

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte

Intensification process: biofuels production sustainable alternative for transport sector

María de los Ángeles Olán-Acosta,* Juan Barajas-Fernández y Claudia Gutiérrez-Antonio.

Para citar este artículo: Olán-Acosta María de los Ángeles, Barajas-Fernández Juan y Gutiérrez-Antonio Claudia, 2023. Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte. Ciencia Nicolaita no. 87, 197-207. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.675>



Historial del artículo:

Recibido: 7 de junio de 2022

Aceptado: 26 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: maria.olan@ujat.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte

Intensification process: biofuels production sustainable alternative for transport sector

María de los Ángeles Olán-Acosta,^{1*} Juan Barajas-Fernández¹ y Claudia Gutiérrez-Antonio.²

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1, 86690, Cunduacán, Tabasco

²Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Carretera a Chichimequillas s/n km 1, 76225, El Marqués, Querétaro

Resumen

Los biocombustibles se han identificado como una estrategia que contribuye a la recuperación económica sostenible. Estos se generan a partir de biomasa y permiten generar energía eléctrica, térmica y/o motriz; esta última es de gran relevancia para el sector transporte, en el que se requieren principalmente en fase líquida. En particular, los biocombustibles líquidos para el sector transporte que se han estudiado incluyen biogasolina, biodiésel, diésel verde y bioturbosina. Su producción es factible técnicamente, pero su factibilidad financiera es aún un reto. Por ello, en este trabajo se presentan las rutas de obtención de los biocombustibles líquidos para el sector transporte, así como las estrategias de la intensificación de procesos con mayor potencial de aplicación; en estas se incluyen columnas de destilación térmicamente acopladas, destilación reactiva y extracción reactiva.

Palabras clave: intensificación de procesos, separación reactiva, procesos sustentables, recursos renovables, biocombustibles

Abstract

Biofuels have been identified as a promissory strategy that contributes to sustainable economic recovery. Biofuels are generated from biomass, and allow the generation of electrical, thermal and/or motor energy; the last one is of great relevance for the transport sector, in which liquid biofuels are mainly required. In particular, the liquid biofuels for the transport sector that have been studied include biogasoline, biodiesel, green diesel and biojet fuel. The production of these biofuels is technically feasible, but its financial feasibility is still a challenge. For this reason, this paper presents the processing routes to obtain liquid biofuels for transport sector, as well as the strategies for the intensification of processes with the greatest application potential; these include thermally coupled distillation columns, reactive distillation, as well as reactive extraction.

Keywords: process intensification, reactive separation, sustainable processes, renewable resources, biofuels

1. Introducción

Actualmente, la sociedad enfrenta grandes retos en materia ambiental, energética y de salud. En el aspecto ambiental, el problema del cambio climático ha originado alteraciones en los patrones climatológicos, lo cual afecta a los seres vivos, humanos y no humanos, de los ecosistemas. Respecto a la generación de energía, se ha evidenciado el declive progresivo en la producción de los pozos de extracción de petróleo, recurso no renovable ampliamente usado para producir combustibles y otros productos. Finalmente, en materia de salud, la sociedad enfrenta una pandemia causada por la rápida diseminación del virus SARS-CoV-2; dicha pandemia ha cambiado el mundo tal cual se conocía, debido a las medidas de aislamiento propuestas.

En este contexto, se han dado afectaciones en prácticamente todos los sectores económicos; por lo que ahora se deben enfocar los esfuerzos para la recuperación económica sostenible. Para tal fin, la Agencia Internacional de Energía, en conjunto con el Fondo Monetario Internacional, han propuesto dos escenarios: acelerado y tardío, para la recuperación económica sostenible (IEA, 2020). El escenario acelerado de recuperación considera la inversión en sectores clave relacionados con la energía (Figura 1), en el cual se incluye tanto energía eléctrica de baja huella de carbono como bioenergía, así como otras estrategias de eficiencia energética. Es importante observar que se proponen una serie de políticas en aras de alcanzar dicha recuperación económica, dado que una sola de ellas no es suficiente para satisfacer el total de la demanda energética. Una de estas alternativas está relacionada con la producción y uso de biocombustibles.

Los biocombustibles se generan a partir de la conversión de la biomasa correspondiente al ciclo corto de carbono; esto posibilita que las emisiones que se liberan durante su uso sean equivalentes a las que absorbió la biomasa como parte de su crecimiento, por ello, pueden reducir de manera significativa su huella de carbono, en comparación con los combustibles de origen fósil, siempre y cuando se generen mediante procesos eficientes de producción. Los biocombusti-



Figura 1. Sectores clave en el escenario de rápida recuperación económica sostenible.

bles pueden obtenerse en estado sólido, líquido y gaseoso, y emplearse para la generación de energía calorífica, eléctrica y/o motriz; esta última es la más relevante en el sector transporte, donde son principalmente utilizados en fase líquida.

