

Obtención de productos de alto valor agregado, a partir de la separación del aceite fusel

Marcela Fernández-Casiis^{1*}, Arletis Cruz-Llerena¹, Osney Pérez-Ones²,
Lourdes Zumalacárregui de-Cárdenas² y Beatriz Zumalacárregui de-Cárdenas²

1. Departamento de Bioingeniería, Dirección de Biotecnología, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Vía Banca No. 804 y Carretera Central, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

* marcela.fernandez@icidca.azcuba.cu

2. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. Calle 114, No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron dos alternativas de recuperación de productos con alto valor agregado, presentes en el aceite fusel, con el uso de la simulación de procesos. Para el desarrollo de la simulación se empleó Aspen Hysys v10.0. En ambas tecnologías se seleccionó el paquete de propiedades NRTL para el equilibrio entre el agua y las sustancias orgánicas, a bajas presiones e ideal para la fase vapor. Los modelos de simulación obtenidos se validaron con datos reportados en la literatura. En la tecnología A se obtienen 79.27 m³ /año de propanol al 48 % y 156.31 m³/año de la mezcla de solventes y en la tecnología B se producen 5.62 m³/año de alcohol isoamílico al 86 % y 242.35 m³ /año de la mezcla de solventes. La evaluación económica demostró que las alternativas estudiadas son factibles y la alternativa B es la de mejores indicadores.

Palabras clave: aceite fusel, co-productos, simulación.

ABSTRACT

In this work two alternatives for separation of high valued products from fusel oil were evaluated using process simulation. For simulation development, Aspen Hysys v 10.0 was used. For both technological alternatives studied, NRTL property package was selected for balance between water and organic substances at low pressure and ideal condition for vapor phase. Simulation models obtained were validated by data reported in literature. In technological alternative A ,79.27 m³ /year of propanol 48 % and 156.31 m³/year of solvent mixture were obtained; in alternative B 5.62 m³ / year of isomyl alcohol 86 % and 242.35 m³/year of solvent mixture. An economic evaluation showed both studied alternatives are feasible, being alternative B the one with best results.

Key words: fusel oil, co-products, simulation.

INTRODUCCIÓN

El uso de alcoholes está extendido por el mundo, debido a que se emplean con diferentes fines: constituyen las materias primas fundamentales para la elaboración de bebidas alcohólicas y pueden ser comercializables como tal en sus diferentes especificidades, principalmente alcoholes finos y rectificadas (1, 2).

Durante el proceso de fermentación de mostos para la producción de etanol y su posterior destilación y rectificación, se generan como subproductos compuestos denominados mayoritarios, los

conocidos aceites fusel, en cantidades entre 0.1 – 0.7 %, con respecto a la producción de etanol (95 °GL) (3-5). Entre los compuestos presentes en estos aceites se destacan: 1-propanol, 2-metil-1-propanol, 2-metil-1-butanol y 3-metil-1-butanol (5, 6).

Hoy en día, Cuba centra su atención en buscar diversificar sus producciones en el sector azucarero. La obtención de etanol por destilación en las industrias azucareras constituye una de las actividades más importantes en el desarrollo de este sector y, a su vez, esta actividad genera co-productos de alto valor agregado, los cuales inciden directamente en el desarrollo científico y económico de la sociedad cubana y posibilita, de esta manera, competir en el mercado internacional. Es por ello que la búsqueda de posibles tecnologías para la obtención de productos de alto valor agregado, a partir del fusel, materia prima que está siendo inutilizada, resulta de gran importancia.

El proceso de recuperación del aceite fusel es una técnica novedosa y no se cuenta con mucha información para ponerla en práctica. De ahí que este trabajo tenga como objetivo evaluar la posibilidad de recuperación de productos de alto valor agregado, a partir de la separación del aceite fusel.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de técnicas y procedimientos de laboratorio

Las caracterizaciones por cromatografía de gases se llevaron a cabo en el laboratorio Labeb, del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Para la caracterización del fusel se empleó el cromatógrafo de gases SHIMADZU modelo GC-17^a, con columna capilar CP-WAX 10 (60 mm x 0.25 mm, 0.25 μm espesor de película) con detector de ionización de llama (FID, por sus siglas en inglés) y equipado con inyector automático.

Se emplearon como patrones: acetaldehído, acetal, acetato de etilo, metanol, 1-propanol, 1-butanol, 2-metil-1-propanol, 2-metil-1-butanol, 3-metil-1-butanol y, como estándar interno, 1-pentanol. Todos los reactivos eran de la firma Sigma-Aldrich, con una pureza superior al 99 %.

Obtención de los modelos de simulación

Se empleó el simulador Aspen Hysys v10.0 para la simulación de las tecnologías (A y B) para la recuperación del aceite fusel. De manera general, para la realización de la simulación, se siguió el procedimiento:

1. Configurar la simulación (unidades, opciones de informe, etc.)
2. Seleccionar o crear los componentes involucrados
3. Elegir el método de cálculo de las propiedades físicas por componentes
4. Elaborar el diagrama de flujo: módulos y corrientes (generalmente se hace en la hoja de trabajo)
5. Especificar los datos de las corrientes
6. Especificar los datos correspondientes a los módulos empleados para representar las operaciones
7. Resolver el modelo y validar los resultados obtenidos con la utilización de datos reportados en la literatura

En la selección de los componentes a incluir en la corriente de fusel, para la simulación de la alternativa A, se utilizaron los componentes representativos reportados por Martínez *et al.* (7). En la tabla 1 se muestra la composición del aceite fusel utilizada.

