

**Artículo Original**

**DESTILACIÓN REACTIVA PARA LA REVALORIZACIÓN DE  
ACEITE DE FUSEL: CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS Y  
SIMULACIÓN DE PROCESOS**

**REACTIVE DISTILLATION FOR FUSEL OIL REVALUATION: SAMPLE  
CHARACTERIZATION AND PROCESS SIMULATION**

Claudia Liz García Aleaga<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0002-9754-4604>

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

Osney Pérez Ones<sup>2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0366-0317>

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

<sup>1</sup> Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la caña de Azúcar (ICIDCA), Dirección de Biotecnología, La Habana, Cuba.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.

Recibido: Agosto 24, 2024; Revisado: Septiembre 4, 2024; Aceptado: Septiembre 22, 2024

**RESUMEN**

**Introducción:**

El aceite de fusel actualmente constituye un desecho que posee en su composición una amplia gama de alcoholes que lo posicionan como un producto versátil para diversos sectores industriales.

**Objetivo:**

Obtener productos de alto valor comercial a partir de la caracterización de muestras de aceite de fusel y la simulación de procesos en el *Aspen Hysys* v10.0.

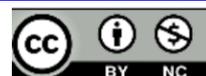
**Materiales y Métodos:**

Se caracterizaron tres muestras de aceite de fusel de una destilería cubana mediante cromatografía de gases. Se realizó un análisis estadístico de distribución normal entre las composiciones de las muestras y una prueba de hipótesis a partir del *Statgraphics Centurion XVII*. Se modeló una tecnología de destilación reactiva mediante el simulador *Aspen Hysys* v10.0 y los resultados fueron validados con los datos reportados en la literatura.



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](mailto:osney@quimica.cujae.edu.cu)



## **Resultados y Discusión:**

En las caracterizaciones realizadas para las tres muestras de aceite de fusel hay presencia de alcohol isoamílico como componente mayoritario. Se obtuvo que las composiciones de estas no presentan diferencias significativas entre ellas. Con la tecnología de destilación reactiva se obtiene una mezcla de ésteres compuesta por 65,66 % vol. de acetato de isoamilo, 11,05 % vol. de acetato de isobutilo y en el destilado 40,16 % vol. de acetato de etilo. Se consumen 14 040 m<sup>3</sup>/año de agua de enfriamiento, 82 280 kg/año de vapor y 5 328 kg/año de fuel oil.

## **Conclusiones:**

Con la tecnología de destilación reactiva de aceite de fusel se obtiene más del 45% de productos de gran valor agregado para la industria del bioetanol.

**Palabras clave:** aceite de fusel; destilación reactiva; mezcla de ésteres; simulación.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

Fusel oil currently constitutes a waste product that possesses in its composition a wide range of alcohols that position it as a versatile product for various industrial sectors.

### **Objective:**

To obtain high commercial value products from fusel oil sample characterization and process simulation in Aspen Hysys v10.0.

### **Materials and Methods:**

Three fusel oil samples from a Cuban distillery were characterized by gas chromatography. A statistical analysis of the normal distribution between the compositions of the samples and a hypothesis test were performed using *Statgraphics Centurion XVII*. A reactive distillation technique was modeled using the *Aspen Hysys v10.0* simulator and the results were validated with data reported in the literature.

### **Results and Discussion:**

In the characterizations carried out for the three fusel oil samples, there is the presence of isoamyl alcohol as the major component. It was found that their compositions do not present significant differences among them. With the reactive distillation technology, a mixture of esters is obtained, composed of 65.66 % vol. of isoamyl acetate, 11.05 % vol. of isobutyl acetate and in the distillate 40.16 % vol. of ethyl acetate. 14,040 m<sup>3</sup>/year of cooling water, 82,280 kg/year of steam and 5,328 kg/year of fuel oil are consumed.

### **Conclusions:**

With fusel reactive distillation technology, more than 45 % of high value-added products are obtained for the bioethanol industry.

**Keywords:** fusel oil; reactive distillation; esters mixture; simulation.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El aceite de fusel constituye un subproducto obtenido a partir de la destilación y posterior rectificación del proceso de producción de bioetanol, rico en compuestos de alto valor comercial. Se encuentra en pequeñas cantidades en bebidas alcohólicas y lo

---

componen diversos alcoholes como el etanol y otros de orden superior, como el alcohol isoamílico, 1-propanol, 2-propanol, butanol (varios isómeros), furfural y otros compuestos en menor proporción, además de agua (Hidalgo, 2010; Martínez y col., 2011; Mendoza y col., 2021; Gallardo y col., 2022).