Dentro de los que pueden emplearse en el sector transporte se encuentran la biogasolina, el biodiésel, el diésel verde y la bioturbosina, los cuales pueden generarse a partir de biomasa mediante diferentes rutas de procesamiento, es decir, desde el punto de vista técnico su producción es factible; sin embargo, el reto más importante es producirlo con viabilidad financiera. En este contexto, la intensificación de procesos es una estrategia que posibilita disminuir de manera significativa, tanto el consumo de energía como el tamaño de las plantas de producción; esto conlleva menores costos tanto de capital como de operación, por lo que, la aplicación de estrategias de intensificación de procesos en la producción de biocombustibles, permitiría reducir su impacto ambiental y su costo de producción.

En este sentido, en el presente artículo se mostrarán las estrategias de intensificación de procesos como una alternativa para reducir los costos de producción y el impacto ambiental asociado de los biocombustibles del sector transporte. El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección dos se incluye información relacionada con la definición y procesos de producción; en la sección tres se define la intensificación de procesos y se describirán las estrategias con mayor potencial de aplicación

en la producción de los biocombustibles para el sector transporte; finalmente, se discutirán las perspectivas en torno a los avances y áreas de oportunidad en el uso de estrategias de intensificación para su producción.

2. Biocombustibles para el sector transporte

En el sector transporte se emplean combustibles para el tránsito terrestre (gasolina, diésel), marítimo (diésel) y aéreo (turbosina), tanto de personas como de mercancías; estos combustibles, que se utilizan actualmente, se derivan del petróleo. Gracias al avance de la ciencia y la tecnología, se han desarrollado procesos para producir biocombustibles; algunos de ellos pueden usarse en mezclas, mientras que otros pueden reemplazar totalmente a dichos combustibles fósiles. Estos se generan a partir de la biomasa, la cual se encuentra prácticamente en todos los rincones del planeta; no obstante, no es factible considerar que todos podrán generarse a partir de una sola materia prima. Por ello, es importante el estudio de nuevas materias primas disponibles localmente para así contar con procesos de producción donde los biocombustibles sean requeridos. En este contexto, la Tabla 1 concentra información relacionada con la composición, materias primas, máximo porcentaje al que pueden ser usados en motores, así como el poder calorífico, tanto de los combustibles de origen fósil como de los biocombustibles. En la Tabla 1 se puede observar que la biogasolina, el diésel verde y la bioturbosina poseen la misma composición química que la gasolina,

diésel y turbosina, respectivamente. Todos estos combustibles son hidrocarburos, sin importar si provienen del petróleo o de la biomasa. En contraparte, el biodiésel no está compuesto de hidrocarburos, sino de ésteres metílicos, es decir, su composición difiere significativamente respecto de la composición del diésel de origen fósil. Por eso, este último biocombustible solo puede utilizarse en mezclas con su contraparte fósil.

Una propiedad importante en los combustibles es el poder calorífico, el cual se define como la energía contenida por cada unidad de masa. De la Tabla 1 puede observarse que el poder calorífico de la biogasolina, diésel verde y bioturbosina, es igual o superior al de sus contrapartes fósiles. De hecho, la biogasolina y la gasolina deben cumplir el mismo estándar (ASTM D4814), al igual que el diésel verde y el diésel (ASTM 975). En el caso de la turbosina, esta debe cumplir con el estándar ASTM D1655, mientras que la bioturbosina debe certificarse mediante el estándar ASTM D7566; sin embargo, al mezclar la bioturbosina con la turbosina se debe cumplir con el estándar ASTM D1655 que corresponde al de la turbosina. Para el caso del biodiésel, este debe cumplir el estándar ASTM D6751. Como puede observarse, la biogasolina, el diésel verde y la bioturbosina son equivalentes en composición y propiedades a sus contrapartes fósiles, por lo cual se les conoce como combustibles equivalentes (drop-in biofuels).

Un aspecto de gran relevancia es el volumen máximo en el cual pueden ser usados los biocombustibles en motores que funcionen con gasolina, diésel o bien

Tabla 1
Principales características de los combustibles fósiles y los biocombustibles
(Límite establecido en las normas correspondientes).

