

Potencialidades del aceite fusel. Tecnologías para su revalorización

Fusel oil potential. Technologies for its revaluation

Claudia Liz García Aleaga ¹, Arletis Cruz Llerena ^{1,2}, Osney Pérez Ones ^{2,*}, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas ², Marcela Fernández Casiis ¹.

¹ Departamento de Bioingeniería; Dirección de Biotecnología; Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca) Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

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.

* Correspondence: osney@quimica.cujae.edu.cu

DOI: 10.70373/RB/2024.09.04.5

Resumen

El aceite fusel como subproducto obtenido a partir de la destilación y posterior rectificación del proceso de producción de bioetanol, constituye una fuente de bajo costo, rico en compuestos de alto valor comercial. Se encuentra constituido principalmente por una mezcla de alcoholes superiores, presentando al alcohol isoamílico como componente mayoritario. La separación de sus principales alcoholes mediante destilación y su posterior esterificación con un ácido carboxílico, permite la generación de productos de alto valor agregado con gran aplicación en industrias como la farmacéutica y alimentaria. Actualmente el aceite fusel no es aprovechado al máximo y se pierde en cantidades significativas. Disponer de métodos que permitan su aprovechamiento es esencial para valorizar este compuesto. En este sentido, en la literatura diversos autores plantean el uso de tecnologías para la recuperación, tanto de sus principales alcoholes, como para la obtención de los ésteres derivados. En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica acerca de los principales aspectos relacionados con el aceite fusel, su composición, aplicaciones y tecnologías aplicadas para su revalorización. Entre las tecnologías reportadas la mayoría están encaminadas a la síntesis de ésteres y se destaca la destilación reactiva como una opción prometedora.

Palabras clave: aceite fusel, generación de productos, tecnologías para su revalorización

Abstract

Fusel oil, a by-product of the distillation and subsequent rectification of the bioethanol production process, is a low-cost source, rich in compounds of high commercial value. It is mainly composed of a mixture of higher alcohols, with isoamyl alcohol as the main component. The separation of its main alcohols by distillation and their subsequent esterification with a carboxylic acid allows the production of high value-added products with wide application in industries such as pharmaceuticals and food. Currently, fusel oil is underutilized and significant amounts are lost. Having methods that allow its use is essential to valorize this compound. In this sense, in the literature various authors propose the use of technologies for the recovery of both its main alcohols and for obtaining the derived esters. This paper presents a review of the main aspects related to fusel oil, its composition, applications and applied technologies for its revalorization. Among the reported technologies, most are aimed at the synthesis of esters and reactive distillation stands out as a promising option.

Keywords

Fusel oil, product generation, technologies for its revaluation

Introducción

La producción de bioetanol ha crecido en los últimos años constituyendo una de las actividades más importantes en el desarrollo del sector azucarero, no solo por el valor de su producción sino también por los innumerables usos y aplicaciones que poseen subproductos derivados del mismo.¹ Durante la etapa de rectificación en el proceso de producción de bioetanol se genera un subproducto como impureza de este proceso denominado aceite fusel.²

El aprovechamiento del fusel como subproducto tiene un interesante potencial económico en países con volúmenes de producción de etanol elevados. Actualmente el aceite fusel se quema en las calderas de los centrales o se comercializa para su utilización como solvente en algunas aplicaciones industriales, pero constituye una fuente renovable de energía de bajo costo para generar productos químicos de alto valor comercial.³

Mediante una deshidratación y posterior proceso de destilación, es posible obtener sus principales componentes, dentro de los que se pueden mencionar los alcoholes isoamílicos, isobutílico y n-propílico como componentes mayoritarios. A partir de las reacciones de esterificación de estos compuestos, también es posible obtener ésteres de gran valor agregado como el acetato de isoamilo, isobutilo y el acetato de etilo, con una amplia gama de usos en industrias como la farmacéutica y alimentaria.^{2,3}

La elaboración de productos químicos a partir de la reutilización de subproductos y residuales se está convirtiendo en un área atractiva de inversión para las industrias en el marco de una economía más

sostenible y menos perjudicial para el medio ambiente. Conocer las características del fusel, sus propiedades, aplicaciones y vías de aprovechamiento mediante el empleo de tecnologías para su transformación en productos de alto valor agregado, es esencial para valorizar este compuesto.

Aceite fusel. Generalidades

El nombre de aceite fusel proviene del alemán fusel que significa licor de mala calidad.⁴ Se define como una mezcla de alcoholes superiores, congéneres de la fermentación alcohólica, favoreciéndose su formación cuando esta última se produce a altas temperaturas, con pH bajos y cuando la actividad de la levadura está limitada por el contenido de nitrógeno.² Lo componen diversos alcoholes como el etanol y otros de orden superior, como el alcohol isoamílico (A. isoamílico), 1-propanol, 2-propanol, butanol (varios isómeros), furfural y otros compuestos en menor proporción, además de agua.⁵

Es posible separar los componentes del fusel mediante la destilación en diferentes fracciones según su punto de ebullición. El intervalo en que estas se encuentran contenidas está aproximadamente entre los 80 y 130 °C a presión atmosférica.⁶ Luego por un proceso de esterificación con un ácido carboxílico es posible obtener los ésteres de estas fracciones, compuestos a los que se les confiere un alto valor agregado en diferentes industrias.

Según lo expresado por Urresta,⁷ el aceite fusel se puede derivar a partir del bioetanol de primera generación (azúcar o almidón) y también de segunda generación (biomasa lignocelulósica). Se encuentra presente en la sidra, aguamiel, cerveza, vino y bebidas espirituosas. En algunas bebidas se espera alcanzar concentraciones relativamente altas de los alcoholes del fusel como parte del perfil del sabor, por ejemplo, whisky, siwucha, la cerveza tradicional inglesa y sidras. En otras bebidas, por ejemplo, vodka y cervezas doradas, la presencia de los alcoholes del fusel se considera una imperfección.²

De acuerdo con la información disponible en la literatura, los rendimientos de aceite fusel obtenidos en planta comercial pueden variar entre 1-11 L por cada 1 000 L de alcohol etílico producido dependiendo del sustrato utilizado, las sustancias nitrogenadas añadidas y las condiciones de fermentación y destilación.⁸⁻¹⁰

Composición química del aceite fusel

La composición de los aceites fusel varía de una destilería a otra independientemente de que se emplee la misma materia prima. Los factores que afectan su composición son: el tipo de levadura o enzima, las condiciones y el medio bajo los cuales se lleva a cabo la fermentación (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.^{6,11,12}

Las propiedades fisicoquímicas del aceite fusel no se encuentran definidas en la literatura ya que estas van a depender de la composición del mismo. Es probable, que las propiedades sean muy cercanas a las del A. isoamílico, ya que generalmente es el compuesto mayoritario del aceite de fusel.³ En la Tabla 1 se presenta una recopilación de diferentes composiciones de aceite fusel reportada en la literatura proveniente de destilerías de cinco países.

