

INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE BIODIÉSEL A PARTIR DE RESIDUOS

Tania Gisell Salgado Rodriguez ^a, Fernando Israel Gómez Castro ^{a*}, Nelly Ramírez
Corona ^b

^a Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Química, Guanajuato, Gto., 36050, México.

fgomez@ugto.mx

^b Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, San
Andrés Cholula, Puebla, 72810, México.

Resumen

El biodiésel ofrece una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. Entre las posibles vías para transformar los triglicéridos en biodiésel, la catálisis heterogénea ofrece ventajas como la reducción de la necesidad de sistemas de separación. Este estudio compara procesos convencionales e intensificados (basados en la destilación reactiva) utilizando simulaciones de Aspen Plus como herramienta de análisis, centrándose en la producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado (WCO) utilizando CaO como catalizador. Según los resultados, el método convencional (60 °C, 65 min, relación metanol-aceite 6:1) alcanza una conversión del 98 %. El proceso intensificado (75.5-80 °C) reduce las necesidades energéticas en un 33.5 %, lo que mejora la eficiencia. Este trabajo hace hincapié en la transición de las rutas de procesamiento tradicionales a tecnologías intensificadas innovadoras para la producción sostenible de combustible, dentro del marco de la economía circular.

Palabras clave: Biodiésel; catálisis heterogénea; destilación reactiva; intensificación; sustentabilidad.

PROCESS INTENSIFICATION FOR THE SUSTAINABLE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM WASTE

Abstract

Biodiesel offers a sustainable alternative to fossil fuels. Among the possible pathways for transforming triglycerides into biodiesel, heterogeneous catalysis provides advantages such as reducing the need for separation systems. This study compares conventional and intensified processes (based on reactive distillation) using Aspen Plus simulations as an analysis tool, focusing on biodiesel production from used cooking oil (WCO) with CaO as the catalyst. According to the results, the conventional method (60 °C, 65 min, methanol-to-oil ratio 6:1) achieves a 98% conversion. The intensified process (75.5–80 °C) reduces energy requirements by more than 33.5 %, thus improving efficiency. This work emphasizes the transition from traditional processing routes to innovative intensified technologies for sustainable fuel production within the framework of the circular economy.

Keywords: Biodiesel; heterogeneous catalysis; reactive distillation; intensification; sustainability.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de energía ha aumentado significativamente, impulsado principalmente por el crecimiento de la población y los cambios en el estilo de vida de la sociedad. A nivel global, el consumo de energía pasó de 8,837.84 Mtoe en 2010 a 14,406 Mtoe en 2019, lo que representa un incremento del 63 %. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), se proyecta que la demanda energética aumente un 20 % para 2050, impulsando el uso de fuentes renovables como los biocombustibles (Gómez-Castro y Gutiérrez-Antonio, 2022).

Los biocombustibles elaborados a partir de materias primas residuales pueden tener un impacto ambiental positivo, siempre que se considere todo el ciclo de vida del combustible. Esto significa que la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a lo largo de la cadena de producción debe ser menor que la cantidad de CO₂ absorbida por los cultivos utilizados como materia prima (International Energy Agency, 2021). Estos combustibles pueden producirse utilizando materias primas locales, lo que promueve la independencia energética de cada nación, reduciendo así la dependencia de fuentes

externas de energía y mejorando la seguridad energética nacional (Gómez-Castro y López-Molina, 2020)

Los biocombustibles de segunda generación, que emplean residuos agrícolas, forestales, urbanos y grasas animales, son más sostenibles que los de primera generación porque no dependen de materias primas comestibles. Esto reduce su impacto en la seguridad alimentaria y el uso de la tierra. Sin embargo, la producción de estos biocombustibles enfrenta importantes desafíos tecnológicos y económicos que limitan su competitividad frente a los combustibles fósiles.

En el caso de los motores diésel, el biodiésel es uno de los biocombustibles más utilizados. Sin embargo, es necesario buscar estrategias para hacerlo competitivo en costos frente al diésel fósil, implementando estrategias que optimicen su producción. Una de las alternativas clave para reducir los costos de producción es el uso de materias primas de bajo costo, así como la implementación de tecnologías intensificadas. El objetivo de esta investigación es evaluar la implementación de tecnologías intensificadas para mejorar la eficiencia del proceso, reduciendo los costos

para su implementación dentro del marco de la economía circular.