Combustible	Gasolina	Biogasolina	Diésel	Diésel verde	Biodiésel	Turbosina	Bioturbosina
Composición	Hidrocarburos (C4-C11)		Hidrocarburos (C17-C28)		Ésteres metílicos	Hidrocarburos (C8-C16)	
Materias primas	Petróleo	Biomasa	Petróleo	Biomasa	Biomasa	Petróleo	Biomasa
Poder calorífico (MJ/kg)	46.0	46.0	42.7	44	38	43.8	>44.0
Temperatura de congelación (°C)	-107	-107	-34	-34	-5	-47	-57
Norma técnica	ASTM D4814	ASTM D4814	ASTM D975	ASTM D975	ASTM D6751	ASTM D1655	ASTM D7566
Uso en motores	100%	100%	100%	100%	20% máximo	100%	50% máximo



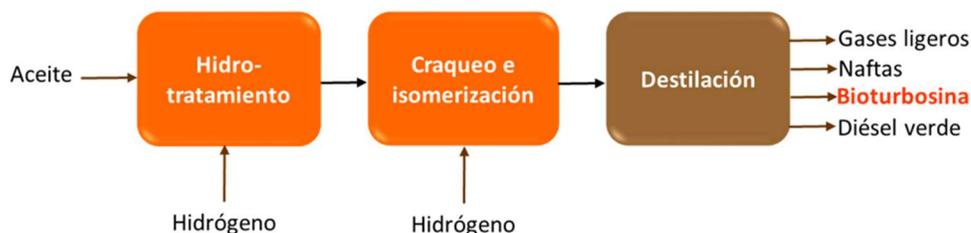
Proceso de producción de biodiésel



Proceso de producción de biogasolina



Proceso de producción de bioturbosina



Proceso de producción de diésel verde

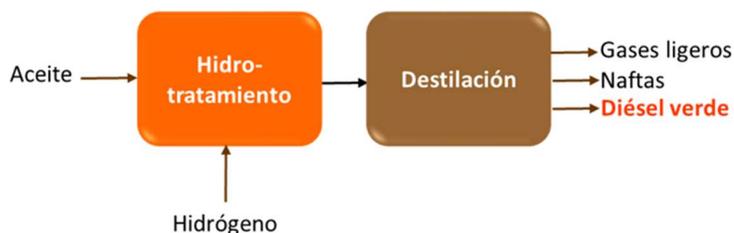


Figura 2. Procesos de producción de biocombustibles.

turbosina. Como se observa en la Tabla 1, la biogasolina puede ser usada al 100% en motores que funcionen con gasolina fósil, de acuerdo a lo establecido en el estándar; una situación similar se observa con el diésel verde. En el caso de la bioturbosina, esta puede ser usada máximo en mezclas al 50% en volumen con la turbosina; lo anterior se debe a la cantidad de compuestos aromáticos que contiene la bioturbosina, que varían en función de la materia prima y el proceso de producción empleado para obtenerla. Dado que la norma establece un mínimo valor para el contenido

de dichos compuestos, el máximo volumen que puede ser empleado depende de la cantidad de estos compuestos contenidos en la bioturbosina. En el caso del biodiésel, debido a su diferencia en composición, la norma establece su uso máximo en mezclas al 20%. Adicionalmente, es importante mencionar que tanto la biogasolina como el diésel verde, también pueden emplearse en pequeñas plantas generadoras de energía eléctrica y/o térmica. Ahora bien, la Figura 2 muestra los principales procesos de producción de los biocombustibles antes mencionados.

En la Figura 2 se observa que los aceites se pueden transformar en biodiésel, biogasolina, diésel verde y bioturbosina. En el caso del biodiésel, el aceite es transformado mediante una reacción de transesterificación junto con alcohol y un catalizador; posteriormente, se llevan a cabo operaciones de separación, entre las que se incluyen destilación y decantación para obtener con alta pureza biodiésel y glicerina, y separar el agua y recuperar el alcohol que se alimenta en exceso. Por otra parte, la conversión de aceites mediante el hidrotreamiento permite eliminar el oxígeno presente, lo cual posibilita la producción de biogasolina, diésel verde y bioturbosina. En todos los casos, la purificación de dichos combustibles se lleva a cabo mediante destilación. En general, los procesos de producción implican reacciones químicas y el uso de columnas de destilación; estas operaciones pueden intensificarse mediante algunas estrategias, las cuales se describen en la siguiente sección.

3. Intensificación de procesos

La intensificación de procesos es una de las tendencias en ingeniería de procesos que se ha impulsado gracias a los avances tecnológicos. La intensificación de procesos implica la modificación de procesos productivos con la finalidad de que estos sean más compactos, con mejores rendimientos y costos reducidos. Un ejemplo de la intensificación de procesos se puede observar en los teléfonos celulares, los cuales, inicialmente, eran más grandes (dimensiones 33 cm x 4.5 cm x 8.9 cm) que los actualmente disponibles (dimensiones 14.9 cm x 7.2 cm x 0.8 cm). Los teléfonos celulares no solo han reducido su tamaño, sino que también han disminuido su peso y tiempo de carga, a la vez que han aumentado tanto su tiempo de autonomía como sus funciones, por lo que ahora son más cómodos, prácticos, eficientes y rápidos; lo anterior fue producto de la mejora en la fabricación de piezas más delgadas y de gran capacidad. Un fenómeno similar ocurre con los equipos de procesos en una planta industrial; la mejora en los procesos se puede realizar mediante la reducción del tamaño de las unidades de proceso (equipos disruptivos), o bien en el número de equipos asociados al combinar diferentes unidades en una sola (operaciones integradas o híbridas). De esta manera, la intensificación posibilita emplear equipos

más compactos y eficientes que conduzcan a un mayor rendimiento global, con mayor eficiencia y seguridad.