El aceite de fusel posee en su composición una amplia gama de alcoholes que lo posicionan como un producto versátil para diversos sectores industriales, y que se pudieran obtener si se recuperara el aceite de fusel producido.

Uno de los principales usos del aceite de fusel podría encaminarse a la síntesis de ésteres. Estos compuestos poseen un valor agregado superior y son muy cotizados en industrias como la cosmética, farmacéutica y alimentaria debido a sus propiedades aromáticas y funcionales (Güvenç y col., 2007; Gallardo y col., 2011; Martínez y col., 2011). Es por ello que se deben emplear tecnologías que permitan obtener de él estos productos de alto valor agregado más rentables y menos contaminantes asociados a la industria del bioetanol (Devora-Rodríguez y col., 2017).

Según lo expresado por Sánchez (2020), una de las alternativas tecnológicas para la revalorización del aceite de fusel, encaminada a la esterificación de alcoholes, es el proceso directo mediante destilación reactiva, que consiste en la reacción simultánea de toda la mezcla de alcoholes fusel con un ácido carboxílico. La destilación reactiva no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también reduce los costos de operación y mejora el impacto medioambiental.

La simulación de procesos es una herramienta que proporciona una visión de la conducta de un proceso real, lo que resulta beneficioso en sistemas complejos, con interacción de varias variables (Cruz-Llerena y col., 2020), de aquí que se emplee como vía para evaluar tecnologías de revalorización del aceite de fusel.

A partir de lo referido anteriormente se plantea como objetivo de este trabajo: obtener productos de alto valor comercial a partir de la caracterización de muestras de aceite de fusel y la simulación de procesos en el *Aspen Hysys v10.0*.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1. Descripción de técnicas y procedimiento de laboratorio***

Para la caracterización de tres muestras de aceite de fusel provenientes de una destilería cubana se empleó la técnica de cromatografía de gases. Las caracterizaciones realizadas se llevaron a cabo en el laboratorio Labeb del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Se empleó el cromatógrafo de gases SHIMADZU modelo Nexis GC-2030 con columna capilar SH-Rtx-Wax (60 mm x 0,25 mm, 0,25  $\mu\text{m}$  espesor de película), detector de ionización de llama (FID) y equipado con inyector automático. Como gas portador se utilizó el hidrógeno con un volumen de inyección de 1  $\mu\text{m}$  con un *Split* de 1 en 25. Como patrones reactivos de la firma Sigma-Aldrich se emplean: acetal, acetato de etilo, metanol, 1-propanol, 1-butanol, 2-metil-1propanol, 2 metil -1 butanol, 3-metil-1-butanol y como estándar interno 1-pentanol. Todos tienen una pureza superior al 99 %. El tiempo de corrida es de 20 minutos y se realiza el análisis por triplicado.

### ***2.2. Procesamiento estadístico***

Para verificar si los datos de las muestras siguen una distribución normal se utilizó el

---

programa estadístico *Statgraphics Centurion XVII*. Para ello se realizó la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* considerando un nivel de confianza del 95 %. En caso de obtener una distribución normal se calculan las medias y las desviaciones estándar y para una distribución no normal las medianas y las desviaciones absolutas de las medianas (DAM). Además, se realizó la prueba de hipótesis *t-Student*, para determinar si existen diferencias significativas entre las determinaciones analíticas realizadas.

### 2.3. Simulación empleando *Aspen Hysys v10.0*

#### 2.3.1. Selección de componentes y paquete de propiedades

En el caso de la selección de los componentes se empleó la composición obtenida a partir de la caracterización del aceite de fusel realizada. En la tabla 1 se muestra la composición del aceite de fusel en fracción volumétrica.