Tabla 1. Composición del aceite de fusel reportada en el mundo

Componentes	Composición (% másico)				
	India ¹³	Brasil ¹⁴	Colombia ¹⁵	China ¹⁶	Cuba ¹⁷
1-propanol	3,5	0,94	nr	nr	2,56
Isobutanol	9,5	6,71	1,3	15	6,30
1-butanol	nr	0,57	1,4	nr	0,20
A. isoamílico	74,6	55,70	70,4	51	59,90
2-metil-1-butanol	nr	12,07	nr	nr	nr
Isopropanol	nr	nr	nr	13	nr
1-pentanol	nr	0,03	nr	nr	2,15
Agua	nr	15,31	14,3	10	14,14
Metanol	nr	0,02	nr	nr	nr
Etanol	12,4	8,66	12,6	10	14,75

Como se puede observar en la Tabla 1 las composiciones de aceite de fusel son muy diversas, tanto en cantidad como en compuestos presentes. Como punto en común todas las muestras reportadas presentan el alcohol isoamílico como componente mayoritario. En el caso de la destilería de Brasil se destaca la presencia de 2-metil-1-butanol (alcohol amílico activo) y algunas trazas de metanol y para el caso de la destilería China hay presencia de isopropanol. En cuanto a la composición de aceite fusel reportada para la destilería India se observa la ausencia de agua, ya que esta muestra empleada por los autores representa una composición típica de fusel en base libre de este compuesto. Esta variedad en la composición del fusel puede atribuirse a los factores antes mencionados.

Aplicaciones del aceite fusel

El aceite fusel a pesar de constituir un desecho industrial producto de la destilación alcohólica, posee en su composición una amplia gama de alcoholes superiores que lo posicionan como un producto versátil para diversos sectores industriales.

En la industria química los alcoholes provenientes del fusel, cada uno por separado, exhiben valiosas propiedades químicas que se traducen en aplicaciones industriales. El A. isoamílico como principal constituyente, entre sus usos es empleado como disolvente industrial para una variedad de resinas y materiales aceitosos, mientras que los alcoholes butílico y propílico encuentran su uso principal como disolventes industriales, especialmente para lacas y tintas de impresión.¹⁰ Dentro de las principales aplicaciones de los alcoholes que lo componen, su principal uso se encuentra en la síntesis de ésteres. Estos compuestos poseen un valor agregado superior y son muy cotizados actualmente.

Los ésteres obtenidos a partir de los alcoholes del aceite de fusel se pueden utilizar industrialmente como disolventes, extractantes, agentes aromatizantes, medicinales y plastificantes. Al igual que los alcoholes, son importantes componentes de sabor y fragancia en las industrias de alimentos, bebidas, cosmética y farmacéutica.¹⁸ Los acetatos de etilo, isobutilo, amilo e isoamilo se utilizan frecuentemente como componentes en aromatizantes y los acetatos de isopropilo y metilo son aditivos importantes en perfumes. El acetato de isoamilo presenta un importante uso en la industria de bebidas alcohólicas ya que es el único éster capaz de comunicar al vino su olor característico a plátano.^{18,19}

En la literatura varias investigaciones están encaminadas a potenciar su uso para la producción de combustibles renovables y es que se ha comprobado que el valor energético del fusel es cercano al de los otros tipos de combustibles, su índice de octanaje y densidad lo convierten en candidato a combustible alternativo para los motores de combustión.²⁰ Es por ello que en variedad de estudios realizados se promueve el aceite fusel como bioaditivo para combustibles convencionales como el diésel y la gasolina.²⁰⁻²⁵

Otras de las aplicaciones que se le atribuyen al aceite fusel es su empleo en la desnaturalización de alcohol o para suprimir la espuma durante la fabricación de azúcar.⁶ También se encuentra reportado su aplicación en la industria agrícola como herbicida,^{26,27} aunque son pocas las investigaciones que abordan sobre este tema, en un estudio realizado por Azania et al.²⁶ se demostró el potencial del aceite fusel contra las malezas, ya que la aplicación directamente al suelo fue eficiente para erradicar los retoños y no perjudicó el desarrollo de las plantas en sucesión. Es importante señalar que puede ser utilizado en conjunto con formulaciones de herbicidas tradicionales para erradicar diferentes especies de maleza.²⁸

Dada la creciente demanda de productos sostenibles, la utilización del aceite fusel para la producción de ésteres puede tomar mayor peso en sus aplicaciones. Los ésteres derivados del aceite fusel son compuestos versátiles que se pueden emplear para diversas aplicaciones industriales, desde fragancias y sabores hasta para producción de productos farmacéuticos. Esto no solo representa una oportunidad

para maximizar el aprovechamiento de este recurso, sino que también contribuye al desarrollo sostenible en múltiples sectores industriales.

Deshidratación del aceite fusel

La presencia de agua en el aceite fusel puede afectar negativamente a la destilación y a la pureza de los productos finales, por lo que es recomendable realizar previamente una deshidratación. Con este proceso se facilita la eliminación de la humedad y otras impurezas, permitiendo obtener alcoholes de mayor concentración y pureza.

Entre las técnicas de deshidratación reportadas en la literatura se encuentra el empleo de soluciones saturadas de sal como el sulfato de sodio (Na_2SO_4), la adición de hexano u óxidos como el de calcio (CaO) para separar las mezclas de fusel.^{7,29}

La adición de hexano al fusel para deshidratarlo se fundamenta en su efecto antisolvente. Al adicionarlo cambia la polaridad de la mezcla de fusel volviéndola más apolar. Debido a esto el agua se separa quedando una solución heterogénea de dos fases: una fase liviana que contiene todo el hexano, la mayoría o todos los alcoholes y nada de agua prácticamente y la otra fase más pesada compuesta fundamentalmente por agua.^{29,30} Es importante señalar que una vez finalizada la deshidratación con la adición de hexano, este forma parte de la solución deshidratada y es necesario la utilización de una segunda operación unitaria que permita su separación del fusel deshidratado.