En particular, dentro de las operaciones integradas o híbridas, se encuentran aquellas donde en el mismo equipo se realizan al menos dos operaciones unitarias diferentes. Dentro de ellas se incluyen las separaciones híbridas (combinación de diferentes operaciones de separación) y las separaciones reactivas (combinación de reacción con operaciones de separación) (Figura 3); en particular, los procesos de separación reactiva simplifican considerablemente el proceso de producción, reducen los costos de capital y aumentan la seguridad del proceso.

Entre los procesos con mayor factibilidad de aplicación en la producción de los biocombustibles líquidos se encuentran la destilación térmicamente acoplada, la destilación reactiva y la extracción reactiva. Este tipo de procesos constituyen el enfoque principal de este trabajo; a continuación, se brinda información sobre ellos.

3.1 Destilación térmicamente acoplada

La destilación es un proceso de separación física de una mezcla líquida homogénea formada por compuestos con diferentes temperaturas de ebullición. Esta operación se lleva a cabo en columnas que pueden tener diferentes configuraciones, considerando el número y localización de corrientes de alimentación y de productos, así como el tipo de elementos estructurales internos. Así, las columnas de destilación se pueden clasificar en convencionales (una corriente de alimentación y dos corrientes de productos) y complejas (múltiples corrientes de alimentación y de productos). Dentro de la segunda categoría se encuentran las columnas de destilación térmicamente acopladas, las cuales presentan una mayor eficiencia termodinámica, logrando minimizar el consumo de energía. Entre las configuraciones complejas se encuentran la secuencia térmicamente acoplada directa, secuencia térmicamente acoplada indirecta, secuencia Petlyuk y columna de destilación con pared divisoria (Figura 4).

Las columnas de destilación térmicamente acopladas consumen entre 30 y 50% menos energía que las columnas de destilación convencionales. Entre estas configuraciones, la columna de destilación con pared divisoria se ha implementado a escala industrial, ya

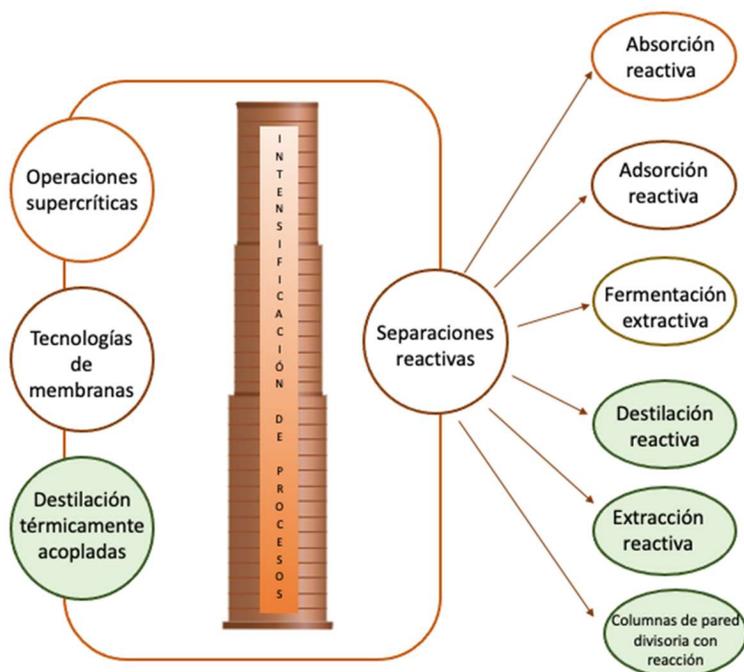


Figura 3. Diversas aplicaciones y tecnologías desarrolladas en la intensificación de procesos.

que permite disminuir de manera significativa el consumo de energía, requerimientos de espacio y costos asociados con tubería y bombeo. A su vez, este tipo de columnas intensificadas pueden acoplarse con sistemas reactivos (Figura 4). Las columnas de destilación reactiva con pared divisoria son equipos altamente integrados, los cuales pueden realizar simultáneamente la reacción y separación de mezclas multi-componentes.