**Tabla 1.** Composición volumétrica de aceite de fusel para la tecnología de destilación reactiva

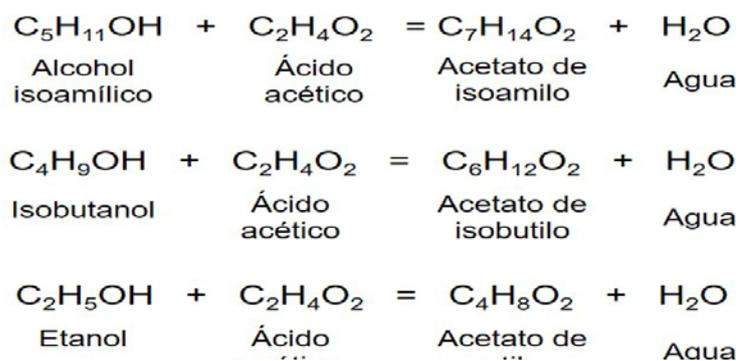
<i>Componentes</i>	<i>Composición (fracción volumétrica)</i>
Alcohol isoamílico	0,6104
1-butanol	0,0021
1-pentanol	0,0219
Acetaldehído	0,0001
Isobutanol	0,0655
Etanol	0,1549
Agua	0,1185
1-propanol	0,0266

Como paquete de propiedades se seleccionó el modelo termodinámico Wilson para la fase líquida e Ideal para la fase vapor, empleado por Castañeda (2018) para la simulación de una columna de destilación reactiva.

#### 2.3.2. Simulación del proceso de revalorización de aceite de fusel

Para la construcción del modelo de simulación de destilación reactiva de aceite de fusel se partió de lo propuesto por Sánchez (2020) y se emplearon ocho módulos: *Component splitter*, *Heat Exchanger*, *Distillation*, *Cooler*, *Heater*, *Mixer*, *Set* y *Spreadscheet*.

El módulo *Component splitter* (X-100) se utilizó para simular la etapa de deshidratación del aceite de fusel crudo con el fin de separar el contenido de agua que presenta de los demás componentes y facilitar el proceso de destilación. Para simular el proceso de destilación reactiva (proceso simultáneo de reacción separación) se utilizó el módulo *Distillation column* (T-100). Este módulo se encuentra equipado para llevar a cabo las reacciones químicas de esterificación del proceso. En él se insertaron las reacciones de equilibrio correspondientes para cada alcohol, las cuales se muestran en la figura 1.



**Figura 1.** Reacciones de equilibrio para cada alcohol

El módulo *Heat Exchanger* (IC-1) se empleó para aprovechar la corriente de fondo de la columna de destilación y calentar la alimentación, permitiendo disminuir los consumos de calor. Los módulos *Cooler* (E-101) y *Heater* (E-102) se emplearon para cuantificar el consumo de vapor y de agua de enfriamiento respectivamente de la columna de destilación reactiva. El módulo *Mixer* (MIX-100) se utilizó para adicionar el agua de lavado a la corriente de fondo de la columna de destilación reactiva y así disminuir la composición de ácido acético en la mezcla y el módulo *Component splitter* (X-101) se usó en la separación del agua y el ácido acético que no reaccionó de la fase orgánica rica en los compuestos de interés.

Los *Set* (Set-1, Set-2) se emplearon para establecer una relación entre dos corrientes del proceso, una en función de otra. Con el Set-1 se relacionó el flujo molar del ácido acético con el valor de flujo de fusel deshidratado, estableciendo una relación ácido acético/fusel de 1 (Sánchez, 2020) y con el Set-2 se relacionó el flujo másico del agua de lavado con la corriente de fondo frío de la columna de destilación, considerando una relación agua de lavado/fondo frío de 1,5 (Gallardo y col., 2011),

El módulo *Spreadscheeet* se empleó como hoja de cálculo para la determinación del porcentaje de conversión de alcohol isoamílico, isobutanol, ácido acético y etanol.

Los datos de entrada de las corrientes del proceso se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Datos de entrada de las corrientes del proceso

<i>Corriente</i>	<i>Presión (kPa)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Flujo (kg/h)</i>	<i>Fase vapor</i>
Fusel almacenado	-	30	-	-
Fusel	101,3	50	31,36	-
Fusel deshidratado	101,3	50	-	-
Agua	101,3	50	-	-
Ácido acético	101,3	90	-	-
Agua de lavado	101,3	30	-	-
Fase acuosa	101,3	57,01	-	-
Fase orgánica	101,3	-	-	-
Agua de enfriamiento 1	101,3	30	1 955	-
Vapor saturado 1	784,5	-	73,07	1