El proceso de deshidratación con el óxido de calcio a pesar de estar muy establecido en las industrias debido a su bajo costo y no toxicidad, presenta inconvenientes como el consumo elevado de cal, la dificultad de su recuperación, la necesidad de mezcla mecánica y de filtración debido a las sustancias sólidas.³⁰

La deshidratación con sulfato de sodio es una de las técnicas más reportadas y empleadas. Constituye un método simple y efectivo para eliminar el agua presente en el aceite fusel ya que es un compuesto higroscópico que tiene la capacidad de absorber el agua. Solo es eficaz por debajo de los aproximadamente 30 °C, pero se puede usar en gran variedad de materiales ya que es bastante inerte químicamente.^{2,3,30}

En un estudio realizado por Berguero y Odetti³⁰ los autores se proponen obtener un método para la deshidratación del aceite fusel en el que comparan estas tres técnicas de deshidratación mencionadas (deshidratación con CaO , Na_2SO_4 y hexano) para tres muestras de aceite fusel de igual proporción (100 mL). Se adicionaron 3,3 g de CaO , 40,7 g de Na_2SO_4 y 50 mL de hexano saturado en agua respectivamente para cada muestra. Como resultados con la deshidratación con CaO se logró una disminución del contenido de agua inicial desde un 14 hasta un 10 %, con la deshidratación con

Na_2SO_4 se logró una reducción desde un 14 hasta el 8 % y con la adición de hexano se alcanzó una reducción desde un 14 hasta un 7 %.

Por otra parte, Hidalgo²⁹ en su investigación llevó a cabo la deshidratación de fusel en dos momentos: primeramente se mezcló fusel con una solución saturada de cloruro de sodio (NaCl) en dos etapas para separar la fase orgánica de la acuosa y posteriormente se eliminaron las trazas de agua adicionando 0,5 gramos de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) por centímetro cúbico de fusel. Como resultados se redujo el contenido de agua del fusel crudo desde un 17,24 hasta un 4 % empleando cloruro de sodio y posteriormente con Na_2SO_4 se disminuyeron los restos de agua contenida hasta un 2 %, lo que trajo consigo un aumento del grado alcohólico de la muestra (desde 85,4 °GL hasta 91,1 °GL), esencial para que exista una buena separación de los componentes en el proceso de destilación.

Recientemente Mattos et al.³¹ en su estudio, deshidrataron aceite de fusel en un horno de mufla utilizando sulfato de sodio anhidro pre-tratado a 250 °C durante 4 h. Como resultado se obtuvo que la concentración de agua se redujo de 11,6 hasta un 2 % p/p, este valor fue cuantificado mediante el titulador automático Karl Fischer (Koheler Model AKF 5000—Holtsville, NY, EE. UU).

Otro de los métodos reportados para la deshidratación de fusel lo constituye la pervaporación con membranas.^{16,32-34} En el estudio realizado por Zheng et al.¹⁶ se demostró que, mediante la pervaporación con una membrana de fibra hueca de complejo polielectrolítico sulfatado se puede aumentar el contenido orgánico en la alimentación del 90-99 % p/p con alta eficiencia y excelente selectividad del agua (contenido de agua en el permeado siempre por encima del 98,5 % p/p). De igual manera Chen et al.³² aplican la pervaporación para procesos de deshidratación de aceites fusel con una membrana de fibra hueca híbrida de sílice. El estudio permitió retener un contenido de agua en el permeado de 99 % p/p a 60 °C. Con el empleo de la membrana es posible separar completamente el agua presente, sin embargo se requiere de más tiempo de separación.²⁹

Destilación del aceite fusel

La destilación del aceite fusel resulta compleja debido a la cantidad de componentes presentes en la mezcla y a la presencia de varios azeótropos. Para obtener los principales alcoholes presentes en el aceite fusel se emplea la destilación fraccionada, mediante la cual aproximadamente se destila el 95 % de fusel crudo.²

Según Kujawski et al.³³ para una recuperación efectiva de los alcoholes $\text{C}_2\text{-C}_4$ se requiere la deshidratación del aceite de fusel crudo antes de la separación final. En su investigación se sometieron

a una destilación fraccionada discontinua: aceite fusel crudo y aceite fusel deshidratado. La baja cantidad de agua presente en el aceite fusel deshidratado permitió obtener sólo tres fracciones principales: la primera compuesta por etanol puro, la segunda por 2-metil-1-propanol con un 99,65 % másico de pureza y en la tercera fracción 2- metil-1 butanol (alcohol amílico activo) y 3-metil-1-butanol (A. isoamílico) con un 99,95 % másico de pureza; además las fracciones precursoras e intermedias constituyeron aproximadamente el 4,9 % másico; por lo que resultó ser más favorable.

Actualmente varios autores se están apoyando en el uso de la simulación de procesos para modelar sistemas intensificados para la separación de los alcoholes fusel más sostenibles. Tal es el caso de la investigación realizada por Mendoza-Pedroza et al.¹⁵ donde proponen un sistema de destilación para la obtención de A. isoamílico. Los autores llevaron a cabo una comparación entre el proceso intensificado y el esquema convencional y los procesos fueron modelados mediante el Aspen Plus. De igual forma Ferreira et al.¹⁴ en su investigación, tuvieron como objetivo evaluar el proceso de destilación industrial de aceite fusel para la obtención de A. isoamílico utilizando el simulador Aspen Plus, analizando tres configuraciones. Entre los resultados obtenidos los autores expresan que no es posible obtener solamente A. isoamílico en la corriente de cola mediante procesos convencionales de destilación debido a la presencia del alcohol amílico activo en la composición de la muestra de fusel. Se obtiene un producto constituido por una mezcla de ambos isómeros, debido a que la diferencia entre su punto de ebullición (solo 2,5 °C) dificulta su separación. Además, todos los procesos propuestos fueron capaces de recuperar A. isoamílico (99,53 %) siendo el mejor diseño la configuración C, con un menor costo total.

Esterificación de alcoholes

El aceite fusel presenta potencialidad como fuente de materia prima para la obtención de una gran variedad de ésteres, en dependencia del donante ácido utilizado.³⁵ Para llevar a cabo estas reacciones de esterificación con los alcoholes fusel, en la literatura se encuentra reportado el uso de ácidos como el acético,^{36,37} el propiónico,^{37,38} el butírico,^{37,39,40} el ácido láurico,^{35,41} el ácido oleico⁴²⁻⁴⁴ y el ácido caprílico.⁴⁵ Küçücük y Ceylan³⁷ en su estudio, presentan algunos datos sobre la esterificación no catalizada de aceite de fusel con ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico. Como resultados se encontró que las velocidades de formación de ésteres de ácido butírico eran mayores que las de los ésteres de ácido acético y propiónico, el rendimiento de producción máximo estimado de los ésteres mixtos de ácido acético fue de alrededor del 19 %, de los ésteres de ácido propiónico del 24 % y de los ésteres de ácido butírico del 35 %.