En la producción de combustibles líquidos, las columnas de destilación térmicamente acopladas se han empleado para la purificación de bioetanol (Kiss y Suszwalak, 2012; Hernández-Hernández *et al.*, 2022), biobutanol (Errico *et al.*, 2016; Segovia-Hernández *et al.*, 2020), al igual que naftas, bioturbosina y diésel verde (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2015; Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2021). Los resultados de estos estudios muestran que es posible reducir entre 20% y 30% de los requerimientos energéticos para la purificación de estos biocombustibles, con respecto a las secuencias de destilación convencionales. Un aspecto importante es que la reducción del consumo de energía disminuye las emisiones de dióxido de carbono asociadas, sin que ello implique problemas de controlabilidad en los esquemas intensificados (Acosta-Solórzano *et al.*, 2016).

Por otra parte, la destilación reactiva térmicamente acoplada se ha empleado principalmente en la producción de biodiésel, mediante la catálisis homogénea (Miranda-Galindo *et al.*, 2010). En particular, Cossio-Vargas *et al.* (2011) reportan que la secuencia de destilación acoplada térmicamente es factible para llevar a cabo la reacción y la separación del biodiésel. De igual manera, Nguyen y Demirel (2011) señalan que el uso de equipos intensificados de destilación reactiva disminuye las pérdidas de energía y de exergía, lo que contribuye a un ahorro energético.

3.2 Destilación reactiva

La destilación reactiva es la operación más utilizada en el campo de la intensificación de procesos. En la destilación reactiva, en una sección de la columna se lleva a cabo la reacción química, y en el resto de la misma la separación de los componentes de la mezcla. Cabe mencionar que la continua remoción de los productos de la reacción afecta el equilibrio químico, por lo que el sistema, en aras de compensar, incrementa la generación de dichos productos. Por ello, usualmente la conversión y rendimientos son mayores al emplear la destilación reactiva, en comparación con la realización de las operaciones de forma independiente. Otras ventajas de la destilación reactiva incluyen la reducción de la cantidad de catalizador para el

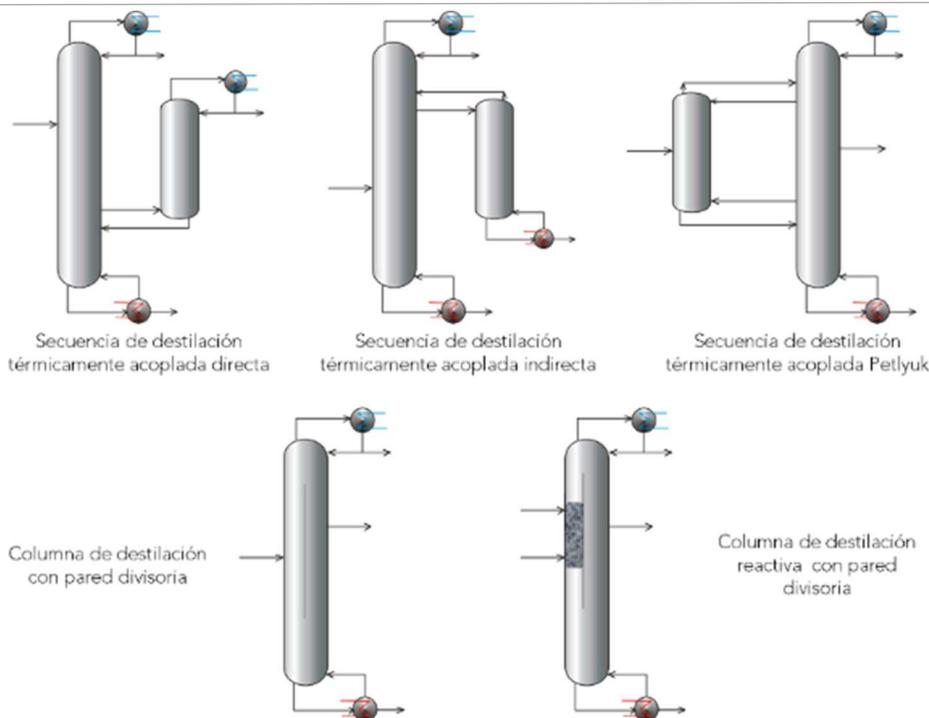


Figura 4. Secuencias de destilación térmicamente acopladas.

mismo grado de conversión, menor tiempo de residencia y mayor selectividad. Por otra parte, la destilación reactiva no solo reduce el número de equipos y de conexiones entre equipos, sino también las emisiones de gases de efecto invernadero dado que requiere menos cantidad de energía. En general, la destilación reactiva requiere menos medidas de seguridad, por lo que esta ha conseguido una rápida aceptación en su aplicación industrial.