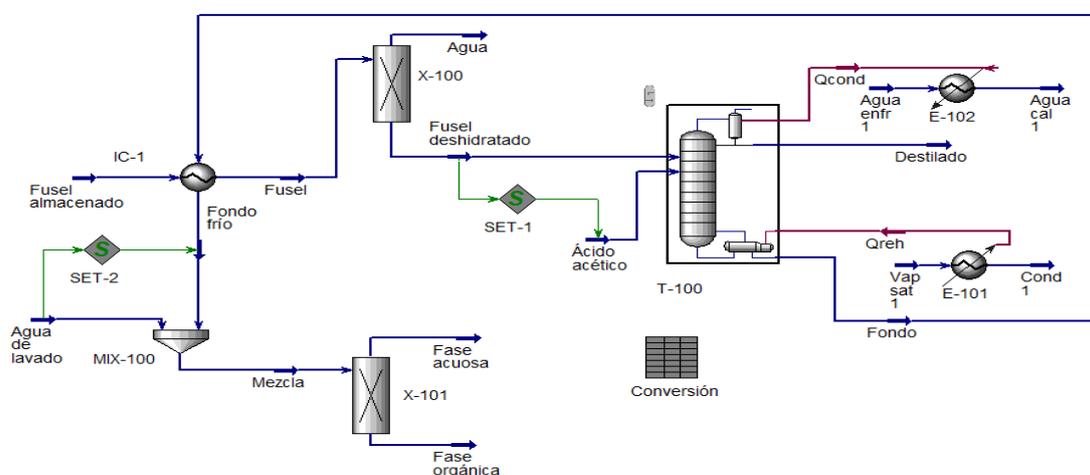
En la tabla 3 se muestran los datos para la simulación de la columna de destilación reactiva (Sánchez, 2020).

**Tabla 3.** Datos de la columna de destilación reactiva

<i>Datos</i>	<i>Columna T-100 (reacción-separación)</i>
Número de platos	24
Plato de alimentación aceite de fusel	20
Plato de alimentación de ácido acético	20
Platos reactivos	5-20
Relación de reflujo	1
Fracción de volumen del acetato de etilo	0,0011
Espaciado entre platos (m)	0,4
Caída de presión (kPa)	0

Se consideró como especificación de la columna de destilación reactiva, la alimentación del aceite de fusel y el ácido en el mismo plato y último de la zona reactiva como condición para aumentar la conversión del ácido acético entre 74,5-98,1 %, según lo reportado por Sánchez (2020).

En la figura 2 se muestra el modelo de simulación de la tecnología de destilación reactiva para el aprovechamiento del aceite de fusel.



**Figura 2.** Modelo de simulación de la tecnología de destilación reactiva

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de las muestras de aceite de fusel

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado para la caracterización de tres muestras de aceite de fusel provenientes de una destilería cubana. Los resultados se expresan en gramos por 100 L de etanol a 40 °GL; se determinan los componentes mayoritarios según NC 508, (2011).

**Tabla 4.** Caracterización de las muestras de aceite de fusel

<i>Componentes</i>	<i>Muestra F1</i>	<i>Muestra F2</i>	<i>Muestra F3</i>
	g/100L		
Acetaldehído	6,1	6,3	0
Acetato de etilo	0	13,2	
Acetal		0	
Metanol			
2-butanol	5,7		
1-propanol	1 912,1	677,6	4 201,1
Isobutanol	5 883,5	2 466,9	8 162,9
1-butanol	102,2	90,8	338,8
Alcohol isoamílico	46 297,6	56 204,2	48 534,8
1-pentanol	1 891,4	1 928,6	1 782,4

En las caracterizaciones realizadas para las tres muestras de aceite fusel hay presencia de alcohol isoamílico, isobutanol, 1-propanol, 1-pentanol y 1-butanol presentándose el alcohol isoamílico como componente mayoritario, seguido del isobutanol. En las muestras caracterizadas no hay presencia de metanol y acetal.

Las muestras F1 y F3 son similares en cuanto al orden de componentes mayoritarios, aunque difieren en la presencia de trazas de 2-butanol y acetaldehído en la muestra F1.

Con los resultados obtenidos en las caracterizaciones se calculó el volumen total de alcoholes superiores presente en cada muestra. Se trabajó con un grado alcohólico de 15,49 % calculado por Fernández-Casiis y col., (2022), este porcentaje indica la composición de etanol en la solución. Para cada muestra, los resultados fueron llevados a fracción volumétrica y se trabajó con el promedio de las composiciones. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1 que son los datos empleados para la simulación.