Promover la esterificación con el uso de un catalizador adecuado puede aumentar considerablemente las velocidades de reacción y la conversión. Para el caso de la esterificación de los alcoholes fusel,

algunos autores^{5,42,46,47} en sus investigaciones han empleado catalizadores ácidos homogéneos como el ácido sulfúrico. Sin embargo, estos procesos de esterificación con ácidos fuertes a menudo ocasionan la formación de productos indeseables que deben eliminarse mediante una neutralización o purificación posterior y en ocasiones consumen mucha energía,^{35,38} además de la pérdida del catalizador, corrosión y problemas medioambientales.⁴⁸

Con motivo de superar los inconvenientes que pueden ocasionar el uso de catalizadores ácidos homogéneos, en la literatura varias investigaciones emplean la catálisis heterogénea para la esterificación de los alcoholes fusel. En este sentido, autores como Osorio-Viana et al.³⁶ hacen uso de la resina de intercambio Amberlite IR-120 para la síntesis de acetato de isoamilo. Leyva et al.³⁸ en su estudio de la cinética de la reacción en fase líquida del ácido propiónico y el A. isoamílico para la obtención de propionato de isoamilo, utilizan la resina de intercambio iónico Amberlyst 70.

Otros autores se apoyan en la catálisis enzimática; tal es el caso de Wang et al.⁴⁹ los cuales para un nuevo proceso de producción de biodiesel mediante la síntesis de alcohol fusel y ésteres de ácidos grasos, emplean lipasa inmovilizada como catalizador, permitiendo que el proceso fuera respetuoso con el medio ambiente en comparación con los catalizadores químicos utilizados habitualmente. Autores como Dörmö et al.⁴³ también hacen uso de la esterificación enzimática para la obtención de un biolubricante ambientalmente seguro a partir del aceite fusel y ácido oleico; para ello se empleó la enzima lipasa Novozym 435 inmovilizada como biocatalizador. En la investigación desarrollada por Güvenç et al.¹⁸ también se emplea esta enzima como catalizador para la esterificación de A. isoamílico obtenido del fusel con ácido acético para la producción de acetato de isoamilo.

Recientemente, en un estudio realizado por Dias et al.⁵⁰ se empleó un proceso de producción de acetato de isoamilo a partir de aceite de fusel mediante catálisis enzimática en CO₂ supercrítico como medio de reacción. Este proceso demostró ser una alternativa viable para aprovechar el fusel, reduciendo los residuos generados en las plantas industriales de etanol.

También se encuentra reportado el uso de zeolitas como catalizadores sólidos ácidos. En el estudio realizado por Urresta⁷ se emplean las zeolitas: MFI y ZSM-5 con relación Si/Al 28 y 1000 para obtener alquenos a partir del fusel (buteno o isopenteno) para usarlos como biolubricantes.

Según lo expresado por Sánchez et al.⁸ existen dos alternativas principales para la esterificación de alcoholes fusel: el proceso directo y el proceso indirecto. El proceso indirecto consiste en la separación individual de los alcoholes provenientes del fusel seguido de su posterior esterificación con un ácido carboxílico; y la trayectoria directa consiste en la reacción simultánea de toda la mezcla de alcoholes fusel con un ácido carboxílico.

Los datos de la literatura sobre los procesos de esterificación directa del aceite fusel son muy limitados. Son pocas las investigaciones encaminadas a este tipo de proceso y es que, cuando se hace reaccionar directamente la mezcla de aceite fusel, es necesario considerar numerosas reacciones químicas simultáneas de esterificación y transesterificación lo que resulta más complejo.

Los primeros autores en valorar esta alternativa fueron Patidar y Mahajani.^{13,51} En su estudio expresaron la posibilidad de que la destilación reactiva, que era un proceso intensificado muy empleado para la esterificación de alcoholes individuales,^{4,52-54} se pudiera emplear como una opción prometedora para la esterificación simultánea de todos los alcoholes presentes en el aceite fusel.

Con este trabajo se investigó experimentalmente la cinética de reacción para todas las reacciones de esterificaciones y transesterificación de diferentes constituyentes del aceite de fusel (etanol, n-propanol, isobutanol y A. isoamílico) con ácido acético, en presencia de una resina de intercambio catiónico, Amberlyst-15. El proceso de destilación reactiva se llevó a cabo con ayuda del simulador Aspen Plus empleando el modelo termodinámico UNIQUAC-HOC. Los autores demostraron que con la aplicación de la destilación reactiva es posible sobrepasar los límites de una destilación convencional logrando la separación de azeótropos⁵⁵ y obtener los ésteres de todos los alcoholes con un 99,5 % de pureza.

Por otra parte en el estudio realizado por Sánchez et al.⁸ se encuentran reportados los datos de equilibrio líquido-vapor para las mezclas binarias de acetato de isobutilo (iBuAC) + acetato de isoamilo (iAmAC) y acetato de isobutilo (iBuAC) + acetato de etilo (EtAc) a diferentes presiones (50, 100 y 150 kPa). Los autores concluyen que los parámetros binarios generados con esta investigación para las ecuaciones no aleatorias de dos líquidos (NRTL) y cuasiquímicas universales (UNIQUAC), se pueden integrar en un modelo termodinámico más complejo para estudiar la esterificación directa del aceite fusel. Los resultados también indican que en ausencia de datos de equilibrio para mezclas de acetatos formados en la esterificación directa del aceite de fusel podrían predecirse razonablemente utilizando el modelo predictivo de coeficientes de actividad de grupos funcionales cuasiquímicos universales modificados por Dortmund (UNIFAC-DMD) o incluso el modelo Ideal.

Otro de los estudios reportados donde se emplea el proceso directo es en la investigación realizada por Bôas et al.⁴⁴ donde los autores pretenden sintetizar ésteres biolubricantes en un reactor de lecho compacto mediante esterificación directa de aceite fusel.