Tabla 1. Composición másica del aceite fusel para la alternativa A

Componente (nombre en la base de datos del simulador)	Composición (%)
acetaldehído (AcetAldehyde)	0.0360
acetato de etilo (E-Acetate)	0.0096
metanol (Methanol)	0.0447
etanol (Ethanol)	2.8194
1-propanol (1-Propanol)	0.1418
isobutanol (i-Butanol)	16.3656
agua (Water)	17.24
alcohol isoamílico (3-M-1-C4ol)	63.3429

Para la alternativa B, fueron seleccionados los componentes principales del aceite fusel, reportados en la investigación desarrollada por Montoya *et al.* (8). En la tabla 2 se muestra la composición de fusel empleada.

Tabla 2. Composición másica del aceite fusel para la alternativa B

Componente (nombre en la base de datos del simulador)	Composición (%)
alcohol isoamílico (3-M-1-C4ol)	86.3
etanol (Ethanol)	2.4
agua (Water)	9.3
amílico (2-M-1-C4ol)	2.0

En ambas alternativas, para la simulación de la etapa de destilación del aceite fusel, de acuerdo con las sugerencias para seleccionar métodos de propiedades físicas dadas por Carlson (9) y considerando la naturaleza polar y no electrolítica del fusel y las condiciones de operación moderadas del proceso en estudio, se seleccionó el paquete de propiedades NRTL, recomendable para el equilibrio entre el agua y las sustancias orgánicas a bajas presiones para, la fase líquida e Ideal para la fase vapor.

Simulación de los procesos de recuperación del aceite fusel

Alternativa A

Para la simulación de esta alternativa, con el fin de recuperar los productos de interés del aceite fusel, se parte de lo propuesto por los autores (7, 10). La tecnología simulada por estos autores, fue modificada, pues se incorporó la etapa de deshidratación del fusel, que se muestra en la figura 1.

Para la etapa de deshidratación del aceite fusel se empleó el módulo *Component splitter* (Adsorbador), que separa el agua de los demás componentes del fusel, posteriormente esta corriente de fusel deshidratado pasa al *Heat exchanger* (IC), con una caída de presión ($\Delta P = 0$ kPa), tanto para los tubos como para la coraza, donde se calienta a través del intercambio de calor que realiza con la corriente de fondo. El módulo *Distillation column* (T-100) se utiliza para simular la separación de los componentes de interés del fusel. Posteriormente, se emplea el módulo *Heater* (Rehervidor), con un $\Delta P = 0$ kPa para cuantificar el agua de enfriamiento utilizada, mientras que el módulo *Cooler* (Condensador) con $\Delta P = 0$ kPa se utiliza para cuantificar el consumo de vapor.

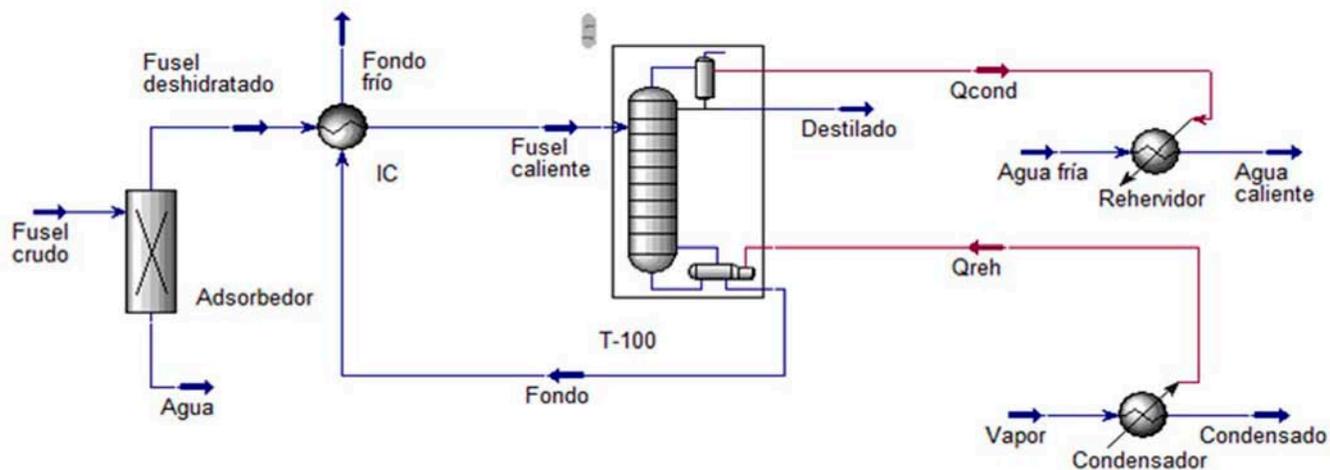


Figura 1. Modelo de simulación de la alternativa A para la recuperación del aceite fusel.

Alternativa B

Para la simulación de la alternativa B se parte de las tecnologías propuestas por los autores (8, 11), que se presenta en la figura 2. Esta alternativa consta de dos etapas: la primera es la simulación de la destilación, para lograr la separación de los alcoholes y el agua de los componentes pesados, con empleo del módulo *Distillation column* (T-101). La segunda etapa consiste en la purificación del alcohol isoamílico, uno de los componentes obtenidos en la destilación. Para la simulación de esta etapa se empleó el módulo *Reboiled Absorber* (T-102) y el módulo *Cooler* (E-101) fue empleado para simular el condensador de esta columna de destilación, con una caída de presión ($\Delta P = 0$ kPa). Luego para modelar la separación de los componentes fue empleado el módulo *Component splitter* (Decantador). Fue necesario incorporar una corriente de reciclo, empleando para ello, el módulo *Recycle* (RCY-1) y para la representación del punto de unión de las corrientes D_1 y B_2 , se utilizó el módulo *Mixer* (MIX-100).

