



Artículo de investigación

Producción de bioetanol a partir de diferentes sustratos azucarados: Simulación y comparación técnico-económica

Bioethanol production from different sugar substrates: Simulation and technical-economic comparison

Arletis Cruz Llerena^{1,2} , Osney Pérez Ones² , Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas² , Luisa María Beltrán González² 

¹Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca), Dirección de Biotecnología, Vía Blanca No. 804 entre Carretera Central y Calzada Vieja de Guanabacoa, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

²Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae), Facultad de Ingeniería Química, Calle 114 No. 11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

Autor de correspondencia: Osney Pérez Ones, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Facultad de Ingeniería Química, Calle 114 No. 11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: osney@quimica.cujae.edu.cu. ORCID: 0000-0002-0366-0317.

Recibido: 6 de Febrero del 2025

Aceptado: 19 de Julio del 2025

Publicado: 23 de Septiembre del 2025

Resumen. - La fermentación alcohólica constituye una de las etapas fundamentales en la obtención de bioetanol, los costos de las materias primas constituyen alrededor del 70 % de los costos de producción, por lo que el estudio de sustratos alternativos dentro del esquema de producción tradicional a partir de melaza resulta una alternativa para la flexibilización y sostenibilidad de las producciones. En la presente investigación, basada en la simulación de procesos, se realiza una evaluación en la etapa de fermentación de diferentes sustratos azucarados como alternativas para la obtención de etanol. Para el desarrollo de la simulación se empleó como herramienta el simulador Aspen Hysys v10.0 y se tuvieron en cuenta varias consideraciones con el objetivo de lograr un flujo de vino para la destilación de 15 900 kg/h en cada uno de los modelos. Se comprobó que los modelos de simulación obtenidos representan adecuadamente los sustratos y el proceso en estudio. Se propusieron casos de estudio para evaluar la influencia del flujo másico de los sustratos evaluados con respecto al grado alcohólico y al flujo volumétrico de CO₂ generado. Se analizaron los principales parámetros de eficiencia donde se refleja que el mayor porcentaje de grado alcohólico de 8.47 °GL fue para el empleo de jugo mezclado y en cuanto a la eficiencia de fermentación, fue superior en el esquema jugo secundario-miel (JS-miel) con un valor de 93.56 %. En la evaluación técnica económica se determinó que el escenario de JS-miel se presenta como el más favorable con una relación beneficio/costo de 1.5 y un margen bruto de 33.35 %.

Palabras clave: Simulación de procesos; Fermentación alcohólica; Sustratos azucarados; Bioetanol.

Abstract. - Alcoholic fermentation is a crucial stage in bioethanol production. Raw material costs account for around 70% of production costs. Therefore, exploring alternative substrates within the traditional molasses-based production system is a viable option for making production more flexible and sustainable. In this study, based on process simulation, an evaluation is carried out in the fermentation stage of various sugar substrates as alternatives for obtaining ethanol. Simulator Aspen Hysys v10.0 was used, and several considerations were taken into account to achieve a distillate wine flow of 15,900 kg/h in each of the models. It was verified that the simulation models adequately represent the substrates and the process under study. Case studies were proposed to evaluate the influence of the mass flow rate of the evaluated substrates on the alcohol content and the volumetric flow rate of CO₂ generated. The main efficiency parameters were analyzed, showing that the highest percentage of alcohol content, 8.47 °GL, was obtained with the use of mixed juice. The fermentation efficiency was highest in the secondary juice-molasse (JS-molasse) scheme, with a value of 93.56%. The technical-economic evaluation determined that the JS-molasse scenario was the most favorable, with a benefit-cost ratio of 1.5 and a gross margin of 33.35%.

Keywords: Process simulation; Alcoholic fermentation; Sugar substrates; Bioethanol.



1. Introducción

La producción de etanol en Cuba se ha caracterizado por el uso prácticamente exclusivo de las mieles finales de caña como materia prima fundamental, por lo que sus producciones se consideran dependientes en su totalidad a las fábricas de azúcar [1].

En la actualidad se está impulsando el desarrollo de biorrefinerías de caña de azúcar [2-4] a la vez que se investiga en la flexibilidad de sus producciones con el empleo de diferentes sustratos azucarados como la meladura, jugos de caña y las mezclas de estos jugos con miel, debido a la baja disponibilidad de mieles en la industria azucarera [5-9].

La extracción de los jugos azucarados para su uso como materia prima alternativa en la producción de etanol, permite una disminución de sustancias perjudiciales en el proceso de producción de azúcar crudo, tales como sólidos insolubles, polisacáridos, cenizas e impurezas; estas últimas dificultan las etapas de evaporación, concentración y cristalización del azúcar, además de que se recirculan al tanque de alcalización.

De esta manera, se incrementa la eficiencia en la etapa de clarificación del proceso azucarero, obteniéndose un azúcar de mayor calidad y se reduce el consumo de vapor de la fábrica. Asimismo, se favorece la generación de ingresos adicionales en términos de producción y venta de etanol [6-8].

El empleo de jugos de caña en la etapa de fermentación favorece la disminución del consumo de agua de dilución y contribuye además a la disminución del impacto ambiental negativo de la industria del bioetanol, ya que las vinazas resultantes presentan una demanda química de oxígeno notablemente inferior (DQO < 60 g/L) respecto al esquema tradicional con melaza [10].

Los sustratos azucarados convencionales constituyen materias primas ampliamente validadas en la industria azucarera, con rutas metabólicas conocidas para microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae*. El estudio comparativo de diferentes sustratos azucarados posibilita además evaluar el rendimiento de la fermentación (g etanol/g azúcar), minimizar costos, así como identificar los sustratos con mejor balance técnico-económico.

El costo de las materias primas constituye alrededor del 70 % de los costos de producción [11], por lo que el estudio de sustratos alternativos dentro del esquema de producción tradicional a partir de melaza resulta una alternativa para la flexibilización y sostenibilidad de las producciones.

En este sentido, el uso de estos sustratos, así como su integración en la producción de bioetanol en una biorrefinería de caña de azúcar, contribuye a mejorar no solo la eficiencia del proceso de producción de azúcar, si no a la bioeconomía del complejo industrial.

Otro aspecto importante radica en que los sustratos azucarados convencionales constituyen pilares especialmente para países productores de azúcar, y en lo referente al bioetanol de primera generación, este tipo de tecnología se mantiene como la más eficiente en países productores como Brasil y Colombia.

Por lo que, a pesar del auge de fuentes de carbono de segunda generación (lignocelulósicas), el empleo de los mismos, así como su evaluación resulta de gran importancia para la eficiencia de estas producciones, además de que constituye las bases para el estudio futuro de posibles procesos híbridos de primera y segunda generación (1G y 2G).



La fermentación alcohólica constituye una de las etapas fundamentales en la obtención de bioetanol. Debido a la naturaleza biológica de esta etapa, inciden sobre su desarrollo muchas variables y parámetros operacionales [12-14] tanto no lineales como dinámicos; es por ello, que a medida que los procesos aumentan en complejidad el análisis de su comportamiento de forma manual es más difícil y por tanto su modelación resulta más compleja, desafiante y necesaria [15, 16].