Sin embargo, la esterificación indirecta de aceite fusel es más conocida en la literatura y es que la esterificación de cada alcohol por separado, permite utilizar el conocimiento sobre cada esterificación en particular y puede estudiarse de forma independiente.⁸ La esterificación de A. isoamílico con ácido

acético para obtener acetato de isoamilo es de particular interés, la mayoría de los informes bibliográficos se centran en obtener este compuesto a partir del aceite fusel por ser el A. isoamílico su componente mayoritario.^{2,3,5,18} En un estudio realizado por Fátima-Bi et al.⁴⁶ se determinaron las condiciones óptimas para la reacción de esterificación del A. isoamílico obtenido de una muestra de fusel de Pakistán, empleando el ácido sulfúrico como catalizador.

En general los procesos para la obtención de ésteres a partir de la esterificación indirecta de los alcoholes presentes en el aceite fusel constan de cuatro etapas fundamentales: deshidratación del aceite fusel, destilación para obtener sus principales alcoholes, esterificación y por último la purificación de los ésteres obtenidos por destilación.

Para separar y eliminar impurezas de los ésteres producidos durante la síntesis química y garantizar un producto final de alta calidad y pureza, posteriormente del proceso de esterificación se realiza una etapa de purificación de los ésteres obtenidos.

Gallardo et al.⁵ en su investigación proponen un método de purificación para los ésteres obtenidos a partir de los alcoholes presentes en el aceite fusel. La purificación consta de una serie de lavados seguidos con agua, bicarbonato de sodio y con una solución saturada de cloruro de sodio, de un secado y posterior destilación como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Esquema del proceso de purificación para la obtención de ésteres a partir del fusel⁵

En la investigación desarrollada por Dévora-Rodríguez et al.¹⁹ se propone un diseño de la etapa de purificación para la obtención de acetato de isoamilo a partir del fusel; el proceso fue llevado a cabo mediante la simulación de procesos con ayuda del Hysys.

Por otra parte, en la investigación realizada por Bôas et al.⁴⁴ se propone un método para purificar oleato de isoamilo obtenido de la reacción de esterificación de aceite fusel y ácido oleico. El método consistió en separar el biocatalizador mediante filtración en un embudo Buchner revestido con papel de filtro (Whatman No. 41). Luego, se transfirió a un embudo de goteo y se incubó con etanol anhidro a temperatura ambiente para eliminar el alcohol que no reaccionó. Posteriormente, el ácido oleico se eliminó mediante neutralización con una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 5 % (p/v) y se añadió cloruro de sodio (NaCl) para ayudar a separar las fases orgánica y acuosa. La fase orgánica se destiló para eliminar cualquier rastro de aceite de fusel y ácido oleico, y se analizó la pureza y las propiedades biolubricantes de la muestra purificada.

La obtención de ésteres a partir del fusel pone de manifiesto su alto potencial como subproducto renovable de igual forma que todos los retos que trae asociado su procesamiento. Con la literatura abordada se evidencia que la esterificación puede llevarse a cabo empleando diferentes ácidos carboxílicos, cada uno con sus propias características y rendimientos. Es importante destacar que, si bien los catalizadores ácidos homogéneos tradicionales como el ácido sulfúrico son efectivos, presentan desventajas significativas como la formación de subproductos indeseables que puedan traer problemas medioambientales asociados. En este contexto la catálisis heterogénea y enzimática surgen como alternativas para mitigar estos inconvenientes. La utilización de resinas de intercambio y lipasas inmovilizadas han demostrado ser efectivas, ofreciendo procesos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

El empleo de tecnologías más avanzadas como la destilación reactiva representa un enfoque prometedor para mejorar tanto la viabilidad económica como ambiental en la síntesis de ésteres. Se evidencia también que tanto la esterificación directa como indirecta tienen sus ventajas y limitaciones. La esterificación indirecta resulta un proceso más estudiado y menos complejo ya que facilita un control más preciso sobre las condiciones reactivas, al permitir el tratamiento individual de cada alcohol. Sin embargo, existen limitaciones en la aplicación práctica del proceso directo, lo que requiere de más investigaciones para comprender mejor los procesos involucrados, pues la separación de todos los ésteres formados podría resultar más compleja en la práctica en comparación con lo que se obtiene a partir del uso de herramientas de simulación.

Aplicación de tecnologías de revalorización de fusel

Varios son los autores que reportan en la literatura tecnologías para su valorización, ya sea con la finalidad de obtener sus principales componentes o ésteres de gran utilidad y valor comercial para la industria del bioetanol. En muchas de las tecnologías propuestas los autores se apoyan en el uso de la simulación de procesos para cumplimentar los objetivos de sus investigaciones. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las tecnologías reportadas para la valorización de este compuesto.

Tabla 2. Tecnologías aplicadas para la valorización del fusel

Formas de revalorización	Tecnología de revalorización	Resultados	Fuente
Obtención de alcohol isoamílico mediante Aspen Plus	Separación de alcoholes mediante destilación y posterior purificación	792 L/d de alcohol isoamílico de 99,7 % de pureza	Montoya et al. ⁵⁶
Obtención de alcohol isoamílico, isobutanol y 1-propanol mediante Aspen Hysys v10.0		73,44 m ³ /año de alcohol isoamílico, 41,76 m ³ /año de isobutanol y 61,20 m ³ /año de 1-propanol	Fernández-Casiis et al. ⁵⁷
Obtención de alcohol isoamílico mediante Aspen Hysys v3.2	Deshidratación de fusel y posterior destilación	110,3 kg/h alcohol isoamílico de 99,9 % pureza	Martínez et al. ²
Recuperación de alcohol isoamílico mediante Aspen Plus	Separación de alcoholes evaluando tres configuraciones (A: una columna de destilación y un decantador; B: dos columnas de destilación y un decantador; C: una columna de destilación, una columna de extracción y un decantador)	99,53 % de recuperación de alcohol isoamílico	Ferreira et al. ¹⁴
Recuperación de alcohol amílico, butílico, propílico y etílico mediante Hysys	Proceso de destilación	72,08 kg/h de alcohol amílico, 8,76 kg/h de butanol, 1,37 kg/h de propanol y 11,39 kg/h de	Khaled y Gasmelseed ⁵⁸