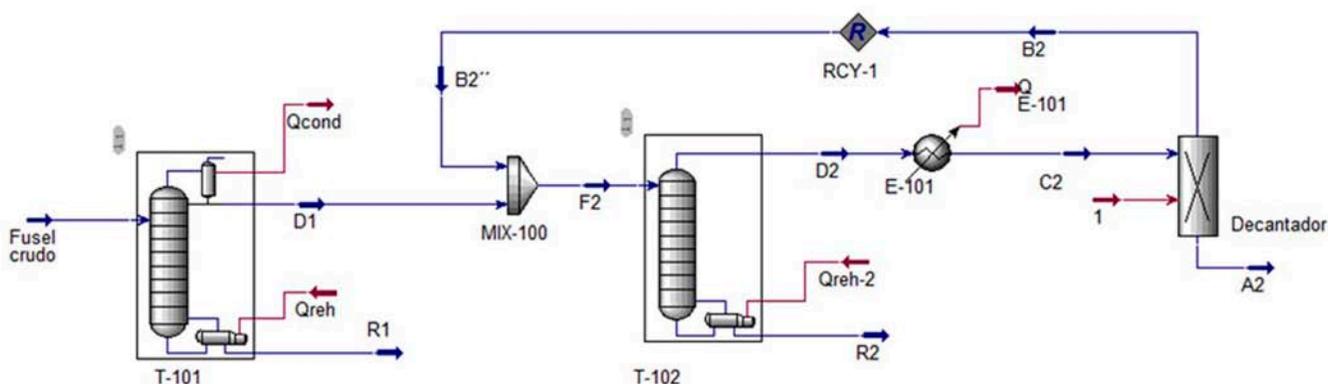


Figura 2. Modelo de simulación de la alternativa B para la recuperación del aceite fusel.

En la tabla 3 y 4 se presentan los datos empleados para la simulación de las corrientes y las columnas de destilación del proceso, para ambas alternativas.

Tabla 3. Datos de entrada para las corrientes del proceso

	Corriente	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Flujo (kg/h)	Fase vapor	Composición másica (%)	
Alternativa A	Fusel crudo	101.3	25	201,4	-	Tabla 1	
	Fusel deshidratado	101.3	25	-	-	-	
	Agua	101.3	25	-	-	-	
	Fusel caliente	-	65	-	-	-	
	Destilado	-	-	68,47	-	-	
	Agua fría	101.3	25	-	-	-	
	Agua caliente	-	40	-	-	-	
	Vapor	150	-	-	1	-	
	Condensado	-	-	-	0	-	
Alternativa B	Fusel crudo	101.3	85.10	27.64	-	Tabla 2	
	C ₂	-	30	-	-	-	
	A ₂	101.3	30	-	-	-	
	B ₂	101.3	30	-	-	-	
	B ₂ ''	101.3	30	10.91	-	alcohol isoamílico	51.07
						etanol	32.71
						agua	15.35
amílico						0.81	

Tabla 4. Datos para las columnas de destilación

Parámetros	Alternativa A	Alternativa B	
	Columna de destilación (T-100)	Columna de destilación (T-101)	Columna de destilación (T-102)
Número de platos reales	28	8	4
Plato de alimentación	11	2	1
Caída de presión (kPa)	0	0	0
Razón de reflujo	2	2	2

La validación de los modelos de simulación obtenidos se realizó a partir de la comparación de los resultados del simulador Aspen Hysys v10.0 con los datos de la bibliografía consultada, en correspondencia con cada modelo. De acuerdo con Barlas (12), para aceptar un modelo como válido, el error de validación debe ser menor del 5 %. En este trabajo se utilizó el porcentaje de error relativo para determinar la confiabilidad del modelo. Se calculó el error relativo para conocer en qué medida difieren los resultados.

Análisis económico

Para la valoración económica se consideró un tiempo de operación de 300 d/año para cada alternativa, una tasa impositiva de 35 %, una tasa de interés de 12 %, un horizonte de planeación de 5 años y un tiempo de vida útil del equipamiento de 10 años. Se emplearon indicadores económicos dinámicos: el Valor actual neto (VAN), la Tasa interna de rendimiento (TIR), el Plazo de recuperación del capital (PRC), el Plazo de recuperación del capital al descontado (PRCD) y el Retorno sobre la inversión (RSI).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del análisis realizado para la caracterización de dos muestras (1 y 2) de fusel, proveniente de una destilería cubana, se presentan en la tabla 5. Los resultados se expresan en gramos por 100 L de etanol absoluto (EA) (13), se determinan los componentes mayoritarios, según la norma NC 508:2011 (14).

En las caracterizaciones realizadas a las muestras de aceite fusel, su componente mayoritario es el alcohol isoamílico, seguido del 1-propanol y el isobutanol; ya en menor medida contiene 2-metil-1-butanol, acetato de etilo y metanol.