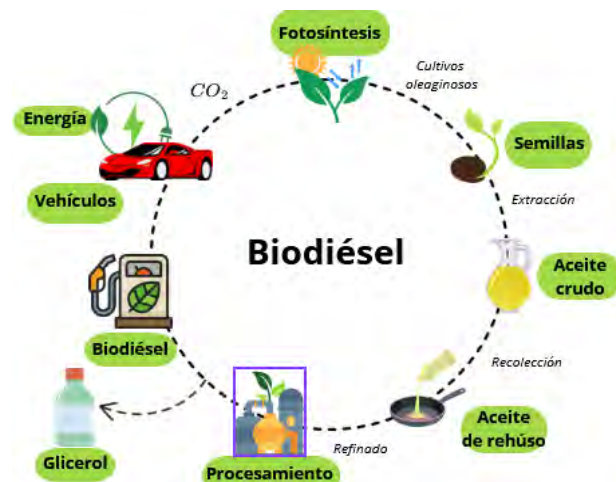


Figura 1. Ciclo del biodiésel dentro del marco de la economía circular.

2. Metodología

2.1. Consideraciones generales

El diseño de la producción de biodiésel se ha obtenido mediante simulación en el software comercial Aspen Plus. Los primeros pasos en el desarrollo de la simulación fue la definición de los componentes y la selección del modelo termodinámico adecuado. Además, se deben seleccionar y especificar las operaciones unitarias y las condiciones de operación, así como las condiciones de alimentación y la capacidad de la planta. Se obtuvieron los balances de materia y energía

para cada unidad, así como las condiciones de operación.

La Tabla 1 muestra la caracterización del aceite de cocina usado, presentando su composición lipídica. El aceite contiene un 6% de ácidos grasos libres en peso, lo que significa que el material es de baja calidad (Gasca-González y col, 2018).

Tabla 1. Composición lipídica del aceite de cocina usado.

Ácidos grasos (6% p/p)	Triglicéridos (94% p/p)
Ácido palmítico (12.3% p/p)	Tripalmitina (12.3% p/p)
Ácido oléico (24% p/p)	Trioleina (24% p/p)
Ácido linoleico (56.6% p/p)	Trilinoleina (56.6% p/p)
Ácido linolénico (7.1% p/p)	Trilinolenina (7.1% p/p)

Para el análisis del proceso, se estimó una alimentación de 2,900 kg/h de aceite para el proceso. Además, para modelar el proceso de producción de biodiesel es necesario seleccionar un modelo termodinámico que permita predecir las propiedades fisicoquímicas de los componentes.

Asimismo, numerosos estudios han reportado los parámetros de interacción entre el glicerol, metanol y agua. Por lo tanto, los modelos NRTL y UNIQUAC son los más adecuados; sin embargo, NRTL ha sido elegido para la mayoría de las etapas del proceso. El modelo UNIFAC-LL se utiliza para los equipos de separación de fases en presencia de ésteres etílicos con glicerol y metanol.

2.2. Parámetros cinéticos

En el proceso de producción de biodiesel existen dos etapas reactivas importantes: la esterificación y la transesterificación.

La etapa de esterificación ácida se representa mediante las reacciones mostradas en la **Figura 2:**

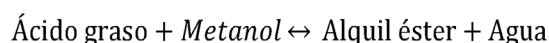


Figura 2. Reacción de esterificación.

La reacción de esterificación es catalizada por un ácido, en este caso ácido sulfúrico al 1% en peso.

Se cuenta también con una reacción de neutralización del ácido sulfúrico para evitar problemas en las etapas siguientes. La

reacción de neutralización se presenta en la

Figura 3:

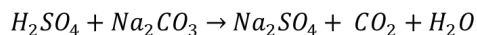


Figura 3. Reacción de neutralización.

La reacción de transesterificación asume que las reacciones son reversibles para un proceso heterogéneo.

La reacción de transesterificación se representa en la **Figura 4:**

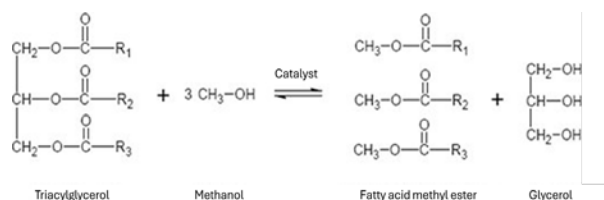


Figura 4. Reacción de transesterificación.

2.3. Proceso propuesto

En las **Figuras 5 y 6** se muestran el proceso propuesto para la producción de biodiésel a partir de aceite de rehúso de cocina. En ambos procesos se propone la implementación de la primera etapa reactiva que involucra la reacción de esterificación debido a la presencia de los altos índices de ácidos grasos libres en la composición del aceite.

2.3.1 Proceso convencional

El proceso de producción de biodiésel se divide en tres zonas principales: pretratamiento, transesterificación neutralización y separación (**Figura 5**).

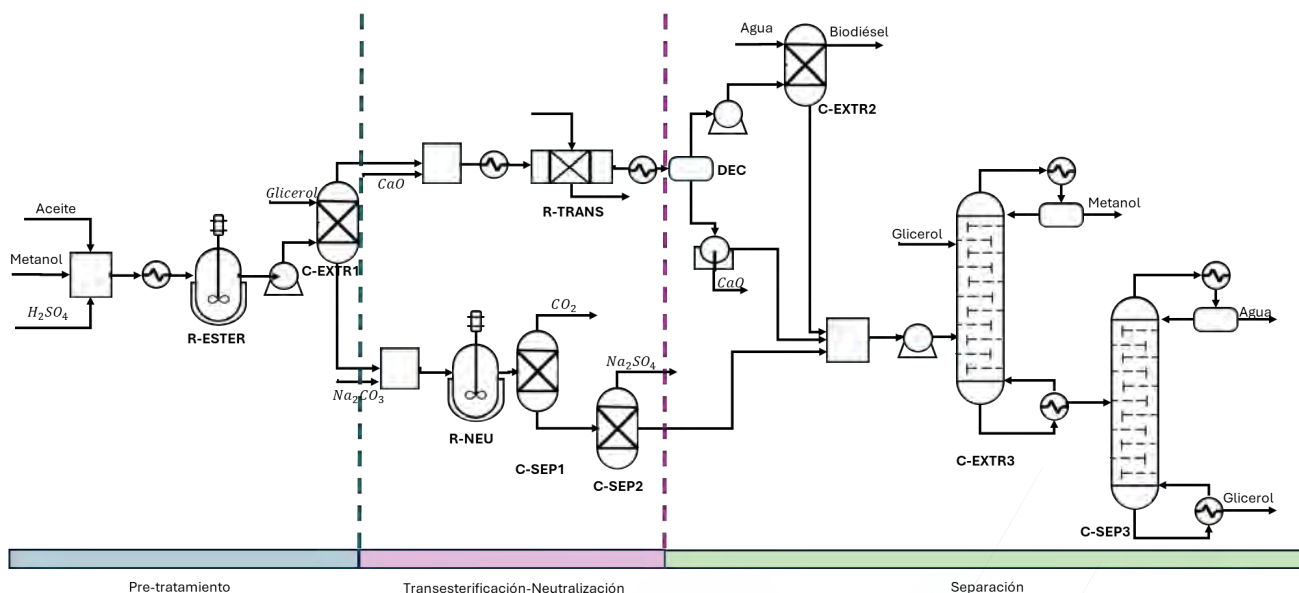


Figura 5. Diseño de producción de biodiésel convencional.

En la zona de pretratamiento, el aceite se mezcla con metanol en relación molar 6:1 y ácido sulfúrico (1 % p/p) como catalizador. La mezcla se precalienta y alimenta al reactor de esterificación (R-ESTER) para convertir los ácidos grasos libres. La corriente pasa a la columna de extracción (C-EXTR1), donde el aceite separado se envía a la etapa de transesterificación, mientras que metanol, agua y catalizador se envían a neutralización.

En la zona de transesterificación–neutralización, el aceite se mezcla con catalizador de óxido de calcio (1 % p/p) y metanol (6:1), se precalienta y se alimenta al reactor de transesterificación (R-TRANS) operando a 60 °C. Paralelamente, la corriente de extracción se neutraliza con carbonato de

sodio, generando sulfato de sodio y CO₂, los cuales se separan en C-SEP1 y C-SEP2.

Finalmente, en la zona de separación, la corriente del reactor pasa a un decantador (DEC) para separar la fase orgánica (biodiésel) de la inorgánica (glicerol, agua, metanol). El biodiésel crudo se somete a una segunda extracción con agua para purificación. Los subproductos y el exceso de metanol se recuperan en columnas de extracción (C-EXTR2, C-EXTR3) y separadores (C-SEP3), obteniendo el reciclaje de metanol y la recuperación de glicerol.

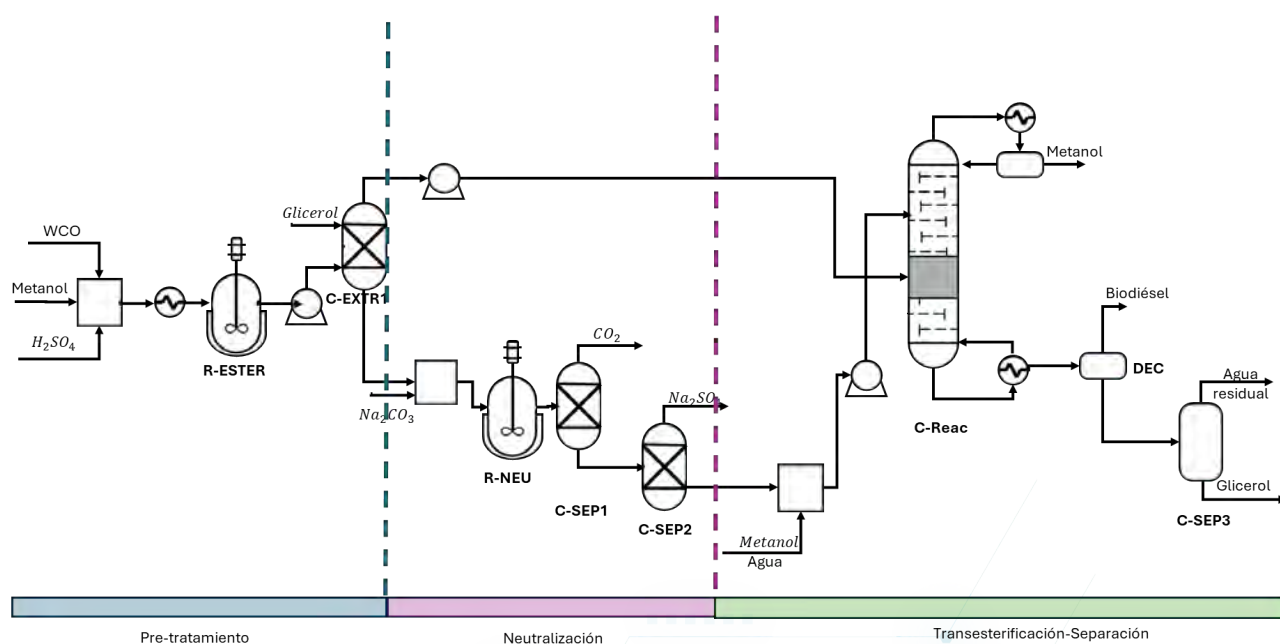


Figura 6. Diseño del proceso de producción de biodiésel intensificado.

2.3.2 Proceso intensificado

Para el caso del proceso intensificado (**Figura 6**) la zona de pretratamiento, así como la de neutralización se llevan a cabo de la misma forma.

En la zona de Transesterificación-Separación se lleva a cabo la intensificación del proceso donde busca juntar en un solo equipo dos operaciones unitarias, en este caso, la columna de separación va después del reactor, como se puede visualizar en la **Figura 7**.

Para la configuración de la columna de destilación reactiva se consideró un total de 16 etapas, entrada del aceite en la etapa 6 y del metanol en la etapa 2, con una presión de 1 atm y la etapa reactiva se encuentra entre las etapas 7 – 9.

Una vez que se lleva a cabo la reacción en las etapas interiores de la columna se lleva a cabo la etapa de separación en la salida de la corriente de destilado, donde se recupera el metanol con la pureza requerida.

En los fondos toda la corriente pasa al separador donde se extrae todo el biodiésel. Y finalmente pasamos a un flash donde extraemos toda el agua y recuperamos el glicerol.

Los equipos utilizados en el proceso han sido diseñados y simulados para cumplir con las especificaciones correspondientes de presión, temperatura, conversión y tiempo de residencia, entre otros. Este diseño no asegura un óptimo global, pero presenta condiciones de operación determinadas mediante un análisis de sensibilidad.

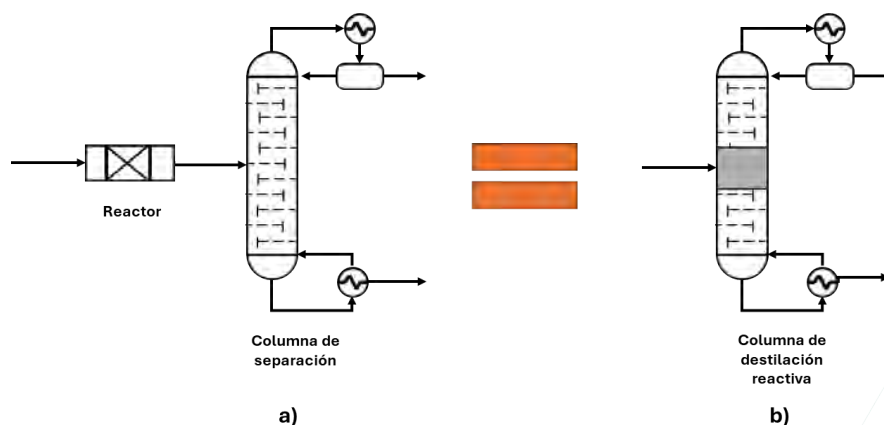


Figura 7. a) Representación del reactor y la columna de destilación. b) Representación de la columna de destilación reactiva

3. Resultados

Los resultados de las simulaciones para la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado (WCO) mediante procesos convencionales (PC) e intensificados (PI) se muestran en la **Tabla 4**.

En la **Tabla 5** se muestra la cantidad de materia usada en el proceso, en el caso del proceso convencional (PC) se puede ver el requerimiento de agua y aun mayor de metanol para poder llevar a cabo el proceso.

En la **Tabla 6** se observan las diferencias de producto obtenido en ambos procesos.

Los hallazgos clave resaltan las ventajas de la intensificación del proceso en términos de eficiencia del material, energía y rendimiento del producto.

Las cargas de energéticas del condensador y del rehervidor disminuyeron un 91% y un 89.5%, respectivamente, en el proceso intensificado (**Tabla 8**), lo que resultó en una reducción del 33.5 % en la demanda total de energía. El consumo de energía de rehervidor se redujo un 89.5% debido al menor número de unidades de separación.

El consumo de agua se eliminó en el proceso intensificado, ya que la extracción de metanol

se integró en la destilación reactiva, lo que redujo la generación de aguas residuales en un 96%.

En la fase de separación, la columna de destilación reactiva opera con menos etapas y una zona reactiva compacta, lo que mejora su eficiencia y rendimiento.

4. Conclusiones

El diseño de un proceso de producción de biodiésel se realizó en un entorno de simulación, lo que permitió el análisis del proceso completo. Según los resultados, la configuración más conveniente para la producción de biodiesel emplea un proceso intensificado. Esta configuración permite producir altos niveles de biodiésel con menores costos de producción, mejorados por la venta de electricidad y menor uso de equipos para llevar a cabo la transformación de la materia prima.

Además, esta configuración demuestra ser la más respetuosa con el medio ambiente, con menores emisiones potenciales y menor impacto en el cambio climático.

Tabla 2. Condiciones de operación de los equipos importantes del proceso de producción de biodiésel.

<i>Equipo</i>	<i>Variable</i>	<i>PC</i>	<i>PI</i>
<i>Reactor de esterificación</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	70	70
	<i>Relación molar alcohol: aceite</i>	6:1	6:1
	<i>Conversión [%masa]</i>	92%	92%
	<i>Ácidos grasos libres [% peso]</i>	0.68	0.68
<i>Reactor de transesterificación</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	60	60
	<i>Relación molar alcohol: aceite</i>	6:1	-
	<i>Refrigerante (agua [kg/h])</i>	22,000	-
	<i>Conversión [%]</i>	98	-
<i>Columna de destilación reactiva</i>	<i>Relación molar alcohol:aceite</i>	-	6:1
	<i>Etapas reactivas</i>	-	7-9
	<i>Temperatura [°C]</i>	-	75.5- 80
	<i>Conversión [%]</i>	-	99
	<i>Número de etapas</i>	-	16
	<i>Flujo de destilado [kg/h]</i>	-	660
	<i>Pureza del metanol [%masa]</i>	-	98
	<i>Flujo de agua [kg/h]</i>	3,500	0
<i>Separación del biodiésel</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	30	30
	<i>Pureza del biodiésel [% mol]</i>	97	98
	<i>Flujo biodiésel [kg/h]</i>	2866	2900
	<i>Número de platos</i>	18	-
<i>Columna de metanol</i>	<i>Plato de alimentación de aceite</i>	6	-
	<i>Flujo de destilado [kg/h]</i>	3,675.71	-
	<i>Recuperación del metanol [%masa]</i>	99.3	-
	<i>Número de platos</i>	6	1
<i>Columna de glicerol</i>	<i>Plato de alimentación</i>	2	1
	<i>Flujo de fondos [kg/h]</i>	3,182	414
	<i>Pureza del glicerol [%masa]</i>	99	99

Tabla 3. Materia prima utilizada en el proceso.

Materia [kg/h]	PC	PI
WCO	2900	2900
Contenido de FFA [%peso]	6	6
Metanol	1342	992
CaO	90	90
H₂SO₄	29	29
Na₂CO₃	28.5	28.5
Glicerol	840	240
Agua	25,500	0

Tabla 4. Productos generados en la simulación del proceso convencional (PC) y del proceso intensificado (PI).

Productos [kg/h]	PC	PI
Biodiésel	2899	2901
Glicerol	403.2	408
Agua residual	3268	140
Metanol (99% masa)	1014.24	646.41
CO₂	11.71	11.71
Na₂SO₄	34.93	34.93

Tabla 5. Consumo de energía y rendimiento del biodiésel.

Rendimiento de biodiésel [%]		Consumo de energía [MW]	
PC	PI	PC	PI
98	99	52.8	35.1

Tabla 6. Consumo energético del proceso convencional y del intensificado.

Parámetr o	Proceso convencional [MW]	Proceso intensificad o [MW]
Carga del condensa dor	8.8	0.8
Carga de rehervido r	9.1	0.95

El proceso intensificado ofreció un mejor rendimiento en biodiesel y en consumo energético en comparación del proceso convencional. Los beneficios demostrados respaldan firmemente la adopción de procesos intensificados en la transición hacia sistemas de producción de combustibles más sostenibles.

Referencias bibliográficas

Gómez-Castro, F. I., & Gutiérrez-Antonio, C. (2022). Biomass: The driver for sustainable development. En F.I. Gómez-Castro & C. Gutiérrez-Antonio (Eds.), *Biofuels and Biorefining Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion*, Elsevier, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824116-5.00008-8>

Gómez-Castro, F. I., & López-Molina, A. (2020). Non-catalytic production of biodiesel: Energy and safety considerations. En G. R. Carey (Ed.), *Biofuels: Advances in Research and Applications*, Nova Science Publishers, pp. 1–29.

Gasca-González, R., Gómez-Castro, F. I., & Romero-Izquierdo, A. G. (2018). Design of a low-cost process for the production of biodiesel using waste oil as raw material. *Computer Aided Chemical Engineering*, 43, 1529-1534. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50267-9>

International Energy Agency (2021). Global primary energy demand growth by scenario

2019–2030. Recuperado de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-primary-energy-demand-growth-by-scenario-2019-2030>., Último acceso en Marzo de 2025.

Janajreh, I., ElSamad, T., AlJaberi, A., & Diouri, M. (2015). Transesterification of Waste Cooking Oil: Kinetic Study and Reactive Flow Analysis. *Energy Procedia*, 75, 547-553. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.451>