Para la producción de biodiésel y diésel verde existe una gran variedad de trabajos, tanto experimentales como de simulación, que incluyen análisis, diseño y optimización de estos procesos. La destilación reactiva se ha aplicado en la producción de biodiésel considerando reacciones de transesterificación y esterificación tanto homogéneas como heterogéneas; en estos procesos se han empleado diversos tipos de materia prima, catalizadores y condiciones de operación (relación molar alcohol: grasa/aceite, temperatura de reacción y cantidad de catalizador). En la destilación reactiva se lleva a cabo simultáneamente la reacción de transesterificación y evaporación, condensación y recuperación del solvente que se encuentra en la corriente de producto. Una de las investigaciones que combina la simulación con la experimentación es la producción de biodiésel por dos rutas: etílica y metílica. En el estudio experimental se determinó

que la producción del biodiésel mediante destilación reactiva es tres veces más rápida respecto de los reactores discontinuos convencionales; además, en la destilación reactiva se tiene una conversión cercana al 97% y una disminución en energía para las dos rutas (Silva *et al.*, 2019).

En cuanto a la producción del diésel verde, la destilación reactiva se aplica a escala comercial en la Refinería Preem (Göteborg, Suecia), donde se utiliza la tecnología de coprocesamiento Hidroflex^{MR}. En el área de investigación, se ha reportado una columna de destilación reactiva para el hidrotreamiento de aceites vegetales y la hidrodeshulfuración de reacciones petróleo-diésel; los resultados muestran que el proceso es más eficiente en el uso de la energía y con un mayor rendimiento (Pérez-Cisneros *et al.*, 2017). Por otra parte, la producción de bioturbosina, diésel verde y biogasolina se realizó mediante el acoplamiento del reactor de hidrocrackeo e hidroisomerización en la primera columna de destilación del tren de purificación (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2018). Los resultados muestran que es posible producir los biocombustibles antes listados con mayor conversión y selectividad, así como con menores condiciones de operación respecto al proceso convencional.

Cabe mencionar que la destilación reactiva presenta algunas limitaciones, las cuales impiden que

pueda emplearse con buenos resultados en todos los procesos de producción de biocombustibles. La temperatura de reacción está limitada por la temperatura de separación, mientras que la velocidad de reacción debe ser rápida en la fase líquida, por el bajo tiempo de residencia, y las volatilidades relativas deben ser apropiadas para las condiciones de operación.

3.3 Extracción reactiva

La extracción reactiva es un proceso que integra funcionalmente la reacción y la separación de dos fases líquidas en la misma unidad. La separación de fases se puede realizar añadiendo un solvente, o bien utilizar uno de los reactivos en exceso como solvente. El equilibrio líquido-líquido se utiliza en acción conjunta con la reacción, obteniéndose una separación eficiente.

Las diversas aplicaciones de la extracción reactiva han mostrado que para sistemas con múltiples reacciones se tiene un aumento en el rendimiento y la selectividad; además, se reducen los flujos de reciclaje, la formación de residuos y facilita la purificación de productos que son difíciles de separar mediante tecnologías convencionales. La extracción reactiva se caracteriza por la baja concentración en subproductos, bajo costo de capital, fácil control de temperatura, bajo tiempo de residencia y alta conversión. Asimismo, en algunos sistemas, la aplicación de la extracción reactiva permite eliminar todas las operaciones convencionales relacionadas con el uso del catalizador, tales como su neutralización y separación, así como la eliminación de residuos.

Por la naturaleza de las reacciones, la extracción reactiva se ha empleado en la obtención de biodiésel mediante la transesterificación alcalina de oleato de metilo (trioleína), componente principal del aceite, y metanol, alcohol de cadena corta. En la configuración de la extracción reactiva se tienen dos zonas: una reactiva y otra de extracción líquido-líquido (Jurado *et al.*, 2013). Los reactivos se alimentan en contracorriente, mejorando así la separación y la formación de productos (glicerina y oleato de metilo). Parte del glicerol obtenido en la sección reactiva se utiliza como agente separador en la sección extractiva. En este proceso se puede lograr una conversión notablemente alta sin un exceso de metanol, lográndose así el ahorro de materias primas respecto de otros procesos

convencionales. El glicerol y el biodiésel (99.8 % FAME) se obtienen con alta pureza.

A pesar de que el diésel verde tiene aplicaciones industriales (Neste Oil en Europa, y UOP Honeywell en América) mediante el uso de procesos de hidrotratamiento e isomerización en equipos convencionales, la extracción reactiva no se ha utilizado. Para la implementación de la extracción reactiva hay algunos factores que deben tenerse en cuenta, por ejemplo, el catalizador juega un papel importante en el proceso reactivo y es un punto clave para optimizar el proceso. De igual manera, la simulación del proceso tiene un rol importante, ya que requiere del uso de modelos cinéticos que describan apropiadamente las reacciones químicas del hidrocraqueo, hidroisomerización e hidroxigenación; también se requieren diagramas termodinámicos que permitan visualizar la formación de fases en la misma región de operación de las reacciones químicas, por lo que no es una tarea fácil.