		etanol por el fondo de la columna y 6,17 kg/h de etanol por el tope	
Obtención de acetato de isoamilo mediante el Aspen Hysys v3.1		626 kg/h de 99,9 % de pureza	Gallardo et al. ³
Obtención de acetato de isoamilo experimentalmente	Deshidratación, separación de alcoholes mediante destilación, esterificación con ácido acético y purificación de ésteres	El mayor rendimiento de acetato se alcanzó en el experimento IV obteniéndose un 98,01 % másico	De-Armas et al. ⁵⁹
Obtención de acetato de isoamilo mediante el Aspen Hysys v3.2		140, kg/h de acetato de isoamilo puro	Hidalgo ²⁹
Obtención de acetato de isoamilo mediante Aspen Hysys v3.2	Diseño de la etapa de purificación (mezclador, separador, columna de destilación)	94,26 kg/h de acetato de isoamilo	Dévora-Rodríguez et al. ¹⁹
Obtención de acetato de n-butilo a partir del alcohol n-butilo obtenido previamente del fusel Aspen Plus	Destilación reactiva empleando resina de intercambio (Purolite C-100) como catalizador	99 % molar de acetato de n-butilo, disminución de 89 % consumo energético en comparación al proceso convencional (5 047,9 kW)	Altomare et al. ⁴
Obtención de ésteres a partir de la esterificación directa de los alcoholes fusel (etanol, n-propanol, isobutanol y alcohol isoamílico) con Aspen Plus	Destilación reactiva en presencia de resina Amberlyst 15	Los ésteres de todos los alcoholes presentes en el proceso tienen una pureza cada uno de ellos de un 99,5 %.	Patidar y Mahajani ^{13,51}
Obtención de una mezcla de ésteres a	Destilación reactiva	65,66 % vol. de acetato de isoamilo, 11,05 % vol. de	García et al. ¹⁷

partir de la esterificación directa de los alcoholes fusel con Aspen Hysys v10.0		acetato de isobutilo y en el destilado 40,16 % vol. de acetato de etilo	
--	--	---	--

La simulación de procesos resultó ser la vía mediante la cual la mayoría de los autores desarrollan las tecnologías de revalorización de fusel. Para la evaluación de su fraccionamiento y esterificación se han empleado diversos simuladores como Aspen Plus y Aspen Hysys. Resultaría oportuno que se lleve a cabo industrialmente alguna de estas tecnologías con el fin de potenciar el uso de este residuo. Es importante señalar que las tecnologías que emplean la catálisis homogénea con el uso del ácido sulfúrico y esterificación con ácido acético deberían considerar en su estudio el tratamiento de residuales que se generan y trazar una estrategia para evaluar el efecto medioambiental.

Los residuales de estas tecnologías resultan agresivos al medio ambiente por su composición rica en ácidos. En este sentido podrían tratarse neutralizando el ácido, para ello se puede agregar una base controlada como el hidróxido de sodio (NaOH) o carbonato de calcio (CaCO₃), que reaccione con el ácido y elevar el pH hasta un valor deseado. Otra alternativa para mitigar el efecto ambiental negativo de estas tecnologías es la recuperación del ácido acético y su reutilización en el proceso, de esta forma se disminuye el consumo de ácido y se cierra el ciclo de producción.

Conclusiones

El aceite fusel presenta en su composición coproductos de gran utilidad para la industria del bioetanol. Su composición es diversa en distintas regiones del mundo tanto en cantidad como en compuestos presentes. El alcohol isoamílico constituye su componente mayoritario y punto en común dentro de sus composiciones.

Se reportan diferentes tecnologías de interés para la revalorización del fusel, ya sea para la obtención de sus principales alcoholes o ésteres a partir de ellos. El mayor peso de sus aplicaciones radica en la síntesis de ésteres de gran valor agregado para la industria alimenticia, la industria de los cosméticos, farmacéutica, entre otras áreas. La tecnología más empleada para obtener ésteres se basa en el proceso indirecto (deshidratación del fusel, destilación, esterificación y posterior purificación), y es que este proceso resulta más estudiado y menos complejo ya que facilita un control más preciso sobre las condiciones reactivas, al permitir el tratamiento individual de cada alcohol.

La destilación reactiva constituye un método intensificado y prometedor tanto para sintetizar ésteres de forma individual como de la mezcla de alcoholes fusel de manera directa. Sin embargo existen

limitaciones en la aplicación práctica del proceso directo, lo que requiere más investigaciones y de un exhaustivo estudio para llevar a cabo las condiciones adecuadas para su implementación, y es que se deben considerar numerosas reacciones químicas simultáneas de esterificación y transesterificación entre los constituyentes del fusel, además de que la separación de todos los ésteres formados podría resultar más compleja en la práctica en comparación con lo que se obtiene en el simulador.

La simulación de procesos constituye una herramienta potente para la evaluación de tecnologías de revalorización del fusel. Diversos autores en sus investigaciones emplean esta herramienta para modelar virtualmente los procesos de recuperación de productos de alto valor agregado.

Contribución de autores:

Todos los autores contribuyeron en la lectura, conceptualización, revisión y edición del manuscrito.

Financiación:

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio y Ambiente (CITMA) de la República de Cuba.

Conflictos de Intereses:

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados

Referencias

1. Sánchez A, De-Armas AC. Potencialidades del aceite de fusel como combustible y materia prima para la obtención de ésteres. Centro Azúcar. 2022;49(4):114-24.
2. Martínez Y, Gallardo I, López N, Morales MC. Obtención de alcoholes superiores a partir de fusel mediante proceso de destilación fraccionada. Centro Azúcar. 2011;38(4):8-14.
3. Gallardo I, Feyt R, Hidalgo E. Obtención de acetato de isoamilo a partir de aceites fusel. Simulación del proceso. Centro Azúcar. 2011;38(2):44-54.
4. Altomare V, Labrador H, Rodríguez P, Morales V, Fernández C. Síntesis de acetato de n-butilo mediante un sistema de destilación reactiva a partir de un desecho agroindustrial. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 2012;35(3):261-9
5. Gallardo I, Martínez Y, De-Armas AC, López N. Obtención de ésteres a partir de fracciones destiladas de aceite de fusel: parte I. Centro Azúcar. 2022;49(3):37-47.