En la tabla 5 se presenta una comparación entre la composición de aceite de fusel de la destilería cubana estudiada con otras composiciones de aceite de fusel reportadas en la literatura.

**Tabla 5.** Comparación de aceite de fusel de la destilería cubana con la literatura

<i>Componentes</i>	<i>Composición (% másico)</i>				
	<i>India (Patidar y Mahajani, 2012)</i>	<i>Brasil (Ferreira y col., 2013)</i>	<i>Colombia (Mendoza y col., 2021)</i>	<i>China (Zheng y col., 2019)</i>	<i>Cuba Destilería estudiada</i>
1-propanol	3,5	0,94	-	-	2,56
Isobutanol	9,5	6,71	1,3	15	6,30
1-butanol	-	0,57	1,4	-	0,20
A. isoamílico	74,6	55,70	70,4	51	59,90
2-metil-1-butanol	-	12,07	-	-	-
Isopropanol	-	-	-	13	-
1-pentanol	-	0,03	-	-	2,15

Agua	-	15,31	14,3	10	14,14
Metanol	-	0,02	-	-	-
Etanol	12,4	8,66	12,6	10	14,75
Acetato de etilo	-	-	-	-	-
Acetaldehído	-	-	-	-	0,0001

Como se puede observar en la tabla 5 las composiciones de aceite de fusel son muy diversas, tanto en cantidad como en compuestos presentes. Como punto en común presentan el alcohol isoamílico como componente mayoritario. Esta variación de la composición puede deberse, entre otros factores, a: la materia prima utilizada en la fermentación, las condiciones y el medio bajo los cuales se lleva a cabo el proceso fermentativo (la presencia de aminoácidos, compuestos nitrogenados, la temperatura, la aireación, el tipo y concentración del inóculo) y el método de recuperación en la columna rectificadora.

### 3.2. Procesamiento estadístico de las muestras

En el análisis de distribución normal, los valores se encontraron dentro del intervalo  $[-2; 2]$ , lo que indica que no existen desviaciones significativas de la normalidad. También mediante el gráfico de probabilidad normal (P-plot) de cada componente se pudo observar que las proporciones acumuladas de las composiciones con la distribución normal se concentran en torno a la línea recta, con excepción del acetato de etilo y del 2-butanol que tienden a encontrarse más alejadas. La prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* demostró que todas las composiciones de las muestras analizadas se adecuan a una distribución normal ( $P \text{ value} \geq 0,05$ ) con un intervalo de confianza del 95 %, con excepción del acetato de etilo y el 2-butanol que presentan una distribución no normal. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos del análisis muestras.

**Tabla 6.** Resultados del análisis de muestras

<i>Componente</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación estándar</i>
Alcohol isoamílico	50 345,5	5 195,6
1-pentanol	1 867,47	75,98
Isobutanol	5 504,43	2 866,86
1-butanol	177,27	140,01
1-propanol	2 263,6	1 787,86
Acetaldehído	4,13	3,58
	<b>Mediana</b>	<b>DAM</b>
2-butanol	0	0
Acetato de etilo	0	0

Se realizó la prueba de hipótesis *t-Student* para la media ( $n < 30$ ) y se obtuvo que las composiciones de estas no presentan diferencias significativas entre ellas.

### 3.3. Resultados obtenidos a partir de la simulación

La destilería cubana presenta una capacidad de producción de 90 000 L/d de etanol extrafino y se considera que el flujo de aceite de fusel obtenido representa el 1 % de la

capacidad de la planta (Fernández-Casiis y col., 2022). Para la simulación se empleó un flujo de aceite de fusel de 900 L/d y su composición se corresponde con la reportada en la tabla 1. Para la determinación del consumo de combustible se consideró un índice de generación de vapor de 15 kg vapor de calentamiento/kg combustible (Cruz-Llerena y col., 2020).

En la tabla 7 se presentan los principales resultados obtenidos para la tecnología de destilación reactiva.