En este sentido el uso de la simulación de procesos para el estudio de la fermentación alcohólica constituye una herramienta que facilitaría su evaluación, ya que proporciona una visión de la conducta de un proceso real, lo que resulta beneficioso en sistemas complejos, con interacción de varias variables.

La simulación se puede definir como el uso de un modelo matemático para generar la descripción del estado de un sistema [17]. Una vez desarrollado y validado un modelo de simulación, se pueden evaluar diferentes condiciones sin afectar al sistema real [18, 19]. De ahí la importancia de su empleo en el estudio del proceso de fermentación alcohólica y los desarrollos realizados [15, 20].

Existen investigaciones recientes [15, 21-23], donde se aplica la simulación de procesos en el estudio de la obtención de etanol. La mayoría de los trabajos abordan la evaluación de diferentes condiciones de operación o tecnologías para las etapas de fermentación y destilación. En el caso de la fermentación se centran en aspectos como el modo de fermentación y las condiciones óptimas de operación.

Thielmann y colaboradores [22] emplean el simulador Aspen Hysys para evaluar el proceso tradicional de producción de etanol, así como nuevas rutas tecnológicas.

Por otro lado, en [21] se aborda el estudio de la fermentación alcohólica empleando como fuente de carbono la glucosa, aplicando la modelación matemática.

Sin embargo, en el caso de la fermentación de etanol de primera generación a partir de caña de azúcar, no se encontró ningún reporte donde se aplique la simulación para el estudio comparativo de diferentes sustratos o su integración.

En este sentido, se define como objetivo de este trabajo, evaluar las posibilidades de utilización de diferentes sustratos obtenidos del proceso de producción azucarera en la etapa de fermentación alcohólica a partir de la simulación de procesos.

2. Materiales y métodos

En este trabajo se realizó la evaluación de la etapa de fermentación del proceso de producción de etanol en una biorrefinería de caña de azúcar de primera generación. Como posibles sustratos azucarados se consideraron: la meladura (jugo concentrado), el jugo de los filtros, el jugo secundario, el jugo mezclado y las mezclas de estos jugos con melaza o miel de caña como enfoque de integración al sistema actual.

Para la evaluación del proceso se empleó el simulador Aspen Hysys v10.0.

Para la simulación de la etapa de fermentación alcohólica se utilizó como caso base el modelo obtenido por Cruz y colaboradores [15] en el que se emplea miel final de caña como sustrato.

El modelo está validado con un error relativo máximo de 2.22 %, como los modelos a desarrollar en este trabajo constituyen alternativas de modificación al caso base, su validación se basa en la comparación de los principales aspectos referentes a cada nuevo



sustrato evaluado con lo reportado en la literatura.

Por otro lado, se desarrollaron casos de estudio, para evaluar el comportamiento de las principales variables del proceso ante diferentes escenarios, resultados que pueden ser utilizados en investigaciones posteriores.

Además, se determinó el costo de producción de los sustratos evaluados y se comparó con el esquema tradicional para determinar el escenario más favorable teniendo en cuenta que la capacidad de la destilería es de 100 hL/d de etanol a 75 °GL.

2.1. Modelos de simulación de la etapa de fermentación

Para el desarrollo de la simulación se realizaron varias modificaciones al caso base. La primera de ellas fue el cambio de la composición de la materia prima según la alternativa analizada.

La segunda modificación consistió en la incorporación de un módulo *Adjust* (ADJ-V), en el cual se ajusta a 15 900 kg/h el flujo de vino que se destina a destilación, manipulando el flujo de sustrato a la etapa de fermentación.

Adicionalmente, para los modelos de jugos la reacción de hidrólisis de la sacarosa se incluyó en el módulo Fermentador, para representar que la

sacarosa se desdobla en glucosa (dextrosa) y fructosa.

En la selección de los componentes para la simulación de cada sustrato, se consideró lo reportado en la literatura para el comportamiento de los grados Brix (Tabla 1).

Para la definición de la composición de cada sustrato según lo reportado por Cruz y colaboradores [15], se modificó el contenido de azúcares y sales a partir de los grados brix reportados. En la tabla 1 se muestra este comportamiento en dependencia del sustrato.

Tabla 1. Comportamiento del Brix. Fuente: Elaboración propia.

Corrientes	°Brix		
	Fuente	Valor	Simulación
Meladura	[19]	50-85	66.00
Jugo de filtros	[8]	10-14	13.63
Jugo secundario	[8]	11-17	11.00
Jugo mezclado	[24]	14-15	14.85

2.2 Fermentación utilizando meladura como sustrato

En la tabla 2 se presentan los datos insertados para la simulación de la etapa de fermentación a partir de meladura.

Tabla 2. Datos de las corrientes. Fuente: Elaboración propia

Corrientes	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Flujo másico (kg/h)	Composición (% p/p)
Meladura	101.30	28.00	3 884	Agua: 34.00 Sacarosa: 56.16 Dextrosa: 1.15 Cenizas: 8.69 Fuente: [19]
Vapor calentamiento	50.00	-	-	Agua: 100 %
Meladura a dilución	-	40.00	-	-
Agua de dilución	101.30	28.00	13 350	Agua: 100 %
Meladura diluida	-	30.00	-	-
Agua caliente a la entrada del fermentador (CF)	101.30	29.00	38 160	Agua: 100 %
Agua fría a la salida del fermentador (FF)	-	27.70	-	-
CO ₂ en el desgasificador (CO ₂ desgasificador)	-	33.00	-	-

En la figura 1 se muestra el modelo de simulación de la etapa de fermentación a partir de la meladura.

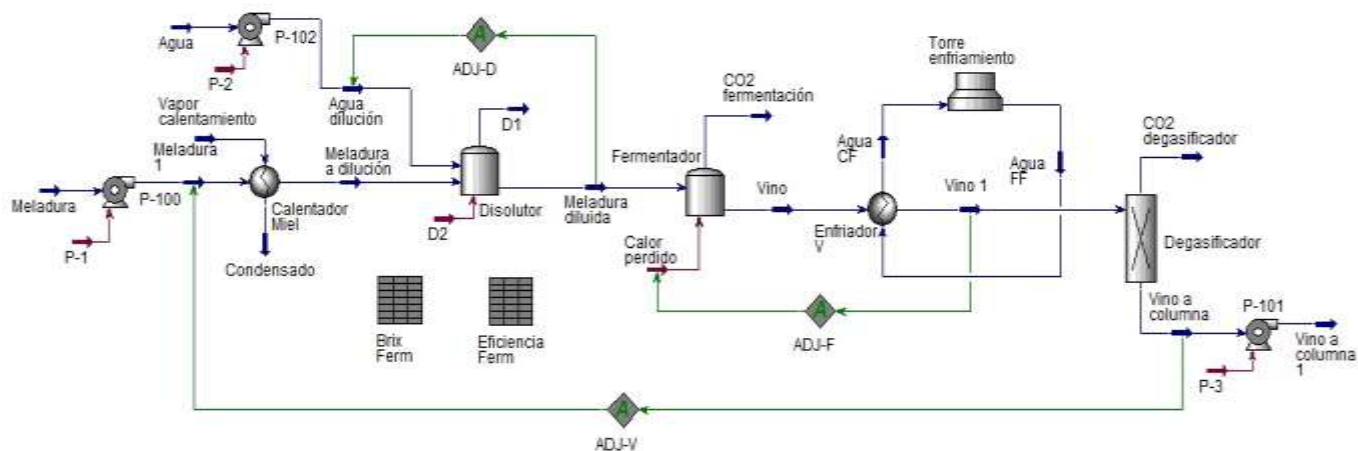


Figura 1. Modelo de simulación de la etapa de fermentación alcohólica a partir de la meladura. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Fermentación utilizando jugo de filtros

Para la simulación de la etapa de fermentación a partir de jugo de filtros (JF) se eliminó la

sección de dilución. En la tabla 3 se presentan los datos introducidos para la simulación.



Tabla 3. Datos de las corrientes. Fuente: Elaboración propia.

Corriente	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Flujo (kg/h)	Composición (% p/p)
Jugo filtros	101.30	85.00	17 030	Agua: 86.37 Sacarosa: 11.53 Dextrosa: 1.65 Cenizas: 0.30 Impurezas: 0.15 Fuente: [7], [25]
Jugo 1	-	30.00	-	-
Agua fría	101.30	27.70	-	Agua: 100 %
Agua caliente	-	29.00	-	-

En la figura 2 se muestra el modelo de simulación obtenido.

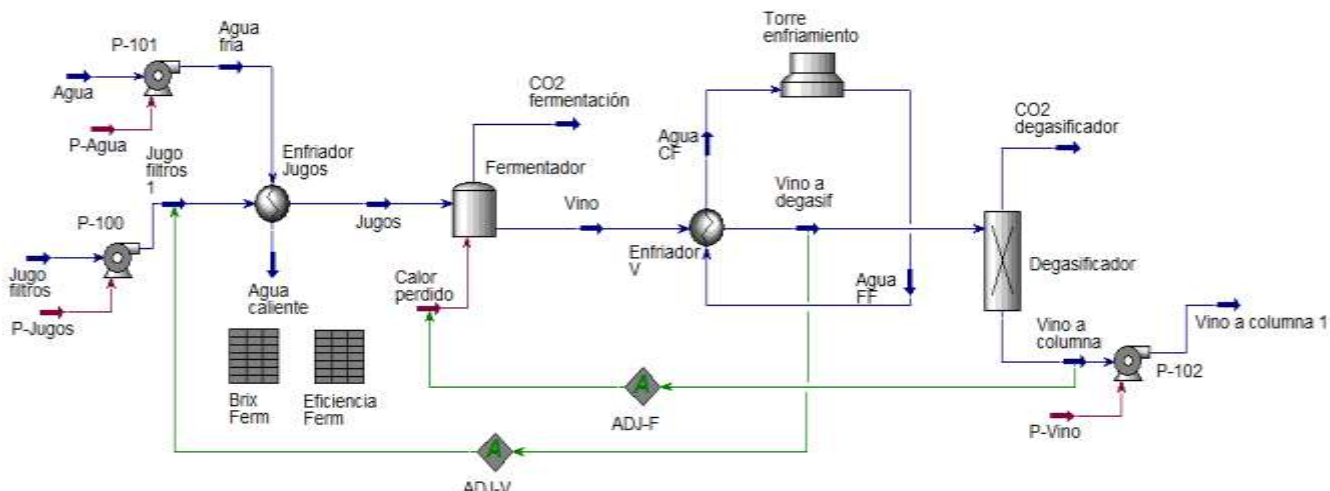


Figura 2. Modelo de simulación de la etapa de fermentación alcohólica a partir de jugo de filtros. Fuente: Elaboración propia

2.4. Fermentación utilizando jugo secundario y jugo mezclado

Para la simulación de la etapa de fermentación a partir de jugo secundario (JS) o mezclado (JM) se modificó el modelo según lo descrito para jugo de filtros.

En este caso solo varía la composición másica y el flujo másico de sustrato (JS: 16 620 kg/h y JM: 17 220 kg/h). En la tabla 4 se muestra la composición másica seleccionada para cada sustrato.

Tabla 4. Composición másica de los sustratos. Fuente: *[7], **[24].

Componentes	Composición (% p/p)	
	JS*	JM**
Agua	89.00	85.15
Sacarosa	9.95	12.71
Dextrosa	0.60	1.40
Impurezas	0.09	0.29
Cenizas	0.36	0.45



2.5. Fermentación utilizando mezcla jugos-miel

En este caso para la simulación de la etapa de fermentación se empleó como sustrato la mezcla de jugos-miel; se añadió el módulo Mixer que simula el punto de mezcla entre miel diluida y jugos. Se emplearon los mismos datos de composición, temperatura y presión

de los esquemas anteriores. Se consideró una relación de alimentación 0.7:0.3 para la relación jugos-miel, la cual se ajustó a través del módulo *Set-1*. La composición de la miel final empleada fue la reportada por [15].

En la figura 3 se muestra el modelo de simulación obtenido de la etapa de fermentación a partir de jugo de filtros-miel.

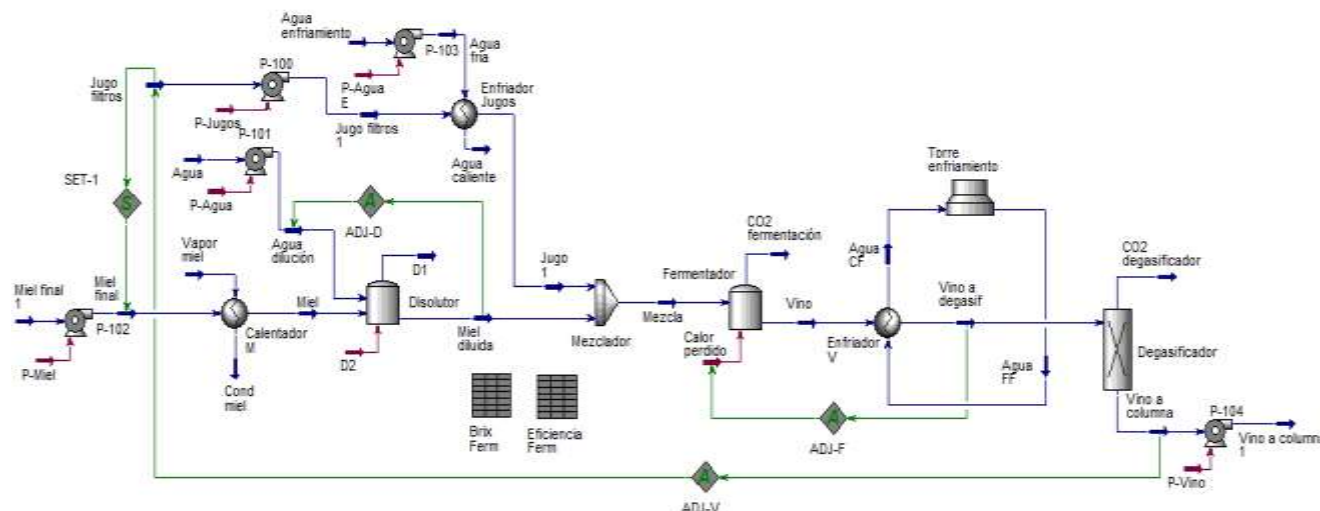


Figura 3. Modelo de simulación de la etapa de fermentación alcohólica a partir de jugo de filtros-miel Fuente: Elaboración propia.

2.6. Evaluación económica

Se realizó un análisis económico preliminar a partir del índice neto de rentabilidad o relación beneficio/costo (B/C). Además, como complemento se determinó el margen bruto anual, que representa qué parte de los ingresos el proyecto se retendrá como ganancia total.

Para la estimación de los beneficios económicos, se consideró el ingreso por etanol producido a un precio de 0.5 US\$/L [22]. En el caso de los costos, se determinaron los egresos de cada escenario evaluado teniendo en cuenta los costos de materias primas y facilidades auxiliares (vapor, agua de enfriamiento y electricidad).

El costo considerado para la melaza, meladura, jugo de los filtros, jugo secundario y jugo mezclado fue de 145 US\$/t, 100 US\$/t, 41 USD/t, 13 US\$/t y 44 US\$/t respectivamente; estos valores se basan en los reportes de la planta.

En el caso de las utilidades se emplearon los costos reportados por [22] para vapor de baja presión (0.0042 US\$/kg), agua (0.044 US\$/kg) y para la electricidad (0,06 US\$/kWh), con un tiempo de operación de 8 000 h/año. Basado en lo referido por Pérez-Ones y Flores-Tlacuahuac [26].

3. Resultados y discusiones

3.1. Resultados de la simulación



El uso de diversos sustratos en la producción de bioetanol, así como su integración en una biorrefinería de caña de azúcar, representa un reto debido a la composición variable de los mismos, por lo que la conducción de la fermentación estará sujeta a la calidad y características de la materia prima que se emplee.

En este sentido, primeramente, para comprobar los resultados obtenidos en los modelos de simulación, se realizó la validación de los sustratos evaluados, debido a la variabilidad que puede ocurrir en la estimación de las propiedades físicas y

químicas por las consideraciones realizadas para su simulación. Una vez comprobada su validez, se realiza una comparación de los principales parámetros del proceso con reportes en la literatura.

En la tabla 5 se reportan los valores de densidad y capacidad calorífica calculados mediante el simulador Aspen Hysys v.10.0 para los sustratos evaluados.

La capacidad calorífica se calculó utilizando la ecuación 1, reportada para jugo y meladura en función del Brix (%), pureza (P, %) y temperatura (T, °C).

$$C_p = 4.1868 - \text{Brix} \cdot (0.0297 - 4.610^{-5} \cdot P) + 7.510^{-5} \cdot \text{Brix} \cdot T \quad (1)$$

Tabla 5. Validación de los sustratos. Fuente: Elaboración propia

Densidad (kg/m³)				
Corrientes	Fuente	Valor	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Meladura	[27]	1 347.48	1 425	5.75
Jugo de filtros	[7]	1 059.00	1 018	4.02
Jugo secundario	[7]	1 009.00	1 007	0.19
Jugo mezclado	[28]	1 047.50	1 024	2.29
Capacidad calorífica (kJ/kg.°C)				
Meladura	[29]	2.636	2.525	4.20
Jugo de filtros		3.888	3.837	1.30
Jugo secundario		3.883	3.904	0.55
Jugo mezclado		3.892	3.809	2.14

Como se observa en la tabla 5, las propiedades calculadas en el simulador en comparación con lo reportado en la literatura presentan errores relativos menores del 6 %. Adicionalmente se comparó la conductividad

térmica (W/m.K), que para la meladura se determinó por la ecuación (2) reportada en [29] válida en un intervalo de temperatura de 0-80 °C, con un error relativo menor del 2 % ([29]: 0.557; Aspen Hysys: 0.547).

$$k = \left[0.561 + 0.206 \cdot \left(\frac{T}{100} \right) - 0.0943 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 0.007746 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right] \cdot \left[1 - 0.54 \cdot \left(\frac{\text{Brix}}{100} \right) \right] \quad (2)$$

En el caso de los jugos los valores de conductividad térmica (W/m.K) fueron: JF: 0.6643, JS: 0.667 y JM: 0.6621 similares a 0.6 referido por [29] para 15 °Brix y 85 °C. Por lo que se puede plantear que las corrientes

representan adecuadamente cada uno de los sustratos evaluados.

En la tabla 6 se realiza una comparación para un flujo másico del vino a columna de 15 900 kg/h, entre los resultados referidos por Cruz y



colaboradores [15] y los obtenidos con el simulador Aspen Hysys v.10.0 en este trabajo para los diferentes sustratos utilizados.

Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos en Aspen Hysys v.10.0 para diferentes sustratos. Fuente: Elaboración propia

Sustrato	Parámetro			
	Grado alcohólico del vino (% v/v)	Temperatura del vino a columna (°C)	Eficiencia en fermentación (%)	Flujo másico de dióxido de carbono, CO ₂ (kg/h)
Miel final [15]	6.14	32.97	93.47	772.6
Meladura	7.78	32.89	92.82	1 017.0
JF	7.90	33.00	92.79	1 032.0
JS	6.26	32.96	93.23	796.2
JM	8.47	32.98	92.66	1 118.0
JF-miel	7.02	32.94	93.40	888.9
JS-miel	6.41	33.00	93.56	802.7
JM-miel	7.26	32.99	93.38	922.7

Como resultado de la simulación de la etapa de fermentación alcohólica a partir del uso de diferentes sustratos azucarados, se obtuvieron mostos fermentados (vinos) con grados alcohólicos entre 6.26 °GL (jugo secundario) y 8.47 °GL (jugo mezclado). Cabe destacar que los valores obtenidos fueron superiores a los reportados en estudios precedentes por: Mesa y colaboradores [30] (4.98-5.80 °GL), Rivero y colaboradores [31] (4.81-5.90 °GL) y García-Prado y colaboradores [32] (5.02-5.85 °GL).

La temperatura de fermentación, constituye una de las principales variables a controlar dentro del sistema. Leal y colaboradores [33] evaluaron diferentes valores de temperatura de fermentación y determinaron que, para 33 °C, se obtiene la mayor concentración de etanol en el mosto fermentado, por lo que se considera la temperatura óptima de fermentación. Este resultado coincide con el valor obtenido en la simulación para la temperatura del vino a la columna, la cual se mantiene alrededor de 33 °C

aproximadamente. De igual forma, este resultado cumple con el intervalo reportado en [34], donde se establece que una temperatura de 32 ± 2 °C es favorable para el desarrollo de la fermentación alcohólica.

El flujo másico del vino a columna se logra mantener entre 15 810-16 210 kg/h lo que se corresponde con lo previsto por la capacidad de destilación instalada en la planta bajo estudio.

La eficiencia de la fermentación depende en gran medida de las materias primas empleadas, en particular de la disponibilidad y el índice de consumo de azúcares fermentables. Para todos los sustratos evaluados la eficiencia obtenida fue superior a la del esquema tradicional.

Los mejores resultados se alcanzan en las mezclas, donde con la utilización de jugo secundario-miel se obtuvo la mejor (93.56 %). Esto demuestra que la meladura y los diferentes jugos, así como sus mezclas con



miel final en diferentes proporciones, constituyen sustratos con características apropiadas para la fermentación.

Los resultados de eficiencia en fermentación obtenidos son mayores, debido a que el contenido de sólidos disueltos totales es mayor. En la literatura consultada se reportan valores la eficiencia de fermentación para el empleo de mezclas de jugos (JF, JS y JM) y miel (M), tal es el caso de: Mesa y colaboradores [30] (JF: 71.63 %, JS: 71.27 %, JF-M: 78.56 % y JS-M: 70.22 %), Rivero y colaboradores [31] (JF: 72.36 %, JS: 64.54 %, JF-M: 86.61 % y JS-M: 71.43 %) y García-Prado y colaboradores [32] (JF: 72.05 %, JS: 71.84 %, JF-M: 78.95 % y JS-M: 71.69 %), en estos casos la eficiencia fue notablemente inferior ya que no sobrepasa el 90 %.

Según Bergmann y colaboradores [35], la cantidad de dióxido de carbono generado en la fermentación presenta una relación directa con respecto al etanol producido. En este sentido, se puede observar en la tabla 6 una correspondencia entre el flujo de etanol y CO₂ para cada escenario evaluado, por ejemplo, en el caso del jugo mezclado, se obtienen los mayores valores de grado alcohólico (8.47 % v/v) y emisiones de CO₂ (1 118 kg/h).

A partir de los resultados, se concluye que los modelos de simulación obtenidos representan adecuadamente los sustratos y el proceso en estudio. Se demuestra que el empleo de estos

sustratos azucarados alternativos, como enfoque de integración en una biorrefinería de caña de azúcar, resultan alternativas eficientes para la producción de etanol. Además, los modelos de simulación obtenidos constituyen herramientas para la toma de decisiones y la evaluación de posibles alternativas de mejoras, así como nuevas condiciones de operación.

3.2 Caso de estudio: Influencia del aumento del flujo de los sustratos utilizados sobre variables del proceso

Con el objetivo de analizar la influencia que tiene el flujo de cada sustrato alimentado sobre algunas variables importantes del proceso, se realizó un estudio apoyado en el modelo de simulación validado del proceso de fermentación.

Para cada sustrato se tomó como variable independiente el flujo másico de sustrato utilizado: flujo de meladura de 3 000-5 000 kg/h, para jugo de filtros, jugo secundario y jugo mezclado una variación de 16 000-18 000 kg/h; por otro lado, para las mezclas de jugos-miel se consideró como variable independiente el flujo de los jugos de 6 000-8 000 kg/h, se seleccionó un paso de 500 kg/h y como variables dependientes la fracción volumétrica de etanol en vino a columna y el flujo volumétrico de CO₂ generado. En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos.


Tabla 7. Resultados obtenidos del caso de estudio. Fuente: Elaboración propia

Variable independiente	Variable dependiente									
	Grado alcohólico en vino a columna (° GL)					Flujo volumétrico de CO ₂ generado (m ³ /h)				
	Escenarios					Escenarios				
Flujo másico de (kg/h)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Meladura	7.85	7.79	7.79	7.74	7.69	0.90	1.05	1.21	1.36	1.51
Jugo de filtros	7.91	7.91	7.91	7.91	7.91	1.12	1.15	1.19	1.22	1.25
Jugo secundario	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	0.89	0.91	0.94	0.97	0.99
Jugo mezclado	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	1.20	1.23	1.27	1.31	1.35
Jugo de filtros-miel	7.06	7.06	7.05	7.03	7.03	0.94	1.02	1.10	1.18	1.26
Jugo secundario-miel	6.41	6.40	6.40	6.39	6.30	0.86	0.93	1.00	1.08	1.15
Jugo mezclado-miel	7.28	7.27	7.26	7.26	7.26	0.97	1.06	1.14	1.22	1.30

En la tabla 7 se aprecia que, con el aumento del flujo de los sustratos, el flujo volumétrico de CO₂ generado se incrementa (directamente proporcional), debido a que su formación en el medio fermentativo está en función de la conversión de azúcares en diversos compuestos como ácido acético y alcoholes superiores.

En este sentido, se obtuvo un aumento considerable para meladura con un valor de 64%; jugo de filtros, jugo secundario y jugo mezclado 12%; jugo de filtros-miel, jugo secundario-miel y jugo mezclado-miel 33 % aproximadamente.

Sin embargo, en el caso de la concentración de etanol no se muestra variación considerable, este comportamiento, puede deberse a que como se incrementa la generación de CO₂ en el fermentador puede ocurrir arrastre de etanol.

3.3 Evaluación técnico-económica

En la tabla 8 se presentan los indicadores técnicos a evaluar para cada escenario. La determinación del etanol comercializable para los diferentes sustratos, se realizó a partir del flujo volumétrico de etanol en el vino y considerando una eficiencia de destilación del etanol de 99,5% [15]. Desde el punto de vista ambiental, se reporta que la producción de etanol genera de 12 a 15 litros de vinazas por cada litro de etanol destilado [36].

Estas vinazas, caracterizadas por una elevada demanda química de oxígeno (70 - 90 g DQO/L [38]; 60-150 g DQO/L [38], [39]) se consideran como el principal residual de la industria del bioetanol.

A partir de la relación existente entre el etanol producido y la generación de vinazas, se consideró para la estimación de la vinaza en los escenarios evaluados un índice de generación de vinaza de 12 L por litro de etanol.



Tabla 8. Indicadores técnicos. Fuente: Elaboración propia

Escenario	Parámetro					
	Sustrato (kg/h)	Vapor (kg/h)	Agua de dilución (m ³ /h)	Electricidad (kWh/año)	Agua de enfriamiento (m ³ /h)	Etanol producido (m ³ /h)
Melaza	3 000	39.85	13.70	925.4	38.16	0.97
Meladura	3 884	51.27	13.35	947.8	38.16	1.25
JF	17 030	-	-	5,909.6	208.26	1.27
JS	16 620	-	-	5,890.0	208.76	0.99
JM	17 220	-	-	5,920.4	208.76	1.37
JF-miel	16 820	24.25	8.43	2,814.0	71.56	1.12
JS-miel	16 660	24.13	8.31	2,790.0	71.56	1.01
JM-miel	16 890	24.40	8.45	2,825.0	71.56	1.16

En la figura 4 se presenta el comportamiento del consumo de utilidades y la generación de residuales (vinazas y CO₂) como indicadores técnico-ambientales para cada sustrato, bajo este aspecto, el esquema productivo de menor

impacto ambiental es el de jugo secundario, ya que se cuenta con menor generación de vinazas (11.88 m³/h) y CO₂ (0.92 m³/h).

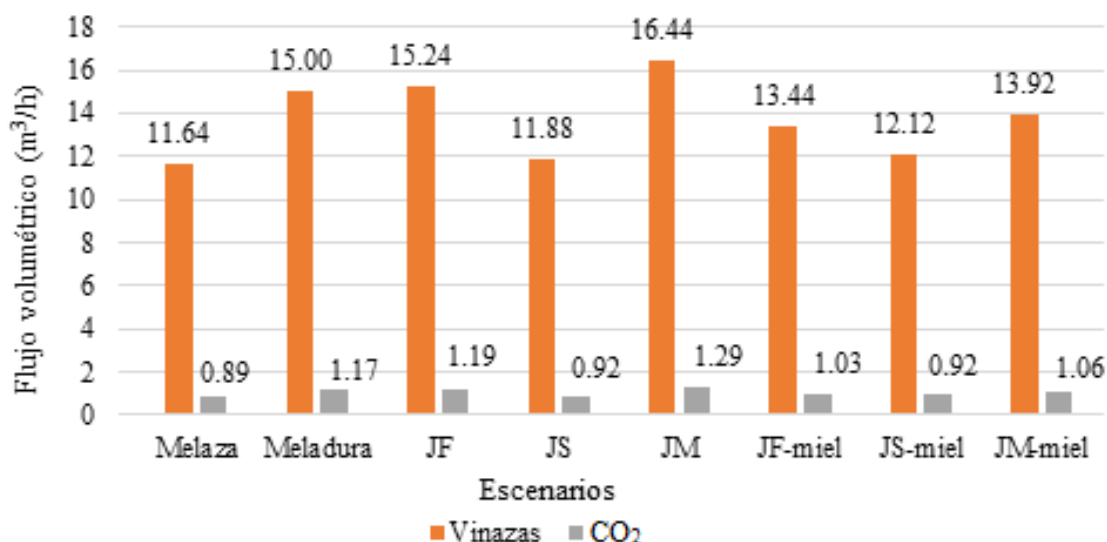


Figura 4. Indicadores técnico-ambientales. Fuente: Elaboración propia

De forma general, desde el punto de vista técnico-ambiental, las mezclas de jugos azucarados y miel constituyen los escenarios más favorables, ya que, si bien la generación de vinazas y CO₂ es ligeramente superior al del escenario de jugo secundario, la productividad de etanol es mayor y el

consumo de agua de enfriamiento disminuye considerablemente.

Para la estimación del indicador de rentabilidad se determinaron los ingresos y costos anuales (US\$/año). Los ingresos se calcularon a partir de la venta de etanol. Los



egresos se asocian al consumo de materias primas, materiales y servicios auxiliares y se calcularon como costos totales. En la tabla 10 se presentan los beneficios (ingresos) y costos anuales asociados a cada escenario evaluado.

El empleo de jugo de filtros y mezclado no es rentable bajo las condiciones del estudio. Para el uso de meladura, jugo secundario y la mezcla de JS-miel se obtuvieron los mejores indicadores de rentabilidad

Tabla 10. Indicador de rentabilidad. Elaboración propia

Escenario	Ingreso (US\$/año)	Costo (US\$/año)	B/C	Margen bruto (%)
Melaza	4 437 477	3 653 544	1.21	17.67
Meladura	5 700 730	3 282 981	1.74	42.41
JF	5 781 865	6 322 257	0.91	-9.35
JS	4 521 784	2 509 127	1.80	44.51
JM	6 239 210	6 856 555	0.91	-9.89
JF-miel	5 093 806	4 549 228	1.12	10.69
JS-miel	4 621 956	3 080 521	1.50	33.35
JM-miel	5 277 379	4 755 257	1.11	9.89

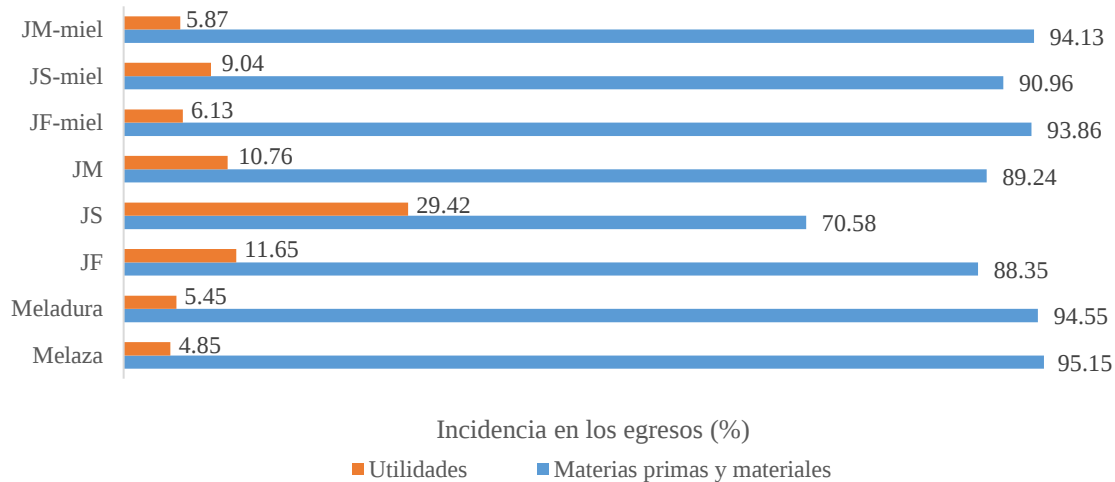
El escenario de jugo secundario fue el más favorable (B/C: 1.8, margen bruto: 44.51%), debido al incremento en la productividad de etanol y al bajo precio de la materia prima. Por otro lado, teniendo en cuenta tanto las consideraciones ambientales como económicas, el empleo de JS-miel se presenta como el escenario más favorable para la implementación de sustratos azucarados alternativos (B/C: 1.5, margen bruto: 33.35 %).

Este escenario cuenta con buenos indicadores de rentabilidad, con un costo unitario de 381 USD/m³ etanol y su impacto ambiental en considerablemente inferior, con un consumo de vapor inferior en un 39% aproximadamente con respecto al esquema tradicional y menor

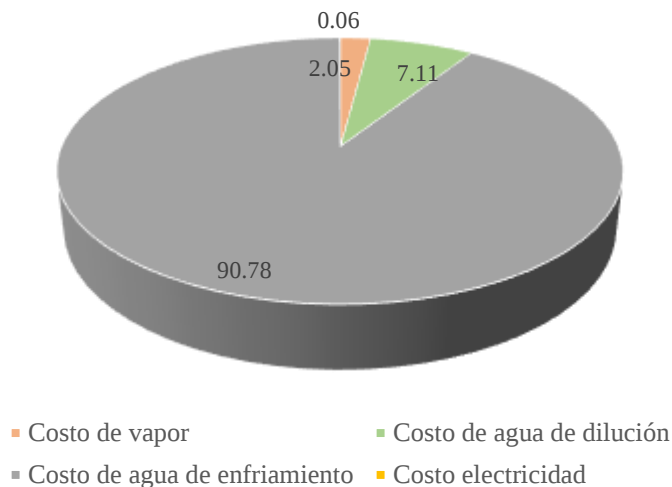
generación de vinazas y CO₂ en comparación con los nuevos escenarios evaluados.

Como complemento de este análisis se presenta en la figura 4 (a) el comportamiento de los egresos considerados. Se puede observar que las materias primas representan la mayor parte de los egresos, por lo que cualquier mejora en este sentido contribuiría notablemente al incremento de la eficiencia de las producciones.

En la figura 4 (b) se muestra el comportamiento del costo de las utilidades para el escenario más favorable seleccionado (JS-Miel), en este sentido, el consumo de agua de enfriamiento (71.56 m³/h) y agua de dilución resultan como los de mayor incidencia (8.31 m³/h).



a. Incidencia en los egresos



b. Facilidades auxiliares

Figura 4. Comportamiento de los egresos. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados económicos se concluye que la mayoría de los escenarios evaluados son favorables como sustratos en la producción de bioetanol.

Otro aspecto importante dentro de las biorrefinerías de caña de azúcar es lograr producciones eficientes y que respondan a los

enfoques de economía circular. En este sentido, la recuperación de CO₂ contribuiría a mitigar los impactos ambientales de esta industria y representaría una ganancia adicional para el proceso por la comercialización del CO₂ recuperado y purificado como materia prima para otras producciones [40]. Por lo que, como



perspectivas futuras en las investigaciones, podría evaluarse la recuperación y purificación del dióxido de carbono generado en la fermentación, así como su influencia en la rentabilidad de la producción de etanol a partir de los nuevos sustratos evaluados.

4. Conclusiones

En el trabajo se evaluó la etapa de fermentación alcohólica a partir de diferentes sustratos azucarados con el apoyo de modelos de simulación validados, desarrollados en Aspen Hysys v10.0. Los sustratos comparados fueron meladura, jugos y mezclas de jugo con miel. Se obtuvieron concentraciones de etanol que se encuentran entre 6.26 y 8.47 % con una eficiencia en fermentación alrededor del 93 %.

Los casos de estudio permitieron comprobar la influencia del flujo másico de los sustratos evaluados con respecto al grado alcohólico y al flujo volumétrico de CO₂ generado, se obtuvo que, bajo las condiciones consideradas, para el caso del grado alcohólico no incide prácticamente; sin embargo, se evidencia una relación directa en cuanto a la producción de CO₂, pues mientras mayor sea la disponibilidad de azúcares reductores totales a convertir en etanol y congéneres, se producirá mayor cantidad de CO₂.

Por otro lado, en el análisis técnico-económico se obtuvo que el empleo de meladura, jugo secundario y jugo secundario-miel (JS-miel) es viable, resultó como escenario más favorable el de JS-miel, con una producción de etanol de 1.01 m³/h, un índice beneficio/costo de 1.5 y un margen bruto de 33.35 %. Por lo que a partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que el empleo de sustratos azucarados diversos, así como su integración en el esquema tradicional

de producción de bioetanol en una biorrefinería de caña de azúcar constituyen una alternativa viable para mejorar la eficiencia de las producciones y su flexibilización.

5. Reconocimiento de autoría

Arletis Cruz Llerena: Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Borrador original; Escritura, Revisión y edición; Administración del proyecto. *Osney Pérez Ones:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Revisión y edición. *Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Revisión y edición. *Luisa María Beltrán González:* Investigación; Análisis de datos; Escritura.

Referencias

- [1] M. Ibáñez-Fuentes, G. Saura-Laria, R. García-Gutiérrez, E. Carrera-Bocourt, N. Herrera-Marrero, M. Lorenzo-Izquierdo y A. Reyes-Linares. “Potencial fermentativo de mieles finales para la producción de etanol en las destilerías”. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 54, no. 2, pp. 56-60, 2020. Disponible: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2020/11/articulo-8-1.pdf>
- [2] M. Morales, A. C. De Armas, E. González, N. Ley y G. Villanueva. “La sinergia entre las biorrefinerías de azúcar y el desarrollo de la industria química en Cuba”. *Universidad y Sociedad*, vol. 13, no. 5, pp. 81-91, 2021. Disponible: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2213>
- [3] A. Pérez, L. Zumalacárregui y O. Pérez. “Evaluación de tecnologías para la obtención de productos químicos de alto valor agregado y biocombustibles”. *Universidad y Sociedad*, vol.



- 15, no. 4, pp. 138-153, 2023. Disponible: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3961>
- [4] R. Rodríguez, A.C. de Armas, L. Rodríguez y Y. García. “Evaluación prospectiva para transformar una fábrica de azúcar en biorrefinería”. *Centro Azúcar*, vol. 42, no. 4, pp. 85-95, 2015. Disponible: https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/240
- [5] D. Cosme, L. Zumalacárregui, O. Pérez y I. Pérez. “Análisis de alternativas para la rehabilitación de la destilería Héctor Molina”. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 52, no. 1, pp. 58-64, 2018. Disponible: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2019/06/art%C3%ADculo9.pdf>
- [6] R. De la Cruz, E. González, J. Pedraza y J. Miño. “Plan experimental de mezclas para diseñar un sistema de tratamiento de sustratos no convencionales para producir etanol”. *+Ingenio*, vol. 3, no. 1, pp. 54-62, 2021. <https://doi.org/10.36995/j.masingenio.2021.03.01.005>
- [7] M. Cortés, A. Armas, I. Alomá y M. Morales. “Impacto de la extracción del jugo de los filtros en la sostenibilidad de un complejo azucarero industrial”. *Centro Azúcar*, vol. 48, no. 1, pp. 59-70, 2021. Disponible: https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/download/722/820/963
- [8] J. Díaz. “Valoración de alternativas para la obtención de etanol a partir de mezclas de jugos secundarios y melazas en la destilería Jesús Rabí”. Tesis de Maestría, Universidad de Matanzas, Cuba, 2021. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17316.60804>
- [9] Y. Lamas, A.C. de Armas, Y. Albornas y E. González. “Análisis preliminar de la fermentación alcohólica utilizando mezclas de jugo de los filtros, miel final y meladura”. *Centro Azúcar*, vol. 50, no. 3, e1035, 2023. Disponible: https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/767
- [10] J. Chanfón, J. y Y. Lorenzo. “Alternatives for treatment of the distillery vinasse. National and international experiences”. *Centro Azúcar*, vol. 41, no. 2, pp. 56-67, 2014. Disponible: https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/255
- [11] M. Ibáñez-Fuentes, G. Saura-Laria, I. Pérez-Bermúdez, O. Pérez-Ones y L. Zumalacárregui-de-Cárdenas. “Análisis de alternativas para la producción de etanol a partir de jugos de los filtros y jugos secundarios. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 52, no.1, pp. 21-29, 2018. Disponible: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2019/06/art%C3%ADculo4.pdf>
- [12] López, L. Zumalacárregui, y O. Pérez. “Análisis de componentes principales aplicado a la fermentación alcohólica”. *Revista Científica de la UCSA*, vol. 6, no. 2, pp. 11-19, 2019, <http://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2019.006.02.011-019>
- [13] D. E. Ochoa, D. S. Duran y Y. Y. Trujillo. “Adaptación de levaduras: factores de incidencia de estrés fermentativo del género *Saccharomyces* en vinificación. Una revisión”. *ION*, vol. 37, no. 1, pp. 83-98, 2024. <https://doi.org/10.18273/revion.v37n1-2024006>
- [14] I.F. Pinheiro, H.L. Serrano, L.A. Sphaier, F.C. Peixoto y V.N.H. Silva. “Heat and mass transfer with chemical kinetics in alcoholic fermentation of multiple sugars: Lumped formulation and dimensional analysis”. *Journal of Food Engineering*, vol. 366, pp. 11863, 2024. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111863>
- [15] A. Cruz, O. Pérez, L. Zumalacárregui y J. L. Pérez. “Desarrollo y validación de un modelo de Aspen Hysys v10.0 para el proceso de fermentación alcohólica”. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 54, no. 1, pp. 26-37, 2020. Disponible: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2020/07/articulo-6.pdf>



- [16] K. C.S. Rodrigues, J. L.S. Sonego, A.J.G. Cruz, A. Bernardo y A. C. Badino. "Modeling and simulation of continuous extractive fermentation with CO₂ stripping for bioethanol production". *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 132, pp. 77-88, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.024>
- [17] S. Ranjan. *Process modeling and simulation for chemical engineers*. Toronto, Canada: J. Wiley and Sons, 2017, pp. 356.
- [18] E. Thielmann, R. Cavalcante and A. Young. "Simulation and economic evaluation of different process alternatives for the fermentation and distillation steps of ethanol production". *Energy Conversion and Management*, vol. 265, 115792, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115792>
- [19] A. Parkash. "Modeling of ethanol production from molasses: A review". *Industrial Chemistry*, vol. 1, no. 2, pp. 1-6, 2015. <https://doi.org/10.4172/2469-9764.1000108>
- [20] A. Díaz-Molina y M. Ribas-García, "Sisalco: nueva solución para la contabilidad alcoholera en destilerías cubanas". *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 49, no. 1, pp. 32-39, 2015. Disponible: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2019/05/Icidca-Vol.-49-No.-1-2015.pdf>
- [21] G. Mihul and K. Ashish. "Simulation of ethanol production process using Aspen Plus and optimization based on response surface methodology". *Research Journal of Chemistry and Environment*, vol. 23, no. 4, pp. 81, 2019. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/338158917_Simulation_of_ethanol_production_process_using_Aspen_Plus_and_optimization_based_on_response_surface_methodology
- [22] E. Thielmann, R. M. Cavalcante and A. F. Young. "Simulation and economic evaluation of different process alternatives for the fermentation and distillation steps of ethanol production". *Energy Conversion and Management*, vol. 265, pp. 115792, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115792>
- [23] A. B. R. de Jesus and J. C. C. Miranda. "Assessment of the applicability of methods and tools in process systems engineering for fermentation processes". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 17, pp. 1121-1155, 2023. <https://doi.org/10.1002/bbb.2520>
- [24] G. Saura, R. García, M. Otero, J. Martínez, D. Bello y I. Pérez. "Experiencias en la producción de etanol a partir de jugos de caña mezclados. Parte I. Materias primas". *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 43, no. 2, pp. 42-46, 2009. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120681004.pdf>
- [25] M. Otero-Rambla, R. García, M. Pérez, J. Martínez, M. Vasallo y G. Saura. "Producción de bioetanol a partir de mezclas de jugos-melazas de caña de azúcar". *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 43, no. 1, pp. 17-22, 2009. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120657003>
- [26] O. Pérez-Ones and A. Flores-Tlacuahuac. "A stochastic data-driven Bayesian optimization approach for intensified ethanol-water separation systems". *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 197, pp. 109708, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109708>
- [27] Y. Rodríguez, S. Mendoza, y M. Ribas. "Hidrólisis enzimática de la meladura". *Centro Azúcar*, vol. 50, no. 1, pp. 1-9, 2023. Disponible: https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/issue/download/69/51
- [28] Z. Astolfi-Filho, L. Minim, J. Telis-Romero, V. Minim, and V. Telis. "Thermophysical properties of industrial sugar cane juices for the production of bioethanol". *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 55, no. 3, pp. 1200-1203, 2010. <https://doi.org/10.1021/je900590t>



- [29] P. Rein. *Cane sugar engineering*. 2nd edition, Berlin, Germany: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2017, pp. 943.
- [30] L. Mesa, E. González, M. González y G. Agüero. “La producción de etanol. Alternativas de materias primas”. *Revista Cubana de Química*, vol. 17, no. 1, pp. 129-137, 2005. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543685055.pdf>
- [31] R. Rivero, M. Morales y L. Mesa. “Evaluación económica de la utilización de mezclas de sustratos azucarados para la producción de etanol”. *Centro Azúcar*, vol. 39, no. 4, pp. 29-35, 2012. Disponible: https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/download/351/343/380
- [32] R. García-Prado, A. Pérez-Martínez, L. Mesa-Garriga, I. González-Herrera, E. González-Suarez and K. Diéguez-Santana. “Incorporación de otras materias primas como fuentes de azúcares fermentables en destilerías existentes de alcohol”. *Facultad de Ingeniería*, no. 75, pp. 130-142, 2015. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n75a13>
- [33] I. Leal, G. Tarantino, R. Hernández y H. Morán. “Efecto de la temperatura y el pH en la fermentación del mosto de Agave cocui”. *Multiciencias*, vol. 14, no. 4, pp. 375-381, 2014. Disponible: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/multiciencias/article/view/19472>
- [34] M. Tuárez, M Laz, S. Bermello y E. Díaz. “Evaluación de levaduras en la producción de etanol a partir de melaza de caña de azúcar”. *Espamciencia*, vol. 11, no. 2, pp. 115-119, 2020. https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v11i2.193
- [35] J. C. Bergmann, D. Trichez, L. P Sallet, F. Silva, and J. R. Almeida. “Technological advancements in 1G ethanol production and recovery of by-products based on the biorefinery concept”, in *Advances in Sugarcane Biorefinery*. Brasilia, DF, Brazil: Elsevier. 2018, pp. 73-95.
- [36] P. Sica, R. Carvalho, K. C. Das and A. Baptista. “Biogas and biofertilizer from vinasse: making sugarcane ethanol even more sustainable”. *J. Mater Cycles Waste Manag.*, vol. 22, no. 5, pp. 1427–1433, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01029-y>
- [37] A. P. del M. Chaile, M.E. Uboldi, y M. M. E. Ferreyra. “Tratamiento químico de vinaza de caña de azúcar con peróxido de hidrógeno”. *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 59, no. 1, e20504, 2025. <https://doi.org/10.15359/rca.59-1.5>
- [38] J. Galindo, N. González, Y. Marrero, M. Rodríguez and M. Herrera. “Saccharomyces cerevisiae hydrolyzate: its effect on the in vitro ruminal microbial population of star grass (*Cynodon nlemfuensis*)”. *Cuban Journal of Agricultural Science*, vol. 58, 2024. Available: <https://www.cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/1152/1705>
- [39] A. E. Guerrero Escobedo, J. L. Mendoza Bobadilla, J. A. Guerrero Llúncor, C. Vasquez Blas, R. F. Rodríguez Espinoza y S. R. Celis Rojas. “Propuesta de una planta de etanol con ahorro de agua, energía y reducción de vinazas”. *Alpha Centauri*, vol.3, no. 1, pp. 24-33, 2022. <https://doi.org/10.47422/ac.v3i1.42>
- [40] A. Cruz, O. Pérez, L. Zumalacárregui, K. Almira, y D. Rosales. “Simulación de la etapa de recuperación y purificación de dióxido de carbono en la producción de etanol”. *TecnoLógicas*, vol. 27, no. 59, e2845, 2024. <https://doi.org/10.22430/22565337.2845>



Derechos de Autor (c) 2025 Arletis Cruz Llerena, Osney Pérez Ones, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas, Luisa María Beltrán González



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)