Mederos-Nieto *et al.* (2021) presentan una metodología para la obtención del diésel verde mediante extracción reactiva, la cual puede ser aplicada a diferentes tipos de materias primas (aceites vegetales, grasas animales, ésteres metílicos de ácidos grasos o incluso ácidos grasos libres) con diferentes esquemas de reacción y modelos cinéticos. Por ello, esta metodología permitirá generar datos útiles en la determinación de las condiciones óptimas de operación y en el desarrollo de procesos para la producción comercial de combustibles líquidos renovables mediante extracción reactiva.

4. Perspectivas

Como ya se ha mencionado, los biocombustibles que pueden emplearse en el sector transporte incluyen la biogasolina, el biodiésel, el diésel verde y la bioturbosina. Los procesos de producción son factibles desde el punto de vista técnico; sin embargo, uno de los principales retos es lograr su factibilidad financiera. En este contexto, la intensificación de procesos es una herramienta de gran potencial que posibilita disminuir los costos de operación, el impacto ambiental y el tamaño de la planta de producción. Existe un amplio catálogo de equipos intensificados que pueden emplearse en los procesos de producción; en par-

particular, para la producción de biocombustibles destacan las secuencias de destilación térmicamente acopladas, la destilación reactiva (convencional y térmicamente acoplada) y la extracción reactiva.

En el caso del biodiésel se ha propuesto y evaluado el uso de destilación reactiva, tanto en secuencias convencionales como térmicamente acopladas. De igual manera, se ha propuesto y evaluado el uso de extracción reactiva. Para este biocombustible, las condiciones nobles de procesamiento (1 atm, 60-80 °C) han permitido la aplicación de diversas tecnologías intensificadas para su obtención. En todos los casos estudiados, se ha reportado no solo la factibilidad técnica, sino también un reducido consumo de energía y, por ende, un menor impacto ambiental. En este caso, un área de oportunidad representa el uso de sonotrodo o la aplicación de campos eléctricos y/o magnéticos. Con base en resultados reportados en otros estudios, puede esperarse que el empleo de estas estrategias reduzca los tiempos de residencia y evite el uso de un reactivo en exceso.

Por otra parte, la obtención de biogasolina, diésel verde y bioturbosina se lleva a cabo mediante procesos de hidrotreamiento. Estos procesos se realizan a altas condiciones de operación (250-500 °C, 30-80 atm) utilizando altos flujos de hidrógeno (450-1500 ml H₂ NPT/ml aceite) con catalizadores metálicos soportados en zeolitas. Debido a ello, las alternativas de intensificación que han sido estudiadas incluyen el uso de columnas de destilación térmicamente acopladas en la zona de purificación de los biocombustibles. Los estudios muestran que es posible reducir hasta en un 30% el consumo de energía asociado a la purificación, con lo que también se disminuye su impacto ambiental.

Otra estrategia que se ha usado con éxito es la destilación reactiva, considerando columnas convencionales. Es importante mencionar que se ha reportado el acoplamiento de la reacción de hidrodeoxigenación con la destilación y el acoplamiento de las reacciones de hidrocraqueo e hidroisomerización con la destilación; sin embargo, aún no se ha reportado la destilación reactiva considerando el hidrotreamiento de un solo paso, es decir, llevando a cabo las reacciones de hidrodeoxigenación, hidrocraqueo e hidroisomerización acopladas en una columna de destilación. Cabe añadir que tampoco se ha explorado el uso de destilación reactiva considerando columnas de destilación térmicamente acopladas.

Respecto a la extracción reactiva, solo se tiene una metodología reportada que, si bien es valiosa, únicamente considera la reacción de hidrodeoxigenación para la producción de diésel verde. No obstante, la implementación de esta operación intensificada para la producción de bioturbosina y biogasolina, representaría un avance muy importante que posibilitaría su factibilidad financiera y la reducción del impacto ambiental.

Otra área de oportunidad es el desarrollo de catalizadores multifuncionales que no requieran hidrógeno para llevar a cabo la remoción del oxígeno y que permitan llevar a cabo las reacciones en condiciones menores de presión y temperatura.

5. Conclusiones

En este trabajo se revisaron las estrategias de intensificación de procesos con mayor potencial para su aplicación en la producción de biodiésel, diésel verde y biogasolina. Las estrategias de intensificación con mayor potencial de uso en la producción de estos biocombustibles incluyen la destilación térmicamente acoplada, la destilación reactiva (tanto convencional como térmicamente acoplada) y la extracción reactiva. En el caso de la producción de biodiésel, todas las operaciones antes mencionadas se han empleado con éxito; sin embargo, aún existen muchas oportunidades de mejora y exploración de nuevas configuraciones intensificadas para la producción de biodiésel. En contraparte, en el caso de la producción de biogasolina, diésel verde y bioturbosina, los estudios son relativamente escasos, aunque los resultados son alentadores. En estos biocombustibles, las condiciones del proceso de obtención dificultan la aplicación de estrategias de intensificación factibles y, justamente por ello, es importante enfocar los esfuerzos de investigación en el desarrollo de metodologías de diseño para su obtención. Así será posible producir los biocombustibles que el sector transporte requiere con factibilidad técnica, económica y ambiental, contribuyendo al desarrollo sostenible de la sociedad.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco a María de los Ángeles Olán Acosta para la realización de su estancia de investigación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Referencias