**Tabla 7.** Resultados obtenidos en la tecnología de destilación reactiva

<i>Parámetro</i>	<i>Aspen Hysys</i>		
	<i>Etapa de reacción-separación</i>		<i>Etapa de lavado</i>
	<i>Destilado</i>	<i>Fondo</i>	<i>Fase orgánica</i>
Temperatura (°C)	72,56	116	57,01
Flujo molar (kmol/h)	0,3259	0,4080	0,2346
Composición (fracción molar)			
Alcohol isoamílico	0,0093	0,1376	0,2394
1-pentanol	0,0010	0,0180	0,0313
Isobutanol	0	0,0015	0,0018
1-butanol	0,0007	0,0010	0,0026
1-propanol	0,0290	0,0096	0,0166
Acetaldehído	0,0002	0	0
Etanol	0,1093	0,0022	0,0038
Agua	0,5956	0,1344	0,0006
Ácido acético	0,0130	0,1573	0
Acetato de isoamilo	0,0475	0,3394	0,5903
Acetato de isobutilo	0	0,0642	0,1117
Acetato de etilo	0,1945	0,0011	0,0019
Calor absorbido en el condensador (T-100) (kJ/h)	26 210		
Calor cedido en el rehervidor (T-100) (kJ/h)	24 810		
Consumo de agua de enfriamiento (m <sup>3</sup> /h)	1,95		
Consumo de vapor de calentamiento (kg/h)	11,15		
Consumo de fuel oil (kg/h)	0,74		
Conversión de ácido acético (%)	66,49		
Conversión de alcohol isoamílico (%)	72,23		
Conversión de alcohol isobutílico (%)	98,41		
Conversión de alcohol etílico (%)	63,62		

Se compararon los resultados obtenidos en el modelo con una configuración de destilación reactiva de aceite de fusel propuesta por Sánchez (2020). El flujo de alimentación de la configuración de Sánchez (2020) es 3,96 veces inferior a los flujos de alimentación procesados en este modelo, además de presentar diferentes composiciones de aceite de fusel. En la configuración obtenida por Sánchez (2020) el 15,36 % molar de las composiciones del destilado le corresponde al acetato de etilo, mientras que para el modelo obtenido en este trabajo el valor de acetato correspondiente

es de 19,45 % molar; composición que no se encuentra muy alejada de la reportada por Sánchez (2020).

En la corriente destilado se obtuvo un 40,16 % vol. de acetato de etilo. Para el caso del acetato de isoamilo, a partir de los flujos alimentados en la columna de destilación, es posible obtener por el fondo de la columna un 52,63 % vol. de acetato de isoamilo, luego de la etapa de lavado y separación del agua y del ácido, se obtiene una mezcla de ésteres compuesta por 65,66 % vol. de acetato de isoamilo y 11,05 % vol. de acetato de isobutilo. El modelo obtenido constituye una propuesta tecnológica para revalorizar aceite de fusel, con el que se esterifica directamente la mezcla de alcoholes y se obtienen mezclas de ésteres. En este sentido, si se desea obtener estos ésteres de forma más pura, se debe incluir una etapa posterior de purificación, lo que permitiría aumentar su valor comercial en la industria del bioetanol.

La conversión alcanzada para el ácido acético en el modelo (78,02 %) es 1,25 veces inferior a la reportada por Sánchez (2020). Para iguales condiciones de alimentación de la columna, la temperatura alcanzada en el destilado de esta tecnología (75,56 °C) es similar a la reportada por Sánchez (2020) (74,5 °C). En el caso de la temperatura de fondo reportada (138 °C) es 1,19 veces superior a la obtenida. Se consumen además, 14 040 m<sup>3</sup>/año de agua de enfriamiento, 82 280 kg/año de vapor y 5 328 kg/año de fuel oil.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Se caracterizaron y compararon las muestras de aceite de fusel de una destilería cubana con la composición reportada por otros autores y se obtuvo como similitud la presencia de alcohol isoamílico como componente mayoritario.
2. La composición de alcohol isoamílico obtenida en la muestra de aceite de fusel estudiada fue de un 35,04 % molar. El análisis estadístico permitió concluir que no existen diferencias significativas entre las tres muestras de aceite de fusel caracterizadas.
3. Con esta tecnología de destilación reactiva directa de aceite de fusel, se obtiene más del 45 % de productos de alto valor agregado (una mezcla compuesta por 65,66 % vol. de acetato de isoamilo y 11,05 % vol. de acetato de isobutilo producto de la etapa de lavado y separación del agua y del ácido; y 40,16 % vol. de acetato de etilo en el destilado) para la industria del bioetanol.