6. Ramos-Miranda FE, Cuellar MA, Saez-Jover D. El desarrollo tecnológico y social de la industria azucarera.El caso de las biorefinerías. *Universidad y Sociedad*. 2018;10(5):295-300.
7. Urresta JD. Deshidratación de los alcoholes presentes en el aceite fusel y su conversión en alquenos empleando una zeolita tipo HZSM-5. *Ingeniería y competitividad*. 2014;16(2):79-90.
8. Sánchez CA, Sánchez OA, Orjuela A, Gil ID, Rodríguez G. Vapor–Liquid Equilibrium for Binary Mixtures of Acetates in the Direct Esterification of Fusel Oil. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017;62(1):11-9. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00221>
9. De-Lima R, Bento HBS, Reis CER, Bôas RNV, De-Freitas L, Carvalho AKF, et al. Biolubricant Production from Stearic Acid and Residual Secondary Alcohols: System and Reaction Design for Lipase-Catalyzed Batch and Continuous Processes. *Catalysis Letters*. 2022;152(2):547-58. doi:<https://doi.org/10.1007/s10562-021-03663-z>
10. Patil AG, Koolwal SM, Butala HD. Fusel oil: composition, removal and potential utilization. *International Sugar Journal*. 2002;104(1238):51-8.
11. Awad OI, Ali OM, Hammid AT, Mamat R. Impact of fusel oil moisture reduction on the fuel properties and combustion characteristics of SI engine fueled with gasoline-fusel oil blends. *Renewable energy*. 2018;123:79-91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.019>
12. Mayer FD, Feris LA, Marcilio NR, Staudt PB, Hoffmann R, Baldo V. Influence of fusel oil components on the distillation of Hydrous Ethanol Fuel (HEF) in a bench column. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015;32(2):585-93. doi:<https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150322s00003215>
13. Patidar P, Mahajani SM. Esterification of fusel oil using reactive distillation- Part I: Reaction kinetics. *Chemical Engineering Journal*. 2012;207:377-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.139>
14. Ferreira MC, Meirelles AJA, Batista EAC. Study of the fusel oil distillation process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52(6):2336-51. doi:<https://doi.org/10.1021/ie300665z>
15. Mendoza-Pedroza JDJ, Sánchez-Ramírez E, Segovia-Hernández JG, Hernández S, Orjuela A. Recovery of alcohol industry wastes: Revaluation of fusel oil through intensified processes. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2021;163:108329. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108329>

16. Zheng PY, Zhang WH, Chen KF, Wang NX, An QF. Pervaporation dehydration of fusel oil with sulfated polyelectrolyte complex hollow fiber membrane. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2019;95:627-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.09.025>
17. García-Aleaga CL, Cruz-Llerena A, Pérez-Ones O, de-Cárdenas LZ. Destilación reactiva para la revalorización de aceite fusel: caracterización de muestras y simulación de procesos. *Revista Centro Azúcar*. 2024; 51(4):e1085-07.
18. 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*. 2007;40(4):778–85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.06.010>
19. Devora-Rodríguez Y, López-Bello N, de Armas-Matrínez AC, 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.
20. Awad OI, Ali OM, Mamat R, Abdullah AA, Najafi G, Kamarulzaman MK, et al. Using fusel oil as a blend in gasoline to improve SI engine efficiencies: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:1232–42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.244>
21. Akcay M, Ozer S. Experimental investigation on performance and emission characteristics of a CI diesel engine fueled with fusel oil/diesel fuel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019;1-16. doi:<https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1689317>
22. Abdalla AN, Awad OI, Tao H, Ibrahim TK, Mamat R, Hammid AT. Performance and emissions of gasoline blended with fusel oil that a potential using as an octane enhancer. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019;41(8):931-47. doi:<https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1521889>
23. Awad OI, Mamat R, Ali OM, Azmi WH, Kadirgama K, Yusri IM, et al. Response surface methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil -gasoline blends at different water content in SI engine. *Energy Conversion and Management*. 2017;150:222–41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.047>
24. Simsek S, Ozdalyan B. Improvements to the composition of fusel oil and analysis of the effects of fusel oil–gasoline blends on a spark-ignited (SI) engine’s performance and emissions. *Energies*. 2018;11(3):625. doi:<https://doi.org/10.3390/en11030625>

25. Calam A, Solmaz H, Uyumaz A, Polat S, Yilmaz E, İçingür Y. Investigation of usability of the fusel oil in a single cylinder spark ignition engine. *Journal of the Energy Institute*. 2015;88(3):258-65. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.09.005>
26. Azania CAM, Azania AADPM, Rolim JC, Schiavetto AR, Pizzo IV, Zera FS. Aplicação de óleo fúsel na erradicação química da cana-de-açúcar e seu efeito na cultura do girassol em sucessão. *Bragantia*. 2010;69(3):581-90. doi:<https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300009>
27. Pizzo IV, Azania CAM, Azania AAPM, Schiavetto AR. Seletividade e eficácia de controle de plantas daninhas pela associação entre óleo fúsel e herbicidas em cana-de-açúcar. *Planta Daninha*. 2010;28(2):347-57. doi:<https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000200014>
28. Massa TB, Raspe DT, Feiten MC, Cardozo-Filho L, Da-Silva C. Fusel Oil: Chemical Composition and an Overview of Its Potential Application. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2023;34(2):153-66.
29. Hidalgo E. Aprovechamiento del aceite fusel para la obtención de productos químicos de alto valor agregado [Internet]: Universidad Central "Marta Abreu de las Villas"; 2010. Available from: <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/1797>
30. Bergero A, Odetti MS. Evaluación experimental de la producción Batch de acetato de isoamilo a partir de alcohol isoamílico recuperado del aceite de fusel [Internet]: Universidad Nacional de Córdoba; 2019. Available from: <http://hdl.handle.net/11086/12816>
31. Mattos FR, Júnior JM, Sabi GJ, Garcia PHD, Carvalho PO, Luiz JHH, et al. Design of a New Chemoenzymatic Process for Producing Epoxidized Monoalkyl Esters from Used Soybean Cooking Oil and Fusel Oil. *Catalysts*. 2023;13(3):543. <https://doi.org/10.3390/catal13030543>
32. Chen K-F, Zheng P-Y, Wu J-K, Wang N-X, An Q-F, Lee K-R. Polyelectrolyte complexes/silica hybrid hollow fiber membrane for fusel oils pervaporation dehydration processes. *Journal of Membrane Science*. 2018;545:284-91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.10.002>
33. Kujawski W, Capa-La W, Palczewska-Tulińska M, Ratajczak W, Linkiewicz D, Michalak B. Application of Membrane Pervaporation Process to the Enhanced Separation of Fusel Oils. *Chemical Papers*. 2002;56(1):3-6.
34. Vauclair C, Tarjus H, Schaetzel P. Permselective properties of PVA-PAA blended membrane used for dehydration of fusel oil by pervaporation. *Journal of Membrane Science*. 1997;125(2):293-301. doi:[https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(96\)00233-5](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(96)00233-5)

