pp. 53-67. <https://biblat.unam.mx/en/revista/revista-iberoamericana-de-las-ciencias-biologicas-y-agropecuarias>
- Hernández-Galindo, C., Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de frute., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster en Biotecnología Alimentaria, Universidad de Oviedo, España, 2017. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43613/TFM_CeliaHernandezGalindo.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- ICIDCA., Producción de etanol a partir de sustratos alternativos. The Perez-Guerrero Trust Fund for Economic and Technical Cooperation Among Developing Countries., 2016, pp. 5-6. https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/CUB/00083238_00091820%20BIOETANOL%20-%20INFORME%202016.pdf
- Julián-Ricardo, M.C., Baltá-García, J.G., Pérez-Sánchez, E.J., y Pérez-Sánchez, A., Simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto., *Afinidad*, Vol. 75, No. 581, 2018, pp. 39-44. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/335961>
- León, G., Diseño del proceso de fermentación sólida a escala piloto para la producción de celulasas a partir de residuos agroindustriales., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad de Camagüey, Cuba, 2017, pp. 2-8. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v45n2/caz01218.pdf>
- Pérez-Martínez, A., Cervantes-Mendieta, E., Julián-Ricardo, M.C., González-Suárez, E., Gómez-Atanay, A., Oquendo-Ferrer, H., Galindo-Llanes, P., y Ramos-Sánchez, L., Procedimiento para enfrentar tareas de diseño de procesos de la industria azucarera y sus derivados., *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 11, No. 2, 2012, pp. 333-349. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?scrip=sci_arttex&pid=s1665-27382012000200012&Ing=es&tIng=es

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Zilda Miguel Gomes-da Silva. Realizó el estudio, la simulación y el análisis de los resultados.
- Ing. Linet Gálvez-Cantero. Colaboró en la revisión bibliográfica y confeccionó las referencias.

- Ing. Alicia María Gómez-Julián. Colaboró en la revisión bibliográfica y en la simulación.
- Dra.C. María Caridad Julián-Ricardo. Asesoró la investigación y realizó la escritura del artículo.
- Dr.C. Luis Beltrán Ramos-Sánchez. Dirigió la investigación.