#### **REFERENCIAS**

- Castañeda, J.D., Optimización de una torre de destilación reactiva para la producción de etilenglicol con base a una función de carácter térmico., Semilleros: Formación Investigativa, Vol. 4, No.1, 2018, pp. 79-92. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7738>
- Cruz-Llerena, A., Pérez-Ones, O., Zumalacárregui-de Cárdenas, L., y Pérez-de los Ríos, J.L., 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, Vol. 54, No. 1, 2020, pp. 26-37. <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2020/07/Vol.-54-No.-1-2020-1.pdf>
- Devora-Rodríguez, Y., López-Bello, N., de Armas-Martínez, A.C, y Ley-Chong, N.,
-

- Diseño de la etapa de purificación para la obtención de acetato de isoamilo a partir del aceite de fusel., *Tecnología Química*, Vol. 37, No. 3, 2017, pp. 442-452. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445552858004>
- Fernández-Casiis, M., Cruz-Llerena, A., Pérez-Ones, O., Zumalacárregui-de Cárdenas, L., y Zumalacárregui-de Cárdenas, B., Obtención de productos de alto valor agregado, a partir de la separación del aceite fusel., *ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, Vol. 56, No. 2, 2022, pp. 43-55. <https://www.researchgate.net/publication/365476560>
- Ferreira, M.C., Meirelles, A.J.A., & Batista, E.A.C., Study of the fusel oil distillation process., *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, No. 6, 2013, pp. 2336-51. <https://doi.org/10.1021/ie300665z>
- Gallardo, I., Feyt, R., e Hidalgo, E., Obtención de acetato de isoamilo a partir de aceites fusel. Simulación del proceso., *Centro Azúcar*, Vol. 38, No. 2, 2011, pp. 44-54. [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/367](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/367)
- Gallardo, I., Martínez, Y., de-Armas, A. C., y López, N., Obtención de ésteres a partir de fracciones destiladas de aceite de fusel: parte I., *Centro Azúcar*, Vol. 49, No. 3, 2022, pp. 37-47. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612022000300037&lng=es&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612022000300037&lng=es&tlng=en)
- Güvenç, A., Kapucu, N., Kapucu, H., Aydoğan, Ö., & Mehmetoğlu, Ü., Enzymatic esterification of isoamyl alcohol obtained from fusel oil: Optimization by response surface methodology., *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 40, No. 4, 2007, pp. 778-785. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.06.010>
- Hidalgo, E., Aprovechamiento del aceite fusel para la obtención de productos químicos de alto valor agregado, Tesis de Diploma, Facultad de Química y Farmacia, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, 2010, Cuba. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/1797>
- Martínez, Y., Gallardo, I., López, N., y Morales, M.C., Obtención de alcoholes superiores a partir de fusel mediante proceso de destilación fraccionada., *Centro Azúcar*, Vol. 38, No. 4, 2011, pp. 8-14. [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/384](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/384)
- Mendoza, J.J., Sánchez, E., Segovia, J.G., Hernández, S., & Orjuela, A., Recovery of alcohol industry wastes: Revaluation of fusel oil through intensified processes., *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, Vol. 163, 2021, 108329. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108329>
- 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, 2011, pp. 1-14. <https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA%20UNIVERSITARIA%20DEL%20SDI/COLECCION%20DIGITAL%20DE%20NORMAS%20CUBANAS/2011/NC%20508%20a2011%2014p%20jco.pdf>
- Patidar, P., & Mahajani, S.M., Esterification of fusel oil using reactive distillation-Part I: Reaction kinetics., *Chemical Engineering Journal*, Vol 207, 2012, pp. 377-387. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.139>
- Sánchez, C.A., Producción de acetato de fusel por destilación reactiva., Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en
-

Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental en la Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2020.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77741>

Zheng, P.Y., Zhang, W.H., Chen, K.F., Wang, N.X., & An, Q.F., Pervaporation dehydration of fusel oil with sulfated polyelectrolyte complex hollow fiber membrane., Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 95, 2019, pp. 627-634. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.09.025>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Ing. Claudia Liz García Aleaga. Conceptualización, investigación, análisis formal, software, redacción - revisión y edición.
  - M.Sc. Arletis Cruz Llerena. Conceptualización, investigación, análisis formal, software, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Osney Pérez Ones. Supervisión, conceptualización, investigación, análisis formal, software, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas. Supervisión, conceptualización, investigación, análisis formal, software, redacción - revisión y edición.
-