En las figuras 3 y 4 se muestran los cromatogramas de la curva patrón de componentes mayoritarios, según la norma NC 508:2011 (14), que se obtienen a partir de la técnica analítica cromatografía de gases para las muestras procesadas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 5. Caracterización de las muestras de fusel

	Muestra 1	Muestra 2
Grado alcohólico % Área	15.45	15.13
Componentes	g/100 L EA	
acetato de etilo	67.52	67.52
metanol	20.13	19.03
1-propanol	13 486.24	13 486.24
isobutanol	9 214.67	9 135.00
2-metil-1-butanol	2 901.47	2 856.44
alcohol isoamílico	16 258.57	16 034.42

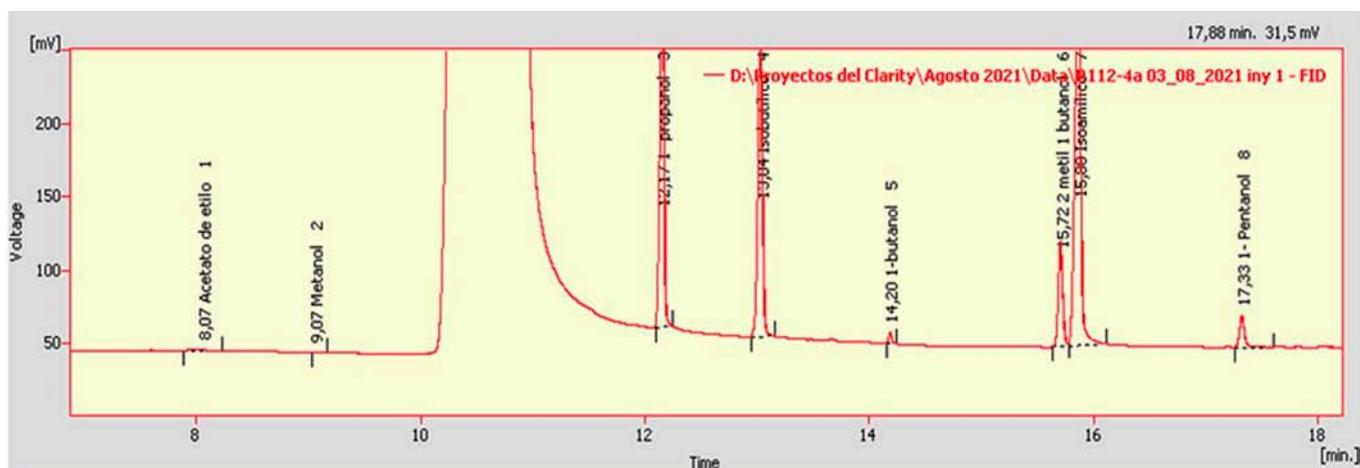


Figura 3. Cromatograma del método para componentes mayoritarios para la muestra 1.

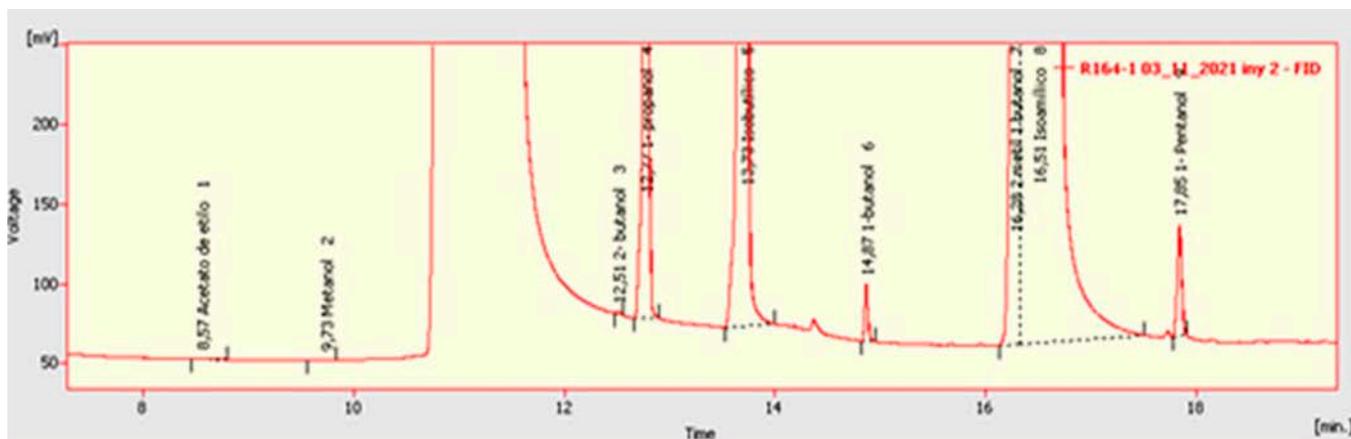


Figura 4. Cromatograma del método para componentes mayoritarios para la muestra 2.

En los cromatogramas se evidencia la presencia de los alcoholes superiores y algunos volátiles como el metanol y el éster etílico del etanol cuyas temperaturas de ebullición son más bajas, además de que se encuentran en menor proporción. El área bajo la curva, que es lo reportado en los cromatogramas, indica el porcentaje en el que cada uno se encuentra en esa muestra de fusel, en la que existe una mezcla de componentes. Los alcoholes van detectándose de acuerdo con el tiempo de retención que ellos presentan en la fase sólida en la que están adsorbidos y su solubilidad en la fase móvil.