- Acosta-Solórzano, A.D.A., Guerrero-Farfán, O., Ramírez-Márquez, C., Gómez-Castro, F.I., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S. and Gutiérrez-Antonio, C., 2016, Controllability analysis of distillation sequences for the separation of biojet fuel and Green diesel fractions: *Chemical Engineering & Technology*, 39(12), 2273-2283. <https://doi.org/10.1002/ceat.201600095>
- Cossío-Vargas, E., Hernández, S., Segovia-Hernández, J.G. and Cano-Rodríguez, M.I., 2011, Simulation study of the production of biodiesel using feedstock mixtures of fatty acids in complex reactive distillation columns: *Energy*, 36(11), 6289-6297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.005>
- Errico, M., Sánchez-Ramírez, E., Quiroz-Ramírez, J.J., Segovia-Hernández, J.G. and Rong, B.-G., 2016, Synthesis and design of new hybrid configurations for biobutanol purification: *Computers & Chemical Engineering*, 84, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.009>
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F.I., Hernández S. and Briones-Ramírez, A., 2015, Intensification of a hydrotreating process to produce biojet fuel using thermally coupled distillation: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 88, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2014.12.002>
- Gutiérrez-Antonio, C., Soria-Ornelas, M.L., Gómez-Castro, F.I. and Hernández, S., 2018, Intensification of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel through reactive distillation: *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 124, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2017.12.009>
- Gutiérrez-Antonio, C., Romero-Izquierdo, A.G., Gómez-Castro, F.I. and Hernández, S., 2021, Production processes for renewable aviation fuel. Present technologies and future trends: *Amsterdam, Elsevier*. ISBN 978-0-12-819719-6.
- Hernández-Hernández, E.J., Cabrera-Ruiz, J., Hernández-Escoto, H., Gutiérrez-Antonio, C. and Hernández, S., 2022, Simulation study of the production of high purity ethanol using extractive distillation. Revisiting the use of inorganic salts: *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 170, 108670. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2021.108670>
- IEA, International Energy Agency, 2020, "Sustainable Recovery - World Energy Outlook Report". <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery> [consultado el 15 de septiembre de 2021].
- Jurado, M.G., Plesu, V., Ruiz, J.B., Ruiz, A.B., Tuluc, A. and Llacuna, J.L., 2013, Simulation of a hybrid reactive extraction unit. Biodiesel synthesis: *Chemical Engineering Transactions*, 35, 205-210. <https://doi.org/10.3303/CET1335034>
- Kiss, A.A., Suszwalak, D. J.-P.C., 2012, Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns: *Separation and Purification Technology*, 86, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.022>
- Mederos-Nieto, F.S., Santoyo-López, A.O., Hernández-Altamirano, R., Mena-Cervantes, V.Y., Trejo-Zárraga, F., Centeno-Nolasco, G. and Ramírez-Jiménez, E., 2021, Renewable fuels production from the hydrotreating over NiMo/γ-Al₂O₃ catalyst of castor oil methyl esters obtained by reactive extraction: *Fuel*, 285, 119168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119168>
- Miranda-Galindo, E.Y., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Gutiérrez-Antonio, C. and Briones-Ramírez, A., 2011, Reactive Thermally Coupled Distillation Sequences: Pareto Front: *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(2), 926-938. <https://doi.org/10.1021/ie101290t>
- Nguyen, N. and Demirel, Y., 2011, Using thermally coupled reactive distillation columns in biodiesel production: *Energy*, 36(8), 4838-4847. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.020>
- Pérez-Cisneros, E.S., Sales-Cruz, M., Lobo-Oehmichen, R. and Viveros-García, T., 2017, A reactive distillation process for co-hydrotreating of non-edible vegetable oils and petrodiesel blends to produce green diesel fuel: *Computers and Chemical Engineering*, 105, 105-122. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.01.018>
- Segovia-Hernández, J.G., Sánchez-Ramírez, E., Alcocer-García, H., Quiroz-Ramírez, J.J., Udugama, I.A. and Mansouri, S.S., 2020, Analysis of intensified sustainable schemes for biobutanol purification: *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 147, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2019.107737>
- Silva, R.J., Tschoeke, I.C., Melo, J.C., Silva, J.P., Pacheco, J.G., Silva J.M. and Souza, T.P., 2019, Comparison between experimental and simulated results of biodiesel production by reactive distillation and energetic assessment: *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36, 351-359. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20170266>