35. Bôas RNV, Ceron AA, Bento HBS, Castro HFD. Application of an immobilized *Rhizopus oryzae* lipase to batch and continuous ester synthesis with a mixture of a lauric acid and fusel oil. *Biomass and Bioenergy*. 2018;119:61-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.011>
36. Osorio-Viana W, Duque-Bernal M, Fontalvo J, Dobrosz-Gómez I, Gómez-García MÁ. Kinetic study on the catalytic esterification of acetic acid with isoamyl alcohol over Amberlite IR-120. *Chemical Engineering Science*. 2013;101:755-63. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.009>
37. Küçük Z, Ceylan K. Potential utilization of fusel oil: A kinetic approach for production of fusel oil esters through chemical reaction. *Turkish Journal of Chemistry*. 1998;22(3):289-300.
38. Leyva F, Orjuela A, Miller DJ, Gil I, Vargas J, Rodríguez G. Kinetics of propionic acid and isoamyl alcohol liquid esterification with Amberlyst 70 as catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52(51):18153-61. doi:<https://doi.org/10.1021/ie402349t>
39. Gamayurova VS, Shnaider KL, Jamai MJ. Enzymatic synthesis of butyrates of fusel oil. *Catalysis in Industry*. 2017;9:85-90. doi:<https://doi.org/10.1134/S2070050417010068>
40. Anschau A, Huerta KDM, Rêgo TV, Oliveira JM GD, Borba CM, Kalil SJ, et al. Enzymatic synthesis optimization of isoamyl butyrate from fusel oil. *Acta Scientiarum Biological Sciences*. 2021;43(1):1-13. doi: <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v43i1.54966>
41. De-Castro H, Moriya R, Oliveira P, Soares C. Fusel oil as precursor for aroma generation by biotransformation using lipase: Scientific note. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1999;77-79:817-26. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1604-9_74
42. Özgülsün A, Karaosmanoglu F, Tüter M. Esterification reaction of oleic acid with a fusel oil fraction for production of lubricating oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2000;77(1):105-9. doi: <https://doi.org/10.1007/s11746-000-0017-5>
43. Dörmö N, Bélafi-Bakó K, Barthá L, Ehrenstein U, Gubicza L. Manufacture of an environmental-safe biolubricant from fusel oil by enzymatic esterification in solvent-free system. *Biochemical Engineering Journal*. 2004;21(3):229-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bej.2004.06.011>
44. Bôas RNV, De-Lima R, Mendes AA, Freitas L, Bento HBS, De-Carvalho AKF, et al. Batch and continuous production of biolubricant from fusel oil and oleic acid: Lipase screening, reactor system development, and reaction optimization. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2021;168:108568. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108568>

45. Bôas RNV, Biaggio FC, Giordani DS, De-Castro HF. Síntese enzimática do caprilato de isopentila utilizando óleo fúsel como matéria-prima. *Química Nova*. 2017;40(5):541-7. doi:<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170032>
46. Fatima-Bi, Amanat-Ali, Seema-Iqbal, Muhammad-Arman, Mahmood-Ul-Hassan. Chemical esterification of fusel oil alcohol for the production of flavor and fragrance esters. *Journal of Chemical Society of Pakistan*. 2008;30(6):919-23.
47. Rodríguez RN, Chacón JAÁ. Aplicación de la química verde para la obtención de bases lubricantes. *Congreso de Ciencia y Tecnología*. 2018;13(1):216-9. doi:<https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.820>
48. Vartolomei A, Calinescu I, Gavrilă AI, Vinatoru M. Ultrasound assisted synthesis of isoamyl acetate catalysed by acidic ion exchange resin. *Univ Politeh Buchar Sci Bull Ser B*. 2021;83(1):113-24.
49. Wang M, Nie K, Yun F, Cao H, Deng L, Wang F, et al. Biodiesel with low temperature properties: Enzymatic synthesis of fusel alcohol fatty acid ester in a solvent free system. *Renewable energy*. 2015;83:1020-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.058>
50. Dias ALB, Hatami T, Martínez J, Ciftci ON. Biocatalytic production of isoamyl acetate from fusel oil in supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2020;164:104917. doi:<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104917>
51. Patidar P, Mahajani SM. Esterification of fusel oil using reactive distillation. Part II: Process alternatives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52(47):16637-47. doi:<https://doi.org/10.1021/ie401553z>
52. Leyva F, Orjuela A, Kolah A, Lira C, Miller D, Rodríguez G. Isoamyl propionate production by reactive distillation. *Separation and Purification Technology*. 2015;146:199-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.03.039>
53. Sánchez CA, Gil ID, Rodríguez G. Fluid phase equilibria for the isoamyl acetate production by reactive distillation. *Fluid Phase Equilibria*. 2020;518:112647. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2020.112647>
54. Martínez AF, Sánchez CA, Orjuela A, Rodríguez G. Isobutyl acetate by reactive distillation. Non-reactive phase equilibrium and topological analysis. *Fluid Phase Equilibria*. 2020;516:112612. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2020.112612>

55. Ali SS, Hossain SKS, Asif M. Dynamic modeling of the isoamyl acetate reactive distillation process. Polish Journal of Chemical Technology. 2017;19(1):59-66. doi:<https://doi.org/10.1515/pjct-2017-0009>
56. Montoya N, Córdoba F, Trujillo C, Gil I, Rodríguez G. Fusel oil process separation [Internet]: American Institute of Chemical Engineers Annual Meeting; 2011. Available from: https://www.researchgate.net/publication/287348623_Fusel_oil_process_separation
57. Fernández-Casiis M, Cruz-Llerena A, Pérez-Ones O, De-Cárdenas LZ, De-Cárdenas BZ. Obtención de productos de alto valor agregado, a partir de la separación del aceite fusel. ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 2022;56(2):43-55.
58. Khaled A, Gasmelseed GA. Desing of fusel oil separation column using hysys program. Sudan Engineer Society Journal. 2010;56(54):53-60.
59. De-Armas AC, Gallardo I, López N. Obtención de ésteres a patir de fracciones destiladas de aceite de fusel: parte II. Revista Centro Azúcar. 2022;49(4):1-11.

| **Received:** 10 septiembre 2024 | **Accepted:** 15 noviembre 2024 | **Published:** 15 diciembre 2024 |

Citation: García-Aleaga, C., Cruz, A., Pérez, O., Zumalacárregui, L., Fernández, M. Potencialidades del aceite fusel. Tecnologías para su revalorización. *Bionatura* 2024; Volume 9. No 4.

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)