Las muestras 1 y 2 presentan similitud en su composición, aunque en el cromatograma de la muestra 2 hay presencia de trazas de 2-butanol y el área bajo la curva de 2-metil-1-butanol y el isoamílico (3-metil-1-butanol) no se encuentra perfectamente delimitada, lo cual puede deberse a que estos dos isómeros tienen tiempos de retención muy similares ± 0.03 minutos de diferencia, pues sus propiedades fisicoquímicas son similares. Se diferencian en las temperaturas de ebullición en ± 3 °C y la solubilidad en ± 0.5 g/100 g de agua.

La composición promedio del aceite fusel, según la literatura, es de un 13 % de 1-propanol, un 51 % de alcohol isoamílico y, el resto, de otros alcoholes. Este resultado arroja valores de un 40 % de alcohol isoamílico y un 33 % de 1-propanol.

Se realizó una comparación aritmética entre las muestras y se halló el error relativo entre sus composiciones, para conocer si existen diferencias entre estas, se considera un error hasta el 5 %. En la tabla 6 se presentan los resultados del análisis.

Tabla 6. Resultados del análisis aritmético de las muestras 1 y 2

Componentes	Error relativo (%)	Componentes	Error relativo (%)
Acetato de etilo	-	2-metil-1-butanol	1.55
metanol	5.46	alcohol isoamílico	1.37
1-propanol	-	Grado alcohólico	2.07
isobutanol	0.86		

A partir de los resultados reportados en la tabla 6, se arriba a la conclusión de que las dos muestras de aceite fusel analizadas no presentan grandes diferencias entre ellas, a pesar de que la composición de metanol presente un ligero error mayor al 5 %.

La composición de fusel de la destilería cubana, fue comparada con los datos reportados de la literatura y se calculó un error relativo para determinar si existen diferencias entre estas. En la tabla 7 se muestra la comparación realizada.

Tabla 7. Comparación del fusel de la destilería cubana con la literatura

Componentes	Fusel destilería cubana	Fuente				
		(7)	(8)	(4)	(15)	(16)
acetato de etilo	0.12	0.0096	-	-	-	-
metanol	0.03	0.0447	-	-	-	-
1-propanol	21.92	0.1418	1	8-10	3.34	0.03
isobutanol	14.91	16.3656	1	-	21.71	0.07
2-metil-1-butanol	4.78	-	-	-	-	-
alcohol isoamílico	26.78	63.3429	86.30	65-71	70.94	51.39
agua	16.88	17.24	9.3	12-15	2.4	14
etanol	14.56	2.8194	2.4	2-5	1.4	34.16

Al hacer un análisis de las composiciones de las muestras estudiadas con lo reportado por los autores cubanos e internacionales como: Martínez *et al.* (7), Montoya *et al.* (8), Hidalgo *et al.* (4), Armas *et al.* (15) y Bergero *et al.* (16), se evidencian composiciones de fusel muy diversas, estas no solo varían en cantidades sino también en los compuestos presentes y se encuentra como punto en común entre ellas, al alcohol isoamílico como componente mayoritario.

Validación de los modelos de simulación

Alternativa A

En la tabla 8 se presentan los resultados de la validación del modelo de simulación de la alternativa A.

Tabla 8. Comparación de los resultados de la alternativa A

Parámetro	Martínez <i>et al.</i> (7)	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Porcentaje recuperación amílico	99.99	99.89	0.10
Porcentaje másico de agua en fusel deshidratado	2.3	2.14	6.95
Temperatura de la corriente de fondo (°C)	131.2	131.2	0.00
Flujo másico de destilado (kg/h)	68.47	68.46	0.01
Parámetro	Gallardo <i>et al.</i> (3)	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Flujo másico de destilado (kg/h)	68.47	68.46	0.01

A pesar de que el error máximo relativo obtenido de 6.95 % es superior al 5 %, el resultado se considera válido, debido a que no existen diferencias apreciables en los valores absolutos de la variable % másico de agua en fusel deshidratado .

Alternativa B

En la tabla 9 se presenta el resultado de la validación de la simulación de la alternativa B y se obtuvo un error relativo menor a 5 % (error máximo relativo de 4.30 %), por lo que el modelo de simulación obtenido es confiable.

Tabla 9. Comparación de los resultados de la alternativa B

Parámetro	Montoya <i>et al.</i> (8)	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Flujo másico de la corriente de tope D_1 (kg/h)	27.108	27.11	0.007
Composición másica de alcohol isoamílico en D_1	0.879	0.8606	2.09
Composición másica de etanol en D_1	0.024	0.0245	2.08
Composición másica de agua en D_1	0.095	0.0948	0.21
Flujo másico de la corriente de fondo R_1 (kg/h)	0.5330	0.5310	0.37
Flujo másico de la corriente de alimentación F_2 (kg/h)	37.942	38.02	0.20
Flujo másico de la corriente de tope D_2 (kg/h)	14.177	14.17	0.049
Composición másica de alcohol isoamílico en D_2	0.416	0.4004	3.75
Composición másica de agua en D_2	0.309	0.2957	4.30
Flujo másico de la corriente de fondo R_2 (kg/h)	23.765	23.85	0.35
Composición másica de alcohol isoamílico en R_2	0.997	0.9739	2.31
Flujo másico de la corriente de recirculación B_2 (kg/h)	10.834	10.91	0.70
Flujo másico de la corriente A_2 (kg/h)	3.353	3.261	2.74
Calor en el condensador de la columna (T-101) (kW)	7.743	7.444	3.86
Calor en el rehedidor de la columna (T-101) (kW)	7.874	7.864	0.12
Calor en el condensador de la columna (T-102) (kW)	5.357	5.341	0.29
Calor en el rehedidor de la columna (T-102) (kW)	5.824	5.591	4.00

Una vez validados los modelos de ambas alternativas, se procedió a analizar el caso de estudio de una destilería cubana, la cual presenta una capacidad de producción de 90 000 L/d de alcohol extrafino y se considera que el flujo del fusel representa el 1 % de la capacidad de la planta. Para la determinación del consumo de combustible se consideró un índice de generación de vapor de 15 kg vapor de calentamiento/kg combustible.

