

REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS

Revaluation of waste for the generation of liquid and solid biofuels

Luis Antonio Rodríguez Romero¹, Claudia Gutiérrez Antonio^{1*},
Juan Fernando García Trejo¹, Ana Angélica Feregrino Pérez¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Correo electrónico: claugtez@gmail.com

RESUMEN

El declive en la producción de los pozos petroleros, así como el problema del cambio climático han impulsado la búsqueda de fuentes alternas de energía como la biomasa, que tiene gran potencial, ya que puede convertirse en energía (eléctrica y calorífica) y biocombustibles (que pueden encontrarse en estado gaseoso, líquido y sólido). Usualmente diferentes fracciones de la biomasa son transformadas en un biocombustible específico; por ejemplo, los aceites se transforman en biodiésel y bioturbosina, mientras que la biomasa lignocelulósica se emplea para elaborar pellets combustibles. No obstante, tanto los líquidos como los sólidos pueden obtenerse del aprovechamiento integral de una materia prima, lo que permite incrementar la rentabilidad de los procesos y reducir los residuos derivados de la producción de biocombustibles. En el presente trabajo, se realiza una revisión de los procesos de producción de biocombustibles líquidos y sólidos con el objetivo de identificar oportunidades para el aprovechamiento integral de las biomásas.

PALABRAS CLAVE: ENE, biomasa, energía renovable, biocombustible, pellets, poder calorífico.

ABSTRACT

The decline in the production of oil wells, as well as the problem of climate change has driven the search for alternative sources of energy; among them, biomass has great potential as it can be converted into energy (electricity and heat) and biofuels. Biofuels can be found in a gaseous, liquid and solid state. Usually different fractions of biomass are transformed into a specific biofuel; for example, oils are transformed into biodiesel and bioturbosine, while lignocellulosic biomass is used to produce fuel pellets. However, liquid and solid biofuels can be obtained from the integral use of a raw material; this increases the profitability of the processes and reduces the waste derived from the production of biofuels. In the present work, a review of liquid and solid biofuel production processes is carried out with the objective of identifying opportunities for the integral use of biomasses.

KEYWORDS: ENE, biomass, renewable energy, biofuel, pellets, calorific value.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación de energía eléctrica y/o calorífica proviene de los combustibles fósiles, principalmente petróleo, carbón y gas natural. En 2019, el 81 % de la producción mundial de energía se generó a partir de la quema de combustibles fósiles, siendo el petróleo la fuente más usada [1]. En particular, en México, durante el primer semestre de 2018 el 75.88 % de la generación de energía eléctrica se derivó de la quema de combustibles fósiles [2]. Como resultado, el uso excesivo de tales combustibles ha originado problemas de contaminación y cambio climático; en especial, la liberación a la atmósfera de una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, en su mayoría dióxido de carbono (CO_2). Por ejemplo, en el año 2016 se produjeron 33 963 millones de toneladas de CO_2 derivadas de la quema de carbón (44 %), petróleo (33 %), y gas natural (23 %) [3]. La acumulación de las emisiones de CO_2 ha generado un incremento de la temperatura terrestre, la cual está asociada con los cambios climáticos. Por ello, uno de los grandes retos en materia energética es encontrar fuentes de energías alternativas de menor impacto ambiental que los combustibles fósiles; cabe mencionar que la producción de dichos combustibles fósiles se encuentra en declive, por lo que las nuevas fuentes de energía deben ser tanto renovables como competitivas económicamente.

La Ley de Transición Energética en México define a las energías renovables como aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, en procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano; dichas fuentes se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y no liberan emisiones contaminantes al ser empleadas [2]. Entre tales fuentes se encuentran la radiación solar (para generar energía calorífica o eléctrica), el flujo de viento (para generar energía eléctrica o mecánica), las corrientes de agua (para generar energía eléctrica), o el calor del subsuelo (para generar energía eléctrica o calorífica). Otro tipo de recurso natural es la biomasa, que se define como la materia orgánica que se origina y se acumula durante procesos biológicos, como la fotosíntesis [4]. A partir de la biomasa pueden producirse energía eléctrica, calorífica y biocombustibles. Existen diferentes tipos de biomasa, como la agrícola, forestal, de cultivos energéticos, industrial y residual (Fig. 1) y, en general, su composición será lo que definirá los productos que pueden obtenerse de ella.

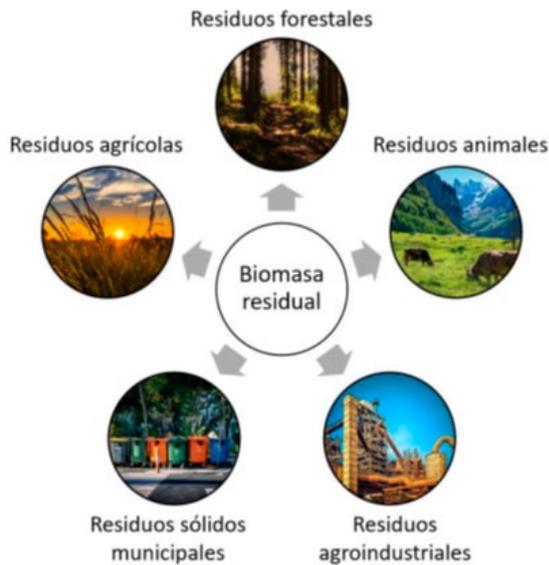


Figura 1. Tipos de biomasa residual

Como se mencionó anteriormente, los biocombustibles se pueden generar a partir de la conversión de la biomasa mediante diferentes procesos de conversión, y se pueden clasificar con base en la materia prima empleada y el proceso de producción en aquellos de primera, segunda, tercera y cuarta generación; a continuación, se proporciona información al respecto de dichas generaciones.

Los biocombustibles de primera generación son todos aquellos producidos a partir de biomasa comestible, como trigo, cebada, maíz y caña de azúcar, así como remolacha azucarera. Estos se generan mediante procesos tanto bioquímicos como químicos, y cumplen con las especificaciones técnicas para su uso; sin embargo, el uso de materias primas comestibles para su producción causó preocupación sobre la seguridad alimentaria, así como los potenciales efectos en la biodiversidad y el uso de las tierras [4]. Por otra parte, en la segunda generación, los biocombustibles se producen a partir de cultivos energéticos y residuos mediante procesos termoquímicos, bioquímicos y químicos. Los cultivos energéticos son especies que se siembran especialmente para generar biocombustibles; aunque éstos no compiten con la alimentación humana, sí lo hacen por tierras de cultivo. Algunos cultivos energéticos incluyen *Jatropha curcas*, higuera y salicornia, entre otros. Por otra parte, los residuos son aquellos materiales que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, y usualmente representan problemas de contaminación por los elevados volúmenes en los que se generan. Entre los residuos se encuentran aquellos provenientes de los cultivos y forestales, así como del procesamiento de alimentos.

Ahora bien, los biocombustibles de tercera generación se producen a partir de diferentes microorga-

nismos, tales como las microalgas. En particular, la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal puede realizarse mediante procesos bioquímicos o termoquímicos. Las microalgas poseen múltiples ventajas, tales como su alta tasa de crecimiento, elevado contenido de aceite y baja complejidad estructural; éstas potencian sus numerosas aplicaciones comerciales [5]. Finalmente, los biocombustibles de cuarta generación se elaboran a partir de microorganismos genéticamente modificados, tales como microalgas, levaduras, hongos y cianobacterias. En esta generación se utiliza la capacidad de los microorganismos para convertir el CO_2 en combustible a través de la fotosíntesis. Sin importar la generación a la cual pertenezcan, los biocombustibles pueden ser gaseosos, líquidos o sólidos.

De manera particular, los biocombustibles líquidos son obtenidos a partir de aceites vegetales, grasas animales, o cultivos con alto contenido de azúcares; los procesos de conversión incluyen la fermentación, la transesterificación, o procesos de hidrotreatmento. Por otro lado, los biocombustibles sólidos son materia orgánica densificada, de origen vegetal o animal, susceptibles de utilizarse en aplicaciones energéticas; éstos son obtenidos mediante procesos físicos, tales como compactación, astillado o trituración. Un aspecto interesante de los biocombustibles líquidos y sólidos es que ambos pueden producirse mediante el aprovechamiento integral de una materia prima. Por ejemplo, si se considera como materia prima a la higuera, su aceite puede emplearse para producir un biocombustible líquido (biodiésel, bioturbosina o diésel verde), y el resto de la biomasa puede transformarse en un biocombustible sólido (pellets, briquetas). Este aprovechamiento integral permite incrementar la rentabilidad de los procesos de conversión de biomasa, y al mismo tiempo reducir el número de residuos asociados a la producción de biocombustibles. Así, en el presente trabajo se realiza una revisión de la literatura científica en la que se estudia de manera separada la producción de biocombustibles líquidos y sólidos a partir de diferentes tipos de biomasa; esta información permitirá identificar aquellas oportunidades para el aprovechamiento integral de las biomasa para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Entre los biocombustibles líquidos destacan el biodiésel y la bioturbosina, que se emplean para el transporte terrestre y aéreo, respectivamente. A continuación,

se presenta información sobre las materias primas y los procesos de conversión que pueden emplearse para la producción de estos biocombustibles líquidos.

en biomasa, y representan el insumo de tercera generación para producir biodiésel. Dada su eficiencia fotosintética para producir biomasa, altas tasas de crecimiento y gran contenido de aceite se consideran el único insumo

Tabla 1. Materias primas para la producción de biodiésel [9].

ACEITES VEGETALES COMESTIBLES	ACEITES VEGETALES NO COMESTIBLES	ACEITES DE SEMILLAS MODIFICADAS GENÉTICAMENTE	GRASAS ANIMALES	ACEITES DE OTRAS FUENTES (NO COMESTIBLES)
Colza Palma Girasol Canola Coco Ajonjolí Soya Cártamo Cacahuate	Brassica carinata Cynara cardunculus Camelia sativa Crambe abyssinica Pongamia Jatropha curcas Ricinus communis	Aceite de girasol de alto contenido de ácido oleico	Sebo de vaca Sebo de búfalo Grasa de pollo Grasa de pescado	Aceites de producciones microbianas Aceite de microalgas

BIODIÉSEL

De acuerdo con la ASTM (American Society for Testing and Materials), el biodiésel se define como ésteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos (FAME). El biodiésel se encuentra en estado líquido, y se obtiene mediante la transesterificación de materias primas con una alta cantidad de triglicéridos. Las materias primas más utilizadas para la fabricación de biodiésel incluyen aceite de girasol, colza, soja y palma, así como aceite usado de cocina, sebo y grasas animales [6]. En la Tabla 1 se muestran las principales materias primas usadas para la elaboración de biodiésel.

Los aceites comestibles como el de soya, palma, canola, girasol, cártamo, coco y cacahuate se consideran insumos de primera generación, por ser los primeros cultivos empleados en la producción del biodiésel [7]. Actualmente, la mayor cantidad del biodiésel se produce mediante aceites comestibles, como el de soya (Estados Unidos), canola (Europa) y palma (Malasia) [8].

Por otra parte, los aceites no comestibles representan una solución para disminuir el uso de aceites comestibles en la producción de biodiésel. Los aceites no comestibles se consideran insumos sostenibles siempre y cuando se cultiven en páramos no aptos para cultivos alimenticios; asimismo, deben eliminar la competencia por alimentos, reducir la deforestación, ser ambientalmente responsables y más económicos que los aceites comestibles. Aunque existen varios cultivos de aceites no comestibles para producir biodiésel, algunos destacados son la jatrofa (*Jatropha curcas*), la higuera (*Ricinus communis*) y la camelina (*Camelina sativa*) [10].

Las microalgas son organismos fotosintéticos que convierten la luz del sol, agua y dióxido de carbono

capaz de cumplir la demanda de combustibles y desarrollarse sustentablemente en el futuro [7], [10]. Actualmente existen numerosas investigaciones para obtener biodiésel mediante la transesterificación de aceites de algas.

El proceso de producción del biodiésel incluye operaciones de reacción y de separación; inclusive, podría involucrar operaciones de pretratamiento dependiendo del tipo de insumo empleado. La transesterificación es la reacción mediante la cual el aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol (metanol) en presencia de un catalizador líquido para producir una mezcla de ésteres metílicos (biodiésel), y glicerol como subproducto [11], [12]. Existen tres tipos de reacciones de transesterificación: catálisis homogénea, catálisis heterogénea y reacción no catalítica. A continuación, se proporciona información sobre cada una de ellas.

El proceso de catálisis homogénea implica que el catalizador se encuentra en estado líquido al igual que los reactivos, éste puede ser un catalizador ácido o básico [11]. Por otro lado, la transesterificación de aceites vegetales con metanol supercrítico (SCM, por sus siglas en inglés) se realiza sin usar ningún catalizador. El fundamento de la conversión mediante un fluido supercrítico es aprovechar las propiedades del alcohol en tales condiciones, que ocasionan que éste además de ser reactivo actúe como catalizador ácido de la reacción [13]. El proceso no catalítico, o supercrítico, fue propuesto en 2001 y permite manejar altos contenidos de agua y ácidos grasos [14]. Por último, la catálisis heterogénea es un método alternativo de producción de biodiésel que consiste en utilizar catalizadores sólidos para la reacción de transesterificación; así, las desventajas de usar catalizadores líquidos se superan [15]. Los catalizadores heterogéneos poseen una gran cantidad de sitios básicos en su superficie para la reacción de



transesterificación; por lo que se han evaluado diversos catalizadores depositados en materiales soporte como alúminas, hidrocalcitas, zeolitas y sílicas.

BIOTURBOSINA

La bioturbosina, también conocida como bioqueroseno parafínico sintético, es un combustible de aviación producido a partir de cualquier tipo de biomasa. Está conformada por una mezcla de hidrocarburos lineales y ramificados; su densidad energética y sus propiedades físicas se apegan a las características de la turbosina convencional que es producida a partir de combustibles fósiles [16]. Una de las diferencias entre la bioturbosina respecto a la turbosina convencional es que la primera puede o no contener compuestos aromáticos; esto puede provocar fugas en los tanques de almacenamiento de combustibles, por lo que la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) establece en la norma D7566 [17] su uso en mezclas con turbosina de origen fósil hasta un 50 % en volumen.

Los insumos usados para producir bioturbosina son de origen biológico y, por lo tanto, renovable. Precisamente, una de las claves para implementar con éxito la bioturbosina radica en la disponibilidad de insumos sustentables en gran escala.

La mayoría de las investigaciones respecto a la producción de bioturbosina se han encaminado a considerar los cultivos energéticos como materia prima (biomasa de segunda generación). Estos cultivos energéticos deben cumplir con criterios específicos, de modo que la producción del biocombustible minimice sus impactos ambientales y socioeconómicos. Tales criterios incluyen que la materia prima utilizada no debe competir con el sector alimenticio, ser sumidero de fuentes de agua potable, ni causar deforestación. En la Tabla 2 se muestran las principales materias primas usadas para la producción de bioturbosina.

Los procesos de producción de la bioturbosina deben tener menor impacto ambiental que la producida por parte de los combustibles fósiles. Existen diferentes procesos para la obtención de la bioturbosina según la naturaleza de la biomasa, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Fischer-Tropsch (FT)
- Hidrotratamiento (HEFA)
- Isoparafinas sintéticas (SIP)
- Alcohol a turbosina (ATJ)

El proceso Fischer-Tropsch (FT), desarrollado por los alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch en 1920, fue uno

de los primeros procesos certificados por la ASTM en 2009 para la fabricación de combustible de aviación [19]. El proceso FT consiste en la conversión de la biomasa mediante un proceso de gasificación a alta temperatura para la obtención de una mezcla gaseosa rica en hidrógeno y monóxido de carbono, conocida como gas de síntesis o syngas. Posteriormente se realiza la síntesis de Fischer-Tropsch para convertir catalíticamente el gas de síntesis a productos líquidos que puedan ser refinados en querosenos parafínico sintéticos, gasolina y lubricantes [19].

Por otra parte, también se cuenta con el proceso de hidrotratamiento de ácidos grasos y ésteres (HEFA, por sus siglas en inglés); al producto de este proceso se le denomina turbosina renovable hidroprocesada (HRJ). El proceso incluye hidrogenación catalítica, desoxigenación, hidroisomerización e hidrocrackeo para convertir triglicéridos en un producto que contiene cadenas de carbón C8-C15.

La turbosina renovable hidrotratada (HRJ o SPK) es equivalente a la del petróleo convencional con la ventaja de tener un número de cetano alto, menores emisiones de gases de efecto invernadero, y contenidos más bajos de azufre y compuestos aromáticos [20].

En el proceso de isoparafinas sintéticas (SIP, por sus siglas en inglés) se realiza la manipulación genética de las rutas metabólicas celulares, por lo que es posible diseñar microorganismos que convierten los azúcares de origen vegetal, a partir de cultivos como caña de azúcar o el sorgo, en moléculas específicas. Dichas moléculas pueden ser hidrocarburos que sustituyan a los productos petroquímicos, incluidos los biocombustibles para el transporte terrestre y aéreo.

El proceso alcohol a turbosina (ATJ, por sus siglas en inglés) transforma el alcohol derivado de la fermentación de azúcares de diversas fuentes (maíz, caña, biomasa celulósica) en un biocombustible mediante su deshidratación, oligomerización e hidrogenación [20]. En el proceso ATJ, los alcoholes de cadena corta (etanol, metanol, butanol), y larga (pentanol en adelante) son producidos convencionalmente mediante fermentación de azúcares o almidón; posteriormente, estos alcoholes son convertidos químicamente en alcanos de cadena más larga, como por ejemplo los constituyentes de la bioturbosina.

Cabe mencionar que en los procesos de obtención de biodiésel y bioturbosina a partir de aceites —comestibles o no—, mencionados en las Tablas 1 y 2, se genera una gran cantidad de residuos, por lo que es posible utilizar dichos residuos para la fabricación de pellets combustibles. En la sección siguiente se brindará información sobre los biocombustibles sólidos.

BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Entre los biocombustibles sólidos destacan los pellets combustibles, debido a su facilidad de manejo y transporte. Los pellets combustibles pueden emplearse para la generación de energía eléctrica y térmica, e inclusive como materia prima para producir otros biocombustibles. A continuación, se presenta información sobre las materias primas y los procesos de conversión que pueden emplearse para la producción de estos biocombustibles sólidos.

PELLETS COMBUSTIBLES

La norma ISO 17225-6 define a los pellets como un biocombustible densificado hecho de biomasa molida con o sin aditivos y unificado en forma de cilindros; generalmente, los pellets tienen diámetros < 25 mm, de longitud entre 3.15 mm y 40 mm con extremos rotos, y son obtenidos por compresión mecánica [21].

En el proceso de producción de pellets se consideran varias etapas, las cuales se muestran en la Fig. 2: acondicionamiento de humedad, molienda, densificado, y enfriado. La primera etapa consiste en el acondicionamiento de la humedad del residuo, que podría implicar una operación de secado o de humidificación; esta etapa puede o no ser necesaria dependiendo de los valores de humedad del residuo. Una vez que la humedad ha sido ajustada, se debe reducir el tamaño de partícula. Para ello puede ser necesario una trituración o una molienda; la condición óptima depende de la morfología de la biomasa y de cómo ésta afecta la resistencia mecánica y densidad del pellet. Posteriormente, la biomasa es densificada mediante una peletizadora, donde la presión tiene un efecto clave. Después se lleva a cabo el proceso de enfriado, el cual es fundamental, ya que el pellet adquiere dureza cuando se enfría



Figura 2. Etapas de la producción de pellets combustibles

En comparación con la biomasa de la cual provienen, los pellets ocupan poco espacio debido a su alta densidad; asimismo, son de fácil manejo y los costos de

transportación son menores [22]. Cabe mencionar que la combustión mejora significativamente cuando la biomasa se encuentra densificada en forma de pellets, que cuando se encuentra en su estado natural [23], [24], [25], por lo que se aprovecha de una manera que resulta más eficiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL Y PELLETS A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

En esta sección se presentan las diferentes materias primas que han sido reportadas en la literatura para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos; cabe mencionar que dichos reportes se han realizado de manera separada, pero se compilan en el presente trabajo con el objetivo de incentivar su aprovechamiento integral.

PALMA Y SUS RESIDUOS

Kansedo *et al.* [26] realizaron la conversión de aceite de palma con un catalizador montmorillonite K_{SF} (en polvo), mediante transesterificación heterogénea para obtener biodiésel. Para ello realizaron un diseño central compuesto de cuatro factores con cinco niveles cada uno: temperatura de reacción (50, 80, 120, 155 y 190 °C), tiempo de reacción (60, 120, 180, 240 y 300 min), relación metanol/aceite (1:4, 1:6, 1:8, 1:10 y 1:12 mol mol⁻¹), y la cantidad del catalizador (1, 2, 3, 4 y 5 wt%). Los resultados muestran que se alcanzó una conversión del 79.6 % utilizando las siguientes condiciones: temperatura de 190 °C, tiempo de reacción de 180 min, relación metanol/aceite a 1:8 mol mol⁻¹ y catalizador al 3 %.

Por otro lado, Chaiyaomporn *et al.* [27] estudiaron la producción de biodiésel a partir del aceite de la fibra de palma y la cáscara de la palma, y utilizaron los residuos sobrantes para producir pellets junto con residuos de glicerol. La biomasa se secó mediante energía solar durante 24 h. Luego, se molió la fibra y la cáscara y se seleccionaron las partículas con tamaños más pequeños de 0.5 mm, 0.5 a 1.0 mm, y más pequeños de 2.0 mm (tamaño de partículas mezcladas).

El combustible peletizado se produjo con fibra de palma con residuos de glicerol como adhesivo; posteriormente, se variaron los porcentajes de fibra de palma (50 %, 60 %, 70 % y 80 %), la cantidad de agua caliente (0 %, 10 % y 20 %), y la cantidad de glicerina (10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %) con tres diferentes tamaños de partículas.



La proporción óptima de combustible peletizado fue de 50:10:40 (fibra de palma, agua y desechos de glicerina) con tamaño de partícula menor de 2 mm.

En estas condiciones óptimas, los pellets tuvieron una densidad específica de 982.2 kg/m³, y un poder calorífico de 22.5 MJ/kg; asimismo, el contenido de humedad fue del 5.91 %, la materia volátil fue del 88.25 %, el contenido de carbono fijo fue del 1.58 %, y el contenido de cenizas fue del 4.23 %, lo cual fue superior a la norma.

El contenido de cenizas se logró reducir mediante el mezclado de la cáscara de la palma con la materia prima de fibra de palma, siendo la proporción óptima de 80:20 (fibras de palma:cáscara de palma). Con esta relación de materia prima, los pellets presentaron una densidad específica de 774.8 kg/m³, y un valor calorífico de 19.71 MJ/kg. La producción de pellets a partir de residuos de la industria del aceite de palma crudo y de la producción de biodiésel es factible, y el poder calorífico es competitivo.

ALGAS MARINAS Y SUS RESIDUOS

Maceiras *et al.* [28] estudiaron las macroalgas marinas como materia prima alternativa para la producción de biodiésel. Las especies de algas marinas estudiadas incluyen *Fucus spiralis*, *Saccorhiza polyschides*, *Sargassum muticum*, *Codium tomentosum*, *Ulva rigida*, *Enteromorpha intestinalis*, *Ascophyllum nodosum*, *Pelvetia canaliculata*; estas especies se lavaron con agua y se secaron al sol durante unos días, ya que el agua inhibe la transesterificación.

Con el fin de determinar el contenido de aceite de las algas, se utilizó la técnica Soxhlet con hexano como solvente durante 4 h según la norma UNE-EN ISO 734-1. Todos los experimentos se llevaron a cabo utilizando un frasco de vidrio de fondo redondo de 0.5 l. El disolvente se separó del aceite por destilación, y fue reutilizado en el siguiente lote de extracción.

El proceso de transesterificación se llevó a cabo simultáneamente con la extracción del aceite para evitar el paso de la purificación del aceite obtenido.

La reacción se llevó a cabo al mezclarse 1000 g de algas secas con 2.5 l de hexano, y se introdujeron en un reactor termostático. La mezcla se calentó a 60 °C y después se añadió al reactor metanol, en el que se había disuelto previamente hidróxido de sodio (NaOH); en la parte superior del reactor se acopló una columna de refrigeración para condensar los reactivos evaporados. Los productos de la reacción fueron separados mediante decantación; cabe mencionar que para obtener el biodiésel crudo era necesario eliminar el disolvente por destilación. Las condiciones óptimas de operación fueron temperatura de 60 °C, tiempo de reacción de 11 h, 2.5 l de n-hexano por cada 1000 g de algas, una relación molar entre el metanol y el aceite de 300:1 y 1 % de masa (g NaOH/g macroalgas), obteniendo un rendimiento de 11.42 %.

Los residuos de las macroalgas obtenidos después de la transesterificación se sometieron a análisis para la determinación de su contenido en humedad y su poder calorífico. El contenido de humedad se determinó con la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX y su poder calorífico con la norma UNE 164001EX.

Tabla 3. Contenido de humedad y poder calorífico de los residuos de macroalgas

MUESTRA	HUMEDAD (%)	PCS A H= 17.303 (KCAL/ KG)	PCI A H= 17.303 (KCAL/ KG)
1	17.50	2900.32	2537.65
2	17.16	2855.64	2492.98
3	17.16	2900.81	2538.15

Nota: pcs: Poder calorífico superior; pci: Poder calorífico inferior

Tabla 2. Materias primas para la producción de bioturbosina [18].

ACEITES DE CULTIVOS ALIMENTICIOS	ACEITES DE CULTIVOS NO ALIMENTICIOS	ACEITES/GRASA RESIDUALES	ACEITES DE MICROORGANISMOS	ACEITES DE HALÓFITAS	MATERIAL LIGNOCELULÓSICOS
Soya Palma Girasol Cártamo Canola	Camelia sativa Jatropha curcas Ricinus communis Salicornia	Sebo de res Grasa de aves Manteca de cerdo Aceites residuales de cocina Residuos municipales	Aceite de microalgas	Kosteletzkya pentacarpos Salicornia bigelovii	Biomasa residual de pastos Residuos agroindustriales Residuos forestales y madereros

El resultado promedio de contenido de humedad obtenido de este trabajo fue del 17.3 %, por lo que es similar al hueso de aceituna (12-20 %) y cáscara de nuez (8-15 %). El poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa para su uso como combustible suele estar entre 1.8 y 4.5 kWh/kg, siendo la potencia de calentamiento inferior de los residuos de macroalgas de 2.932 kWh/kg en promedio; por lo que su uso es factible como combustible. Por tanto, las macroalgas pueden ser utilizadas para la producción de biodiésel (a partir del aceite de macroalgas) y de pellets (con la biomasa residual de las macroalgas).

En investigaciones más recientes se utilizaron la microalga *Scenedesmus* para generar biodiesel y biogás, y los residuos sobrantes fueron utilizados para ser densificados [29]. Antes de las pruebas de peletización, se realizó un tratamiento de secado con el objetivo de reducir la alta humedad de los residuos originales hasta un valor de 10 %. La caracterización de los pellets de microalgas se muestra en la Tabla 4, y se comparan con las especificaciones de la norma ISO 17225-6. En general, los pellets no cumplen con las especificaciones de la norma, en particular aquellas relacionadas con la durabilidad, contenido de nitrógeno, azufre y cenizas.

Tabla 4. Resultados de la caracterización de los pellets de microalga.

PARÁMETRO	RESULTADO	A	B
Humedad (%)	6.10	Cumple	Cumple
Densidad a granel (kg/m ³)	788.00	Cumple	Cumple
Durabilidad (%)	96.56	No cumple	Cumple
Longitud (mm)	23.41	Cumple	Cumple
diámetro (mm)	6.07	Cumple	Cumple
N (%)	6.55	No cumple	No cumple
S (%)	0.48	No cumple	No cumple
Cenizas (%)	18.02	No cumple	No cumple
LHV (MJ/kg)	17.98	Cumple	Cumple
Densidad de energía (MJ/m ³)	14,165.91	No requerido	No requerido

Por otro lado, Álvarez *et al.* [30] investigaron la pro-

ducción de biodiésel y pellets a partir del aceite de cepas de microalgas verdes de *Chlorella vulgaris*; en estos procesos se alcanzaron conversiones de biodiésel entre el 12 y el 27 % respecto al peso seco.

Los residuos de la producción del biodiésel se densificaron y caracterizaron; los resultados obtenidos se compararon con las "Normas europeas para pellets no leñosos graduados" a fin de evaluar su posible uso como combustible en calderas. Los parámetros físicos y químicos analizados, tales como potencia calorífica, contenido de cenizas o porcentaje de humedad, se compararon con los valores marcados en la ISO 17225-6:2014 [21].

Se observa que el Valor Calorífico Superior (HHV) de los pellets de algas, 20 681 kJ/kg, es superior al valor mínimo exigido por la normativa, 14 500 kJ/kg. El contenido de cenizas, que debería ser inferior al 10 % según la norma, resulta 9.78 %. Además, se obtuvo un contenido de humedad cero, verificando los límites legales. Con base en estos datos, se concluyó que los pellets de residuos de algas cumplen los requisitos establecidos para ser considerados un biocombustible comercial

ACEITE DE COLZA Y SUS RESIDUOS

Yuan *et al.* [31] utilizaron el aceite de colza como materia prima para la producción de biodiésel. Para ello realizaron un diseño de experimentos de cuatro factores, cada uno con cinco niveles: relación metanol/aceite (4:1, 5:1, 6:1, 7:1 y 8:1 mol mol⁻¹), concentración del catalizador (0.4, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.6 %), el tiempo de reacción (45, 55, 65, 75 y 85 min), y la temperatura de reacción (25, 35, 45, 55 y 65 °C). La máxima conversión a biodiésel obtenida fue de 84.05 %, con condiciones de operación de relación metanol/aceite de 6:1, concentración de catalizador 1.0 %, un tiempo de reacción de 65 min y 45 °C de temperatura.

Klugmann-Radziemska *et al.* [32] realizaron el proceso de producción de pellets a partir de los residuos de semillas trituradas procedentes de la extracción de

PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA Y PELLETS A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

Olcay *et al.* [33] estudiaron la conversión de los azúcares C5 derivados de la materia prima lignocelulósica para producir hidrocarburos. El rendimiento fue del 55 %; los hidrocarburos incluían la gasolina, bioturbosina y combustible diésel. Las condiciones de operación



fueron 80-140 °C, 5.5-8.27 MPa y un catalizador de Ru/Al₂O₃ para la etapa de hidrocicloadición, y para la etapa de hidrodeshidrogenación se emplearon NaOH y Pt/SiO₂-Al₂O₃.

Simacek *et al.* [34] estudiaron el hidroprocesamiento del aceite de colza a temperaturas entre 310 °C y 360 °C a una presión de hidrógeno de entre 70 y 150 bar; el proceso se llevó a cabo en un reactor de laboratorio con flujo de pistón. El catalizador utilizado fue el Ni-Mo/alúmina. Los productos de la reacción contenían principalmente n-C17 y n-C18, con una baja concentración de otros n-alcanos e isoalcanos; el n-C17 y el n-C18 representaban aproximadamente el 75 % del peso de todos los productos.

Liu *et al.* [35] realizaron la producción de pellets a partir de biomasa leñosa (aserrín de pino (PS)), residuos agrícolas (cáscara de arroz (RH), fibra de coco (CF) y cáscara de coco (CS)), e hidrocarbón (HC), que se preparó a partir de materiales típicos de carbonización hidrotérmica (HTC) de biomasa.

Tabla 5. Resultados de los pellets producidos a partir de biomasa leñosa y residuos agrícolas.

PELLET	HUMEDAD (%)	PODER CALORÍFICO (HHV) (MJ/KG)	DENSIDAD (KG/M3)	CENIZAS (%)
CF pellet	10.07	17.64	984	4.45
RH pellet	8.03	13.90	1093	15.01
CS pellet	4.61	17.59	1101	1.14
PS pellet	5.46	16.13	1141	0.75
CF-HC	3.92	21.55	1153	1.24
RH-HC	5.02	15.08	1334	23.28
CS-HC	4.86	21.49	1153	0.41
PS-HC	1.86	21.74	1191	0.36

La Tabla 5 muestra que los pellets obtenidos cumplen con la humedad final; en particular, los pellets producidos con hidrocarbón, exceptuando el RH-HC, son los que presentan el mayor poder calorífico, además de tener una densidad óptima.

ACEITE/GRASAS RESIDUALES

Bezergianni *et al.* [36] reportaron la conversión de residuos de aceite de cocina para producir bioturbosina usando tres catalizadores: un catalizador de hidrotreatmento, un catalizador de hidrocrackeo suave y un catalizador de hidrocrackeo severo. Utilizaron

condiciones de alta temperatura (330–390 °C) y presión (8.27–13.79 MPa). Como productos se obtuvieron hidrocarburos en el rango de la gasolina y el diésel. El rendimiento más alto fue del 80 % para el diésel a 370 °C y 8.27MPa, con un catalizador de hidrotreatmento.

Hanafi *et al.* [37] utilizaron como materia prima los residuos de grasas de pollo para producir bioturbosina, naftas y gases ligeros. En su trabajo reportan las condiciones óptimas de operación y la energía de activación, obteniendo un rendimiento del 53 % en la fracción queroseno/diésel. Las condiciones de operación fueron una temperatura de 400 °C, una presión 6 MPa, una alimentación de H₂/aceite de 450 v/v y tiempo de reacción de 4 h.

Por otro lado, Wang *et al.* [38] hicieron la evaluación del potencial de la biomasa peletizada de diferentes residuos sólidos municipales para su uso como combustible sólido. Los residuos incluyeron estiércol de perro, estiércol de caballo, residuos de orujo de manzana y residuos de té. Después de combinar los residuos, el aglutinante y el agua, la mezcla obtenida se sometió a un proceso de peletización.

Los pellets se produjeron en una peletizadora de partículas de biomasa de molde plano, con una capacidad de producción media de 300-500 kg/h. Los diámetros de los pellets variaban entre 4 y 5 mm, y la longitud media era de 20 mm. Los resultados obtenidos se muestran la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del análisis de proximidad de los pellets producidos a partir de residuos municipales.

PELLET	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	HHV (MJ/KG)	LHV (MJ/KG)
Estiércol de perro (DN)	11.7	20.24	17.41	12.98
Estiércol de caballo (HN)	12.6	17.81	16.55	12.51
Residuos de orujo de manzana (AN)	18.9	5.31	16.02	11.77
Residuos de Té (TN)	10.3	8.74	19.52	15.99

Los resultados de las propiedades mecánicas y térmicas muestran que los pellets DN, HN y TN exhibieron excelentes propiedades mecánicas y térmicas; asimismo, estos pellets presentaron altos valores caloríficos (HHV

> 16.30 MJ/kg), alta resistencia a los choques mecánicos (> 99 %), alto contenido de materias volátiles, y óptimos contenidos de cenizas y temperaturas de reblandecimiento .

ACEITE DE JATROFA Y SUS RESIDUOS

Rizo-Acosta *et al.* [39] estudiaron el coprocesamiento de una mezