

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL EXTRAFINO MEDIANTE SIMULACIÓN CON ASPEN HYSYS V10.0

EVALUATION OF EXTRA FINE ETHANOL PRODUCTION BY SIMULATION WITH ASPEN HYSYS V10.0

Javier Horta García ¹ <https://orcid.org/0009-0003-9649-4905>

Osney Pérez Ones ^{2*} <https://orcid.org/0000-0002-0366-0317>

Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas ² <https://orcid.org/0000-0001-6921-737X>

Arletis Cruz Llerena ¹ <https://orcid.org/0000-0002-8113-1592>

¹ Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Dirección de Biotecnología, La Habana, Cuba.

² Facultad de Ingeniería Química, Grupo de Análisis de Procesos, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.

Recibido: Mayo 15, 2025; Revisado: Mayo 29, 2025; Aceptado: Julio 17, 2025

RESUMEN

Introducción:

En la destilería estudiada no existen modelos de simulación que permitan evaluar la operación de fermentación alcohólica y destilación de etanol extrafino, ni analizar alternativas de mejora o sustitución de materias primas.

Objetivo:

Desarrollar modelos de simulación en Aspen Hysys para las etapas de fermentación alcohólica y destilación de etanol extrafino, que faciliten la evaluación operativa, la identificación de mejoras de proceso y la viabilidad de reemplazar la miel final por sustratos alternativos.

Materiales y Métodos:

La simulación se desarrolló en Aspen Hysys v10.0. Tanto para la etapa de fermentación como para la de destilación se seleccionó el paquete NRTL para la fase líquida e Ideal para la fase vapor. Los modelos de simulación fueron validados con lo reportado en la literatura y con datos reales de la planta. Se realizó un análisis Δ beneficio - Δ costo



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: Osney Pérez, Email: osney@quimica.cujae.edu.cu



comparando el uso de miel final con el de meladura y jugo de los filtros con miel final como materias primas alternativas.

Resultados y discusión:

Los modelos de simulación de la etapa de fermentación y destilación fueron validados con un error relativo máximo del 3,87 % y 6,12 %, respectivamente. Se determinó que no es factible económicamente, bajo las condiciones estudiadas, la fermentación empleando como materia prima meladura y jugo de los filtros con miel final.

Conclusiones:

Se obtuvieron modelos de simulación validados para las etapas de fermentación y destilación de etanol extrafino y solo es factible económicamente la producción de etanol extrafino utilizando miel final como materia prima.

Palabras clave: destilación; etanol extrafino; fermentación; simulación.

ABSTRACT

Introduction:

In the distillery under study, there are no simulation models available to evaluate the operation of alcoholic fermentation and extra fine ethanol distillation, nor to analyze alternatives for improvement or substitution of raw materials.

Objective:

To develop Aspen Hysys simulation models for the alcoholic fermentation and extra fine ethanol distillation stages, enabling operational evaluation, identification of process improvements, and assessment of the feasibility of replacing molasses with alternative substrates.

Materials and Methods:

The simulation was carried out in Aspen HYSYS V10.0. The NRTL property package was selected for the liquid phase and the Ideal model for the vapor phase in both the fermentation and distillation stages. The simulation models were validated using literature data and real plant data. A Δ benefit - Δ cost analysis was conducted comparing the use of molasses with that of syrup and juice from the filters with molasses as alternative raw materials.

Results and Discussion:

The simulation models for the fermentation and distillation stages were validated with a maximum relative error of 3.87% and 6.12%, respectively. It was determined that, under the studied conditions, using syrup or juice from filters with molasses as raw material for fermentation is not economically feasible.

Conclusions:

Validated simulation models were obtained for the fermentation and distillation stages of extra fine ethanol production. Economically, only the use of molasses as raw material is feasible for producing extra fine ethanol.

Keywords: distillation; extra fine ethanol; fermentation; simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La fermentación alcohólica es un proceso biológico en el que la levadura *Saccharomyces cerevisiae* convierte los azúcares en etanol, dióxido de carbono (CO₂) y energía. Esta es una de las fermentaciones industriales más importantes y mejor conocidas; la misma puede ser producida a partir de cualquier azúcar fermentable, por acción de las levaduras, entre otros, en condiciones favorables (Tse et al., 2021).

La destilación de etanol extrafino es un proceso que se utiliza para purificar el alcohol etílico al eliminar impurezas y obtener un producto de alta calidad, con 96,3 °GL. Durante este proceso, se eliminan compuestos como agua, alcoholes superiores y aldehídos que puedan afectar la calidad del etanol (Penín et al., 2010).

Las tendencias actuales a nivel mundial en la producción de etanol, conducen al empleo de sustratos alternativos a las ya tradicionales melazas de caña y remolacha azucarera (Sosa et al., 2024); entre ellos se encuentran los jugos de menor calidad en el proceso azucarero. El programa cubano de modernización y rehabilitación de la industria alcoholera nacional, presupone el uso de jugos azucarados de la producción de azúcar crudo, como fuente alternativa de carbono para la fabricación de alcohol etílico (Beltrán, 2023).

La simulación es una herramienta básica en la ingeniería de procesos, esencial en la elaboración de mejores diseños, automatización, control y en la optimización; a partir de localizar los problemas y predecir comportamientos (Valderrama et al., 2012). Una vez desarrollado un modelo de simulación válido, se pueden determinar los problemas existentes en un proceso y evaluar diferentes modificaciones sin afectar al sistema real (Filho & Dettmer, 2025).

Contar con herramientas para el estudio de las etapas de fermentación alcohólica y destilación de etanol extrafino es clave para analizar la eficiencia de estos procesos. En la actualidad no se cuenta con modelos para evaluar dichos procesos en la destilería estudiada, por lo que en este trabajo se propone como objetivo desarrollar modelos de simulación en Aspen Hysys para las etapas de fermentación alcohólica y destilación de etanol extrafino, que faciliten la evaluación operativa, la identificación de mejoras de proceso y la viabilidad de reemplazar la miel final por sustratos alternativos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del proceso

Actualmente, para la obtención de etanol extrafino, se emplea como materia prima la miel final, la cual se somete inicialmente a un proceso de calentamiento para su esterilización, seguido de la disolución en agua hasta alcanzar 14,5 °Brix. Esta mezcla se envía posteriormente al proceso de fermentación, donde se convierten los azúcares fermentables en etanol y dióxido de carbono, durante el mismo se controla la temperatura de operación cercana a los 35 °C.

Al utilizar como alternativas de sustrato, como la meladura, el proceso conserva las mismas etapas que con miel final, pero para la mezcla del jugo de los filtros con miel final, el procedimiento difiere, ya que el jugo de los filtros se enfría y posteriormente se mezcla con la miel final, conformando así la alimentación al fermentador.

El vino (mosto fermentado), con una graduación alcohólica entre 6 y 7,5 °GL, se envía a la etapa de destilación. Se alimenta inicialmente al calentavinos a 35 °C, donde su temperatura se incrementa hasta aproximadamente 70 °C para reducir el consumo de vapor en la columna destrozadora (C-510). Posteriormente, el vino caliente se introduce en la columna C-510, donde por el fondo se extraen las vinazas, y los vapores ricos en etanol ascienden y pasan a la columna preconcentradora (C-520), alcanzando concentraciones de 75–80 °GL.

Los vapores preconcentrados continúan a la columna hidroselectora (C-532), donde, mediante lavado con agua y vapor, se eliminan impurezas volátiles. En esta etapa también se separan aceites de fusel en un decantador en caliente y se recuperan los vapores alcohólicos. El etanol centro procedente de la hidroselectora sale con una concentración de 13–20 °GL.

A continuación, el etanol pasa a la columna rectificadora (C-540), donde se realiza su concentración. Finalmente, el producto rectificado entra a la columna desmetilizadora (C-550), donde se eliminan compuestos volátiles como el metanol, obteniéndose el etanol extrafino a 96,3 °GL, que se enfría y se dirige al almacenamiento.

2.2 Obtención de los modelos de simulación de la etapa de fermentación

Se simuló la etapa de fermentación alcohólica empleando diferentes materias primas. Para la fermentación de la miel final de caña se utilizó el modelo de simulación propuesto por Cruz et al. (2020) mientras que, para la fermentación de la meladura y de jugos de los filtros con miel final se utilizaron los modelos de simulación presentados por Beltrán (2023).

Se seleccionó el paquete de propiedades NRTL para el equilibrio en fase líquida del agua con compuestos orgánicos e Ideal para la fase vapor (Haydary, 2019). En la tabla 1 se muestran las composiciones, de la miel final, la meladura y el jugo de los filtros, utilizadas en la simulación.

Tabla 1. Composición de las materias primas utilizadas

<i>Componente</i>	<i>Composición (%) Miel final</i>	<i>Composición (%) Meladura</i>	<i>Composición (%) Jugo de los filtros</i>
H ₂ O	15	38	86,37
Impurezas	18,48	-	0,15
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (Sacarosa)	33	52,16	11,53
C ₆ H ₁₂ O ₆ (Glucosa)*	23	1,15	1,65
K ₂ O	6,12	4,3	0,15
CaO	2,54	2,54	0,14
MgO	1,18	1,18	-
Na ₂ O	0,49	0,49	-
Ácido acético	0,03	0,03	-
Ácido propiónico	0,06	0,06	-
Ácido butírico	0,09	0,09	0,01

*Incluye composición de glucosa + fructuosa.

Para la construcción del modelo de simulación de la etapa de fermentación se emplearon siete módulos: *Tank*, *Air cooler*, *Heat exchanger*, *Component Splitter*, *Mixer*, *Adjust* y *Spreadsheet*. El módulo *Tank* se utilizó para la simulación del disolutor y del fermentador. La torre de agua de enfriamiento se representó con el módulo *Air cooler* (TE Ferm), suministrando el dato de la temperatura del aire a la entrada (28 °C).

El módulo *Heat exchanger* se utilizó para simular el calentamiento de la miel y la meladura (Calentador M), el enfriamiento de los jugos de los filtros (Enfriador J) y el sistema de enfriamiento del fermentador (Enfriador V), donde se suministró como dato la caída de presión ($\Delta P=0$). El degasificador se simuló empleando el *Component Splitter*; se asignó el valor 1 a la fracción de separación de CO₂ en la corriente CO₂deg.

El *Adjust* se empleó en la dilución (ADJ-D) para ajustar a 0,845 la fracción másica de agua en la corriente diluida y manipular el flujo másico de la corriente Agua de dilución; en el caso de la fermentación (ADJ-F) se manipuló la corriente Calor perdido para ajustar la temperatura de la corriente Vino a degasif (35 °C); también se utilizó para manipular el flujo de materia prima hasta alcanzar 60 m³/h de vino (ADJ-V), requeridos por el proceso, hacia la columna destiladora. El módulo *Mixer* se utilizó para simular la mezcla entre las corrientes Miel diluida y Jugo 1.

2.3 Simulación de la etapa de destilación de etanol extrafino

Se utilizó el mismo paquete de propiedades empleado en la etapa de fermentación. En la tabla 2 se muestra la composición volumétrica de vino utilizada.

Tabla 2. Composición volumétrica de vino utilizada

<i>Componente</i>	<i>Agua</i>	<i>Etanol</i>	<i>Ácido acético</i>	<i>Acetato de etilo</i>	<i>Sacarosa</i>	<i>Glucosa</i>	<i>Alcohol isoamílico</i>
Composición volumétrica (%)	92,50	7	0,06	0,02	0,01	0,1	0,4

Para la simulación de la etapa de destilación de etanol extrafino se utilizaron trece módulos: *Heater*, *Cooler*, *Heat exchanger*, *Refluxed absorber*, *Distillation column*, *Air cooler*, *Tee*, *Mixer*, *Separator*, *Pump*, *Recycle*, *Spreadsheet*. En la simulación de las columnas de destilación se utilizó el módulo *Refluxed absorber* (C-510, C-520, C-536 y C-540) y *Distillation column* (C-550).

El rehervidor parcial (E-510) se simuló utilizando la combinación de los módulos *Heater* y *Separator*. Con el primero se simuló la parte del equipo donde se cede calor y con el segundo se simuló el cuerpo del equipo, donde ocurre la separación de fases. A este módulo se le suministró como dato una caída de presión de 3,53 kPa. El condensador parcial E-525 CV también se simuló utilizando esta combinación de módulos, pero utilizando *Heat exchanger* y no *Heater*.

Se utilizó el módulo *Heat exchanger* para simular el intercambiador de calor E-551 y E-526. Con el módulo *Pump* se simuló la bomba que lleva el etanol extrafino de la salida de la columna C-550 al intercambiador de calor E-551.

Con el módulo *Spreadsheet* se calcularon la eficiencia de la destilación y las relaciones de consumo de agua de enfriamiento y vapor, con respecto al flujo volumétrico de etanol

producido. Utilizando el módulo *Recycle* se simuló el reciclo de las corrientes Vapor 510, Agua 536 y R520.

El módulo *Tee* permitió simular las divisiones de flujo, y el módulo *Mixer*, el punto de mezcla entre varias corrientes. El módulo *Air cooler* se utilizó para la simulación de la torre de enfriamiento (TE Dest). Se suministró como dato el valor de $\Delta P=0$ a los módulos E-525/6/7, E-526/7, TE Dest, E-511, E-551, E-555/6 y E-552.

2.4 Análisis económico

Con el objetivo de comprobar la factibilidad económica de la utilización de las diferentes materias primas se determinaron los costos directos y los ingresos generados para realizar un análisis de Δ beneficio/ Δ costo, tomando como referencia los valores para el proceso cuando solamente se usan mieles en la fermentación. Según información de la planta se estableció un precio de venta de etanol extrafino de 2 083 CUP/hL y se consideró un tiempo de operación de la planta de 100 días al año, trabajando 24 h al día. Se seleccionó un índice de generación de vapor de 15,5 kg de vapor/kg de combustible y la densidad del combustible (*fuel oil*) de 0,989 kg/L, tomado de Cruz et al., (2020).

En la tabla 3 se muestran los datos utilizados en los cálculos económicos, obtenidos de Figueroa (2023).

Tabla 3. Costos de materias primas y facilidades auxiliares

<i>Corriente</i>	<i>Costo</i>
Miel	2 957 CUP/t
Meladura	10 070 CUP/t
Jugo de filtros	985 CUP/t
Fuel oil	10 882,4 CUP/m ³
Agua de dilución	18 CUP/m ³
Agua de enfriamiento	10,66 CUP/m ³

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación de los modelos de simulación se realizó a partir de la comparación de los resultados de la simulación con la bibliografía. De acuerdo con Batstone y Keller (2003), para aceptar un modelo como válido el error relativo de validación debe ser menor del 10 %. En este trabajo se utilizó el porcentaje de error relativo para determinar la confiabilidad del modelo.

3.1 Resultados de la simulación de la etapa de fermentación

En las figuras 1, 2 y 3 se muestran los modelos de simulación obtenidos.

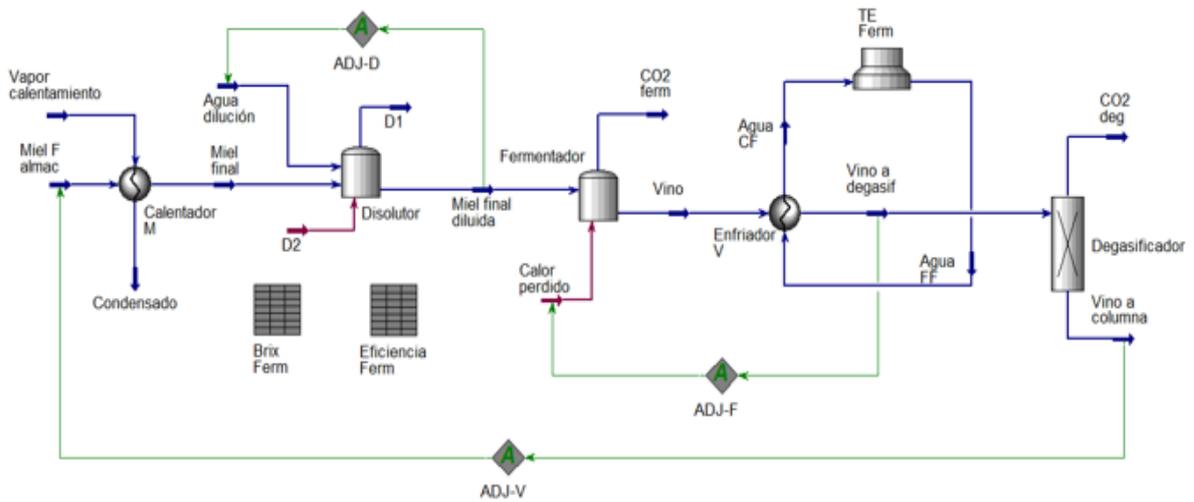


Figura 1. Modelo de simulación de fermentación utilizando miel final

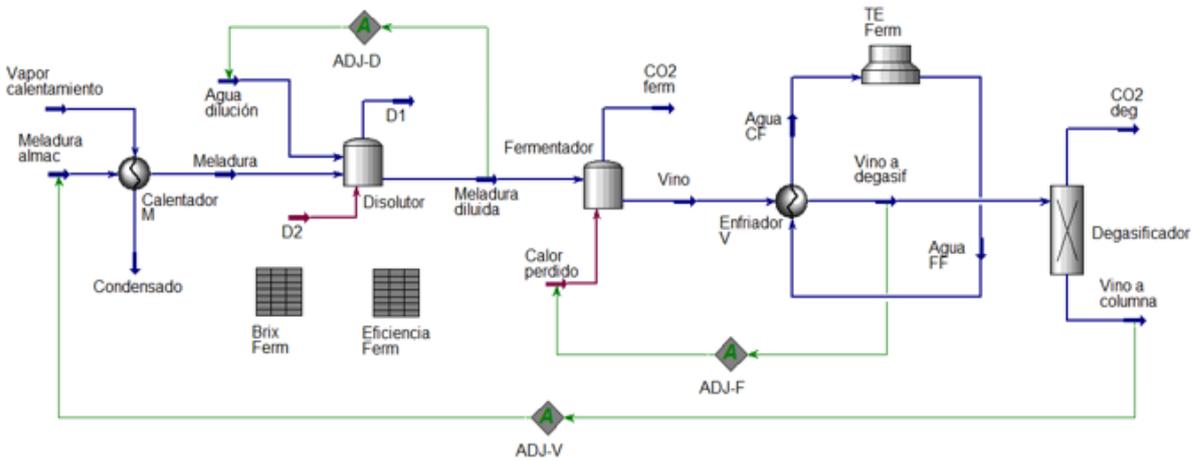


Figura 2. Modelo de simulación de fermentación utilizando meladura

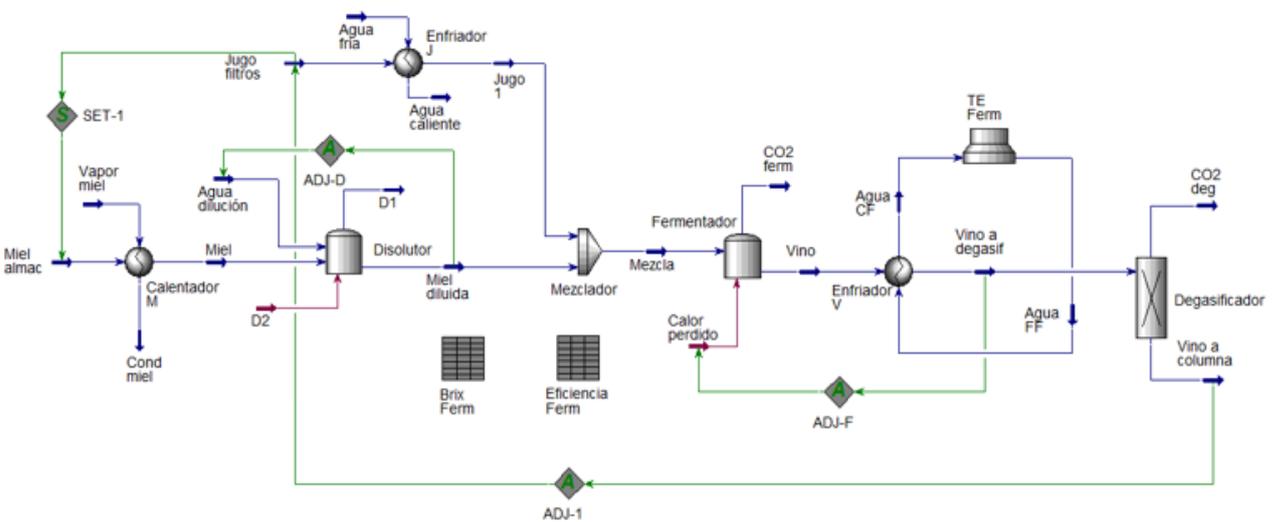


Figura 3. Modelo de simulación de fermentación utilizando jugo de los filtros con miel final

En la tabla 4 se muestran los valores de densidad calculados con Aspen Hysys v10.0 y se compararon con los valores reportados en la literatura: Cruz et al., (2020); Rodríguez et al., (2023); Cortés et al., (2021), para cada una de las materias primas evaluadas, con el objetivo de comprobar que las consideraciones realizadas en las composiciones de las corrientes representaban adecuadamente a las materias primas utilizadas.

Tabla 4. Comparación de los valores de densidad (kg/m^3) calculados con Aspen Hysys v10.0 con la literatura

<i>Materia prima</i>	<i>Valor literatura</i>	<i>Fuente</i>	<i>Aspen Hysys v10.0</i>	<i>Error relativo (%)</i>
Miel final	1 440	(Cruz et al., 2020)	1 472	2,22
Meladura	1 347,48	(Rodríguez et al., 2023)	1 393	3,38
Jugo de los filtros	1 059	(Cortés et al., 2021)	1 018	3,87

Como los valores de la tabla 4 calculados por Aspen Hysys v10.0, en comparación con lo reportado en la literatura presentan errores relativos menores del 4 % (error relativo máximo de 3,87 %) se puede plantear que las corrientes representan adecuadamente cada una de las materias primas.

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de la simulación en Aspen Hysys v10.0 de la etapa de fermentación para cada materia prima.

Tabla 5. Resultados de la simulación de la etapa de fermentación

<i>Parámetro</i>	<i>Miel final</i>	<i>Meladura</i>	<i>Jugo de los filtros con miel final</i>
Flujo másico de miel final almacenada (kg/h)	11 320	-	6 926,6
Flujo másico de meladura almacenada (kg/h)	-	15 686,5	-
Flujo másico de jugo de los filtros (kg/h)	-	-	24 915,9
Flujo másico de vapor de calentamiento (kg/h)	150,4	216,7	92
Flujo másico de agua de dilución (kg/h)	51 810,8	49 063,4	31 890,4
Flujo másico de agua de enfriamiento (kg/h)	-	-	959 663,7
Flujo volumétrico de vino a columna (m^3/h)	60,11	60,03	60,03
°Brix del vino a columna	6,48	4,1	4,51
°GL del vino a columna	6,13	7,78	7,02
Flujo volumétrico de etanol producido (L/h)	3 685,9	4 723,6	4 251,7
Eficiencia de la fermentación (%)	93,45	92,78	93,26
Dextrosa no consumida por la levadura (%)	4,34	4,34	7,4
Etanol perdido por arrastre en la corriente CO_2ferm (%)	1,64	2,35	1,95

Según los resultados de la simulación mostrados en la tabla 5, para alcanzar el mismo flujo volumétrico de vino a la columna, el uso de meladura o la combinación de jugo de los filtros con miel final requiere una mayor cantidad de materia prima, debido a su menor °Brix, 62 °Brix en el caso de la meladura y 13,63 °Brix en el caso del jugo de los filtros, en comparación con la miel final, con 85 °Brix.

El flujo másico de alimentación se incrementa en un 38,6 % cuando se emplea meladura y en un 181,3 % con la mezcla de jugo de los filtros y miel final. En cuanto al vapor de calentamiento, el consumo aumenta un 44,1 % con meladura, mientras que con la mezcla de jugo de los filtros con miel final disminuye un 38,8 %. El agua de dilución se reduce un 5,3 % para meladura y un 38,4 % para la mezcla de jugo de los filtros con miel final. No obstante, para la mezcla jugo de los filtros con miel final se requiere un flujo adicional de 959 663,7 kg/h de agua de enfriamiento.

El grado alcohólico obtenido en el vino, utilizando en la fermentación como materia prima meladura y jugo de los filtros con miel final, es superior al obtenido al utilizar miel final como materia prima en un 26,92 % y 14,52 %, respectivamente. El grado alcohólico del vino utilizando miel final está dentro del intervalo de 6 a 7 °GL reportado por Penín et al., (2010) para la destilería estudiada.

Los resultados obtenidos mediante simulación reflejan concentraciones alcohólicas y eficiencias de fermentación diferentes a las reportadas experimentalmente en la literatura consultada. Para la materia prima miel final, se alcanzó un grado alcohólico de 6,13 °GL, mientras Díaz (2021) reporta valores de 6,4 °GL con un 90 % de eficiencia. En el caso de Lamas et al., (2023) se reporta un valor de concentración de etanol de 5,48 °GL.

En el caso de la meladura, en la simulación se obtuvo una composición de etanol de 7,78 °GL, superior al valor de 5,5 °GL obtenido experimentalmente por Lamas et al., (2023). Para el escenario de mezcla de jugo de los filtros (78,25 %) con miel final (21,75 %), en la simulación igualmente se obtienen valores superiores. Díaz (2021) reporta una concentración de etanol de 6,36 °GL y 85 % de eficiencia de fermentación, mientras que Lamas et al., (2023) reportan un valor de 5,22 °GL, sin especificar eficiencia, ambos para la proporción 50:50. Se puede inferir que los resultados de la simulación, fueron superiores a los reportados por estudios experimentales, debido a que el alcance del modelo no contempla aspectos de inhibición o condiciones ambientales, que en la práctica afectarían el rendimiento.

También se obtuvo que la dextrosa no consumida por la levadura para la miel y la meladura fue un valor similar al reportado por Bonomi et al., (2016) de 4,34 %, mientras que, en la mezcla de jugo de los filtros con miel final, el valor fue más elevado. El etanol perdido por arrastre en la corriente CO₂ferm para la miel final, la meladura y el jugo de los filtros con miel final fueron superiores a los reportados por Domenech et al., (2011) de 0,93-1,41 % y por Elia et al., (2009) de 1-1,5 %, utilizando miel final como materia prima.

3.2 Resultados de la simulación de la etapa de destilación de etanol extrafino

En la figura 4 se muestra el modelo de simulación obtenido de la etapa de destilación de etanol extrafino.

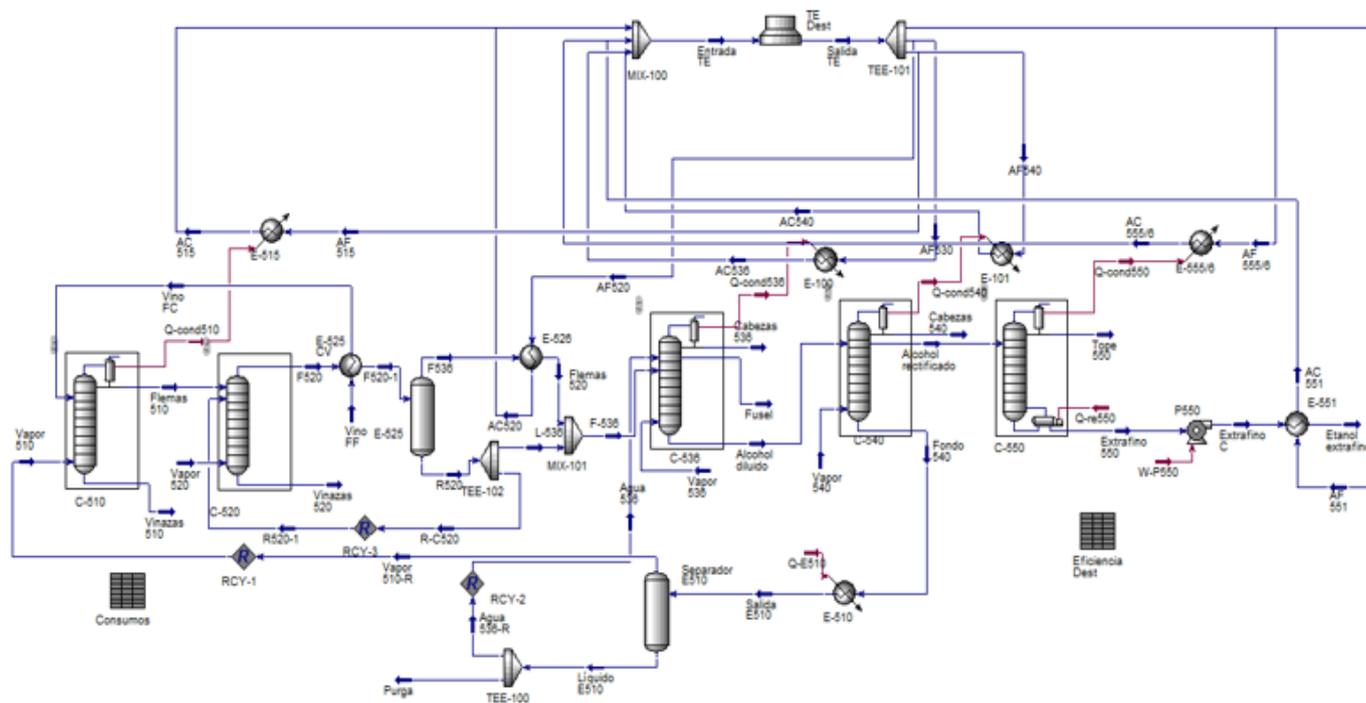


Figura 4. Modelo de simulación de la etapa de destilación de etanol extrafino

En la tabla 6 se muestra la comparación de los resultados obtenidos en Aspen Hysys v10.0 de la etapa de destilación de etanol extrafino, con valores reales de la planta y valores obtenidos de la bibliografía consultada (Figueroa, 2023; Cruz et al., 2019).

Tabla 6. Comparación de la simulación de la etapa de destilación de etanol extrafino

<i>Parámetro</i>	<i>Fuente</i>	<i>Valor</i>	<i>Aspen Hysys v10.0</i>	<i>Error relativo (%)</i>
Flujo volumétrico de las vinazas de la columna C-510 (m ³ /h)	(Figueroa, 2023)	61,88	65,61	6,02
Temperatura de las vinazas de la columna C-510 (°C)	Planta	81	82,95	2,41
Densidad de las vinazas (kg/m ³)	(Cruz et al., 2019)	960,1	961,8	0,18
Flujo másico de las flemas de la columna C-510 (kg/h)	(Figueroa, 2023)	15 716	15 910	1,23
Flujo volumétrico de las cabezas de la columna C-536 (m ³ /h)	Planta	0,3	0,302	0,67
Flujo másico de <i>fusel</i> (kg/h)	(Figueroa, 2023)	63,91	60	6,12
Flujo másico de alcohol diluido (kg/h)	(Figueroa, 2023)	24 866,87	24 020	3,4
Flujo másico de alcohol rectificado (kg/h)	(Figueroa, 2023)	3 022,5	2 960	2,07
Flujo volumétrico de etanol extrafino (hL/d)	Planta	900	870,96	3,23
Fracción volumétrica de etanol en el etanol extrafino (%)	Planta	96,3	95,88	0,44

Como los resultados obtenidos en Aspen Hysys v10.0, en comparación con los valores reales de la planta y la bibliografía consultada presentan un error relativo menor del 7 % (error relativo máximo de 6,12 %) se puede decir que el modelo de simulación obtenido representa correctamente el sistema.

Se obtuvo que la temperatura de las flemas de la columna C-510 tiene un valor de 70,12 °C, la fracción volumétrica de etanol en las cabezas de la columna 536 era de 93,24 % y la fracción volumétrica de etanol en el alcohol lavado era de 15,04 %, encontrándose entre el intervalo reportado por Fernández (2013) de 70-72 °C, 92-96 % y 13-20 %, respectivamente.

También se obtuvo una eficiencia de destilación de 82,19 %, valor que se corresponde con las altas concentraciones de etanol en las cabezas de las columnas 536 y 540. Los consumos de agua de enfriamiento y vapor en la destilación fueron de 45,2 m³ de agua/hL de etanol extrafino y 450,6 kg de vapor/hL de etanol extrafino, respectivamente, con flujos totales de 1 640,3 m³/h de agua de enfriamiento y 16 352,3 kg/h de vapor.

3.3 Resultados del análisis económico

Para determinar los costos totales de producción se calcularon los costos totales anuales (CUP/año) de materia prima y facilidades auxiliares. El flujo másico de combustible se calculó a través de la relación entre el flujo de vapor y el índice de generación de vapor. En la tabla 7 se muestran los resultados de los cálculos económicos realizados.

Tabla 7. Resultados de los cálculos económicos

<i>Parámetro</i>	<i>Miel final</i>	<i>Meladura</i>	<i>Jugo de los filtros- miel</i>
Flujo de etanol extrafino (hL/año)	75 500	96 755	87 089
Ingresos por venta del etanol extrafino (CUP/año)	157 266 693	201 542 350	181 407 742
Costo de la materia prima (CUP/año)	80 335 776	379 111 332	108 060 620
Costo de combustible (CUP/año)	22 494 974	28 868 854	25 809 206
Costo de agua de dilución (CUP/año)	2 242 742	2 109 024	1 359 566 645
Costo de agua de enfriamiento (CUP/año)	35 763 209	43 906 910	64 547 066
Costo total anual (CUP/año)	140 836 702	453 996 121	1 557 983 538

En la tabla 8 se muestran los resultados del análisis Δ beneficio- Δ costo para las diferentes materias primas.

Tabla 8. Resultados del análisis Δ beneficio- Δ costo

<i>Materia prima</i>	<i>Ingreso total anual (CUP/año)</i>	<i>Δ Ingreso (CUP/año)</i>	<i>Egreso total anual (CUP/año)</i>	<i>Δ Egreso (CUP/año)</i>	<i>Δ B/C</i>
Miel	157 266 693	-	143 448 806	-	-
Meladura	201 542 350	44 275 657	457 268 063	313 819 256	0,141
Jugo de filtros-miel	181 407 742	24 141 049	1 560 996 610	1 417 547 804	0,015

* Δ B/C: Δ Ingreso/ Δ Egreso (Δ beneficio/ Δ costo)

Como se muestra en la tabla 8 la relación Δ beneficio- Δ costo calculada para la meladura y la mezcla de jugos de filtros con miel es menor que uno, lo que demuestra que la sustitución de la miel por estos sustratos no es económicamente rentable para el proceso, debido al incremento del gasto generado en la compra de estas materias primas, así como en el costo de los servicios auxiliares.

La alternativa empleando meladura en la etapa de fermentación es la que mayores ingresos aporta, con 201 542 350 CUP/año, ya que es la alternativa donde mayor cantidad de etanol se produce en la fermentación, pero los altos costos de la materia prima son los que impiden que la alternativa sea económicamente factible. La mezcla de jugos de filtros con miel es la peor alternativa con una relación de 0,015 debido a los gastos de agua de enfriamiento, que alcanzan los 64 547 066 CUP/año.

4. CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron modelos de simulación válidos en Aspen Hysys para las etapas de fermentación y destilación de etanol extrafino con un error relativo máximo del 3,87 y 6,12 %, respectivamente.
2. En comparación al uso de miel final, el uso de meladura conlleva un incremento en el consumo de materia prima en un 38,5 % y el vapor en un 44,1 %, mientras que el uso de jugos de los filtros con miel final incrementa el uso de materia prima un 181,3 % y requiere 959 663,7 kg/h adicionales de agua de enfriamiento.
3. Se realizó un análisis Δ beneficio- Δ costo donde se obtuvo que no es económicamente factible la producción de etanol extrafino utilizando en la fermentación meladura y jugo de los filtros con miel final.

REFERENCIAS

- Batstone, D., & Keller, J. (2003). Industrial applications of the IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 47(12), 199–206. https://www.oieau.fr/eaudoc/system/files/documents/37/189310/189310_doc.pdf
- Beltrán, L. (2023). *Simulación en Aspen Hysys de la etapa de fermentación alcohólica utilizando diferentes sustratos azucarados* [Tesis de ingeniería, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”]. <http://tesis.cujae.edu.cu:8080/handle/123456789/10811>
- Bonomi, A., Cavalett, O., Pereira, M., & Lima, M. (2016). *Virtual biorefinery: An optimization for renewable carbon valorization*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26045-7>

- Cortés, M., De Armas, A. C., Alomá, I., & Morales, M. (2021). Impacto de la extracción del jugo de los filtros en la sostenibilidad de un complejo azucarero industrial. *Centro Azúcar*, 48(1), 59–70. http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/642
- Cruz, A., Pérez, O., Zumalacárregui, L., & Pérez, J. L. (2019). Simulación en Aspen Hysys v10.0 de los procesos de destilación de aguardiente y concentración de vinazas. *ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 53(3), 46–47. <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2020/11/articulo6cambiado.pdf>
- Cruz, A., Pérez, O., Zumalacárregui, L., & Pérez, J. L. (2020). Desarrollo y validación de un modelo en Aspen Hysys v10.0 para el proceso de fermentación alcohólica. *ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 54(1), 26–37. <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2020/07/articulo-6.pdf>
- Díaz, J. (2021). *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]. <http://rein.umcc.cu/handle/123456789/608>
- Domenech, F., Lorenzo, Y., Lorenzo, M., & Esquivel, L. (2011). Diagnóstico preliminar de las emisiones gaseosas en la industria de los derivados de la caña de azúcar. *ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 45(3), 30–37. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223122261005.pdf>
- Elia, A., Shintaku, A., Baptistello, A. A., Conde, A. J., Giannetti, F., & Donzelli, J. L. (2009). *Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética*. Agência Nacional de Águas. <https://unica.com.br/wp-content/uploads/2020/10/manual-de-conservacao-e-reuso-de-agua-na-agroindustria-sucroenergetica.pdf>
- Fernández, K. (2013). *Evaluación técnico-económica de alternativas de adaptación tecnológicas para biorrefinerías en una industria de la caña de azúcar* [Tesis de ingeniería, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/2151>
- Figueroa, M. (2023). *Evaluación de esquemas de integración material y energética de las plantas de derivados de la Empresa Agroindustrial Azucarera (EAA) “Antonio Sánchez”* [Tesis de ingeniería, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”]. <http://tesis.cujae.edu.cu:8080/handle/123456789/10810>
- Filho, B. E. P., & Dettmer, A. (2025). Review of ethanol distillation process simulation: Evolution, challenges, and perspectives. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 100(8), 1529–1540. <https://doi.org/10.1002/jctb.7868>
- Haydary, J. (2019). *Chemical process design and simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys applications*. John Wiley & Sons. <https://www.academia.edu/download/103086889/9781119089117.pdf>
- Lamas, Y., De Armas, A. C., & Albernas, Y. (2023). Análisis preliminar de la fermentación alcohólica utilizando mezclas de jugo de los filtros, miel final y meladura. *Centro Azúcar*, 50(3). http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/767
- Penín, E., Albernas, Y., González, E., Cervantes, Y., & Feyt, R. (2010). Análisis del proceso de obtención de alcohol extrafino en una destilería. *Centro Azúcar*, 37(1), 8–
-

14.

http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/download/395/387/424

Rodríguez, Y., Mendoza, S., & Ribas, M. (2023). Hidrólisis enzimática de la meladura. *Centro Azúcar*, 50(1), 1–9.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_serial&pid=2223-4861&lng=es&nrm=iso

Sosa, E., Gallardo, I., & Correa, Y. (2024). Estudio de la etapa de fermentación en la producción de etanol orgánico. *Bionatura*, 9(4).

<https://doi.org/10.70373/RB/2024.09.03.13>

Tse, T. J., Wiens, D. J., Chicilo, F., Purdy, S. K., & Reaney, M. J. (2021). Value-added products from ethanol fermentation: A review. *Fermentation*, 7(4), 267.

<https://doi.org/10.3390/fermentation7040268>

Valderrama, J., Toselli, L., & Faúndez, C. (2012). Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. Part 2: Process simulation. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 832–840.

https://www.academia.edu/download/55384163/valderrama2012_1.pdf

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Javier Horta García. Metodología, investigación, redacción - primera redacción, software.
 - Dr.C. Osney Pérez Ones. Conceptualización, supervisión, investigación, redacción - revisión y edición, software.
 - Dr.C. Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas. Conceptualización, supervisión, investigación, redacción - revisión y edición, software.
 - M.Sc. Arletis Cruz Llerena. Gestión de proyectos, supervisión, investigación, redacción - revisión y edición, software.
-