En la tabla 10 se presentan los resultados de ambas alternativas, para el caso de estudio.

Tabla 10. Resultados de los modelos para la destilería cubana

Parámetro	Alternativas	
	A	B
Alcohol isoamílico (m ³ /año)	-	5.62
Mezcla de solventes (m ³ /año)	156.31	242.35
1-propanol (m ³ /año)	79.27	-
Consumo agua de enfriamiento (m ³ /año)	2 535.84	6 656.40
Consumo de vapor (kg/año)	69 012	189 532.80
Consumo de crudo (kg/año)	4 600.80	12 635.28

En la tecnología A se recupera el 62.83 % del propanol presente en el fusel, por la corriente de destilado; mientras que en la tecnología B, por la corriente de fondo (R_1) se recupera el 6.62 % del alcohol isoamílico presente en la corriente de alimentación.

La alternativa A requiere de menor consumo de facilidades auxiliares, lo que se traduce en ahorro. Se ahorrarían 4 120.56 m³/año de agua de enfriamiento, 120 520.80 kg/año de vapor y 8 034.48 kg/año de crudo.

Mediante la simulación se puede observar el comportamiento de diferentes variables en la columna de destilación. En este caso, se analizaron los perfiles de temperatura y composición de las columnas de destilación, de ambas alternativas.

Alternativa A

En las figuras 5 y 6 se muestran los perfiles de temperatura y composición de la columna de destilación T-100.

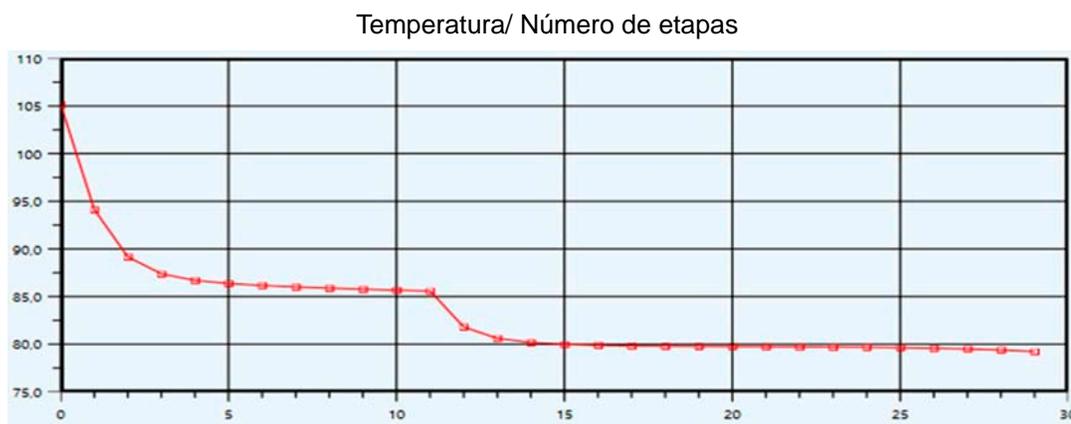


Figura 5. Perfil de temperatura de la columna T-100.

En la figura 5 se observa una disminución de la temperatura hasta el plato 11 (plato de alimentación) de 125 °C hasta 86.37 °C, luego la temperatura sigue descendiendo hasta 80 °C en el plato 15, se comporta de manera constante hasta plato 25, se observa una ligera disminución hasta el plato 28.

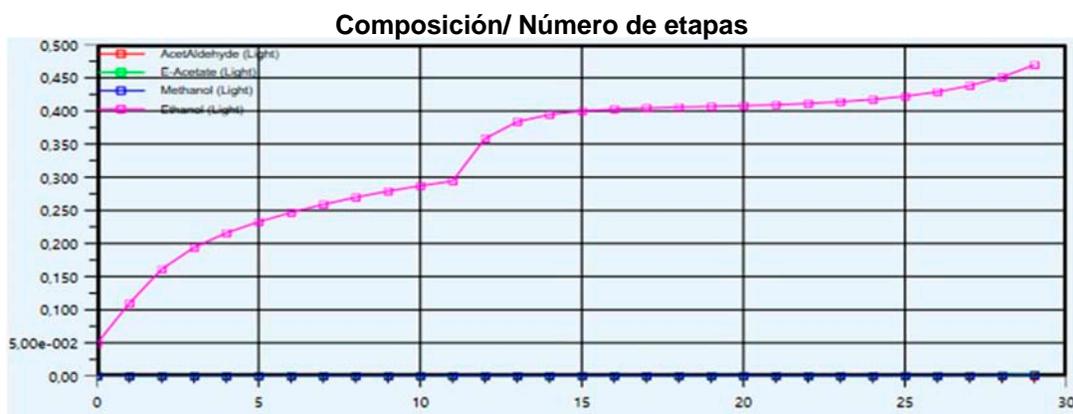


Figura 6. Perfil de composición de la columna T-100.

En la figura 6 se puede observar el perfil de composición de la columna de destilación T-100. Para la fase vapor, en la zona tope de la columna, se aprecia un incremento de la composición molar de etanol, lo que se debe al contacto del vapor de calentamiento con el reflujo, debido a la transferencia de masa de los componentes más volátiles a la fase vapor. También se aprecia que, a partir del plato 15, la diferencia de composición no es tan significativa, por lo que se puede disminuir el número de platos de la columna.

Alternativa B

Las figuras 7 y 8 muestran los perfiles de temperatura y composición de la columna de destilación T-101.

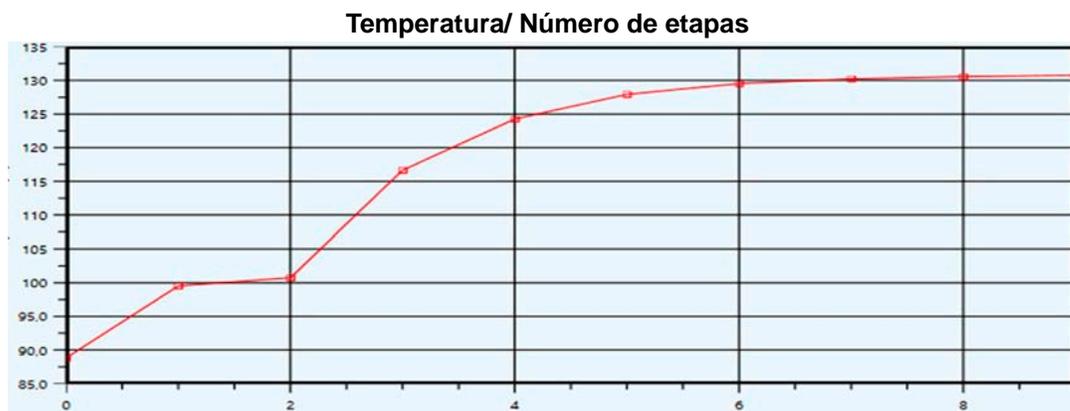


Figura 7. Perfil de temperatura de la columna T-101.

En la figura 7 se evidencia un aumento de temperatura hacia el fondo de la columna, su comportamiento constante en el plato 2, debido a que la alimentación ocurre en este plato y la corriente se encuentra más fría.



Figura 8. Perfil de composición de la columna T-101.

En la figura 8 se aprecia que la composición de etanol se va enriqueciendo hacia el tope de la columna, que se debe al contacto del vapor de calentamiento con el reflujo, debido a la transferencia de masa de los componentes más volátiles a la fase vapor.

Las figuras 9 y 10 muestran los perfiles de temperatura y composición de la columna de destilación T-102.

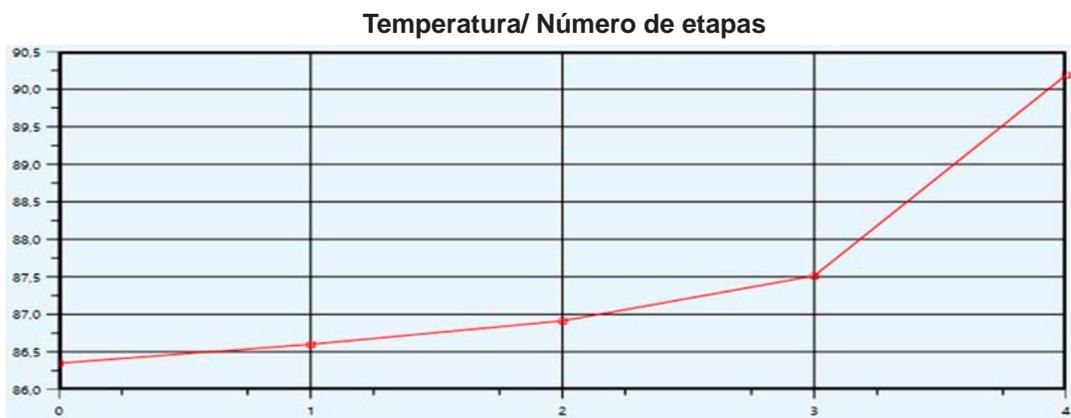


Figura 9. Perfil de temperatura de la columna T-102.

En la figura 9 se evidencia un aumento progresivo de temperatura hacia el fondo de la columna, en este caso la alimentación a la columna ocurre en el plato 1.

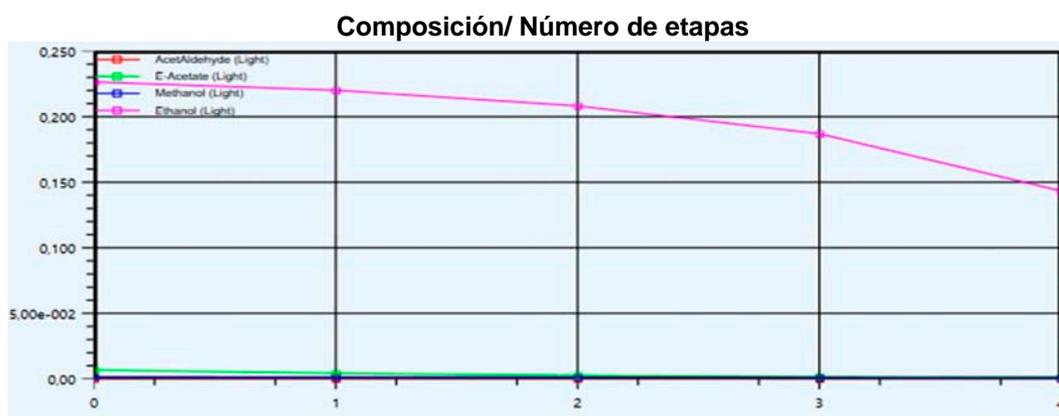


Figura 10. Perfil de composición de la columna T-102.

En la figura 10 se aprecia que la composición de etanol se va enriqueciendo hacia el tope de la columna, que se debe al contacto del vapor de calentamiento con el reflujo, debido a la transferencia de masa de los componentes más volátiles a la fase vapor.

Análisis económico

Para el análisis económico se determinaron los principales indicadores económicos de ambas alternativas, se consideró para ello la venta de productos de interés: propanol al 48 %, alcohol isoamílico al 86 % y la mezcla de solventes. En la tabla 11 se presentan estos resultados.

En la tabla 11 se observa que las alternativas analizadas son económicamente ventajosas, se obtienen los mayores beneficios en la alternativa B. En ambos casos la TIR presenta valores por encima de la tasa a la cual la empresa puede ob-

Tabla 11. Indicadores económicos

Indicadores	Alternativa A	Alternativa B
VAN (CUP)	341 536	451 364
TIR (%)	14.5	15.6
PRC (años)	2.5	2.4
PRCD (años)	3.4	3.3
RSI (%)	40.0	41.2

tener fondos (tasa de interés: 12 %) y el RSI es superior al 33 %, lo que denota que las inversiones son atractivas.

CONCLUSIONES

1. Se desarrolló la caracterización de dos muestras del aceite fusel. La composición mayoritaria de las muestras analizadas corresponde al alcohol isoamílico con 26.78 % másico.
2. Se simularon en Aspen Hysys v10.0 dos alternativas para la obtención de co-productos del aceite fusel, los cuales poseen un alto valor agregado en la industria. Sus modelos se validaron con errores relativos menores al 5 %.
3. Se realizó la evaluación técnico-económica de las alternativas propuestas cuando se utiliza el aceite del fusel de la destilería seleccionada. Se determinó que la alternativa con los mejores indicadores económicos dinámicos es la B, con un VAN de 451 364 CUP, TIR de 15.6 %, PRC de 2.4 años, PRCD de 3.3 años, RSI 41.2 %.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Romero-Delgado O. Aplicación del Análisis Complejo de Procesos al sistema tecnológico de la Destilería Agustín Rodríguez Mena de la Ronera Central [Trabajo de diploma]: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; 2018.
2. Borroto-Mato D, Lorenzo-Izquierdo M, García-Gutiérrez R, Reyes-Linares A. Aspectos generales sobre la determinación de alcoholes superiores en bebidas alcohólicas. Icidca. 2017;51(3):58-65.
3. Gallardo-Aguilar I, Feyt-Leyva R, Hidalgo-Pérez E. Obtención de acetato de isoamilo a partir de aceites fusel. Simulación del proceso. Centro Azúcar. 2011;38(2):44-54.
4. Hidalgo-Pérez E. Aprovechamiento del aceite de fusel para la obtención de productos químicos de alto valor agregado [Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico]. Las Villas: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; 2010.
5. Devora-Rodríguez Y, López-Bello N, Armas-Martínez ACd, Ley-Chong N. Diseño de la etapa de purificación para la obtención de acetato de isoamilo a partir del aceite de fusel. Tecnología Química 2017;37(3):405-16.
6. Prieto-Ríos LG. Síntesis de redes de proceso para la producción de ésteres principales del alcohol isoamílico, componente principal del aceite fusel, utilizando la metodología P-Graph [Trabajo final presentado como requisito parcial para optar por el título de Máster en Ingeniería Química]. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2019.
7. Martínez-Martínez Y, Gallardo-Aguilar I, López-Bello N, Morales-Pérez MC. Obtención de alcoholes superiores a partir de fusel mediante proceso de destilación fraccionada. Centro Azúcar. 2011;38(4):8-14.
8. Montoya N, Córdoba F, Trujillo C, Gil I, Rodríguez G. Fusel Oil Process Separation 2011 [09-10-2021]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/287348518>.
9. Carlson E. Don't gamble with physical properties for simulations. Chemical Engineering Progress. 1996;92(10):35-46.
10. Khaled-Sulaima A, Gasmelseed GA. Design of fusel oil separation column using Hysys Program Sudan Engineering Society Journal. 2010;56(54):53-60.
11. Toselli L, Basualdo M. Propuesta de recuperación de etanol, n-propanol y alcohol isoamílico a partir de aceites de fusel. 5to Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos; Campos de Jordao-Brasil 2001.

12. Barlas Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*. 1996;12(3):183-210.
13. Lorenzo M, Borroto D. Estudio por cromatografía de gases de diferentes destilados residuales. Laboratorio Labeb, Icidca.; 2021.
14. NC-508. Bebidas alcohólicas. Determinación de componentes volátiles mayoritarios en bebidas alcohólicas destiladas, aguardientes y alcohol etílico por cromatografía gas-líquido. Oficina Nacional de Normalización.pp.1-14. 2011.
15. Armas-Martínez ACd, Martínez-Martínez Y, López-Bello N, Gallardo-Aguilar I. Estrategia de tecnología limpia para una fábrica de alcohol extrafino. *Centro Azúcar*. 2013;40(4):69-76.
16. Bergero-Antonella-Odetti MS. Evaluación experimental de la producción batch de acetato de isoamilo a partir de alcohol isoamílico recuperado del aceite de fusel [Trabajo de diploma para obtener el título de Ingeniero Químico]. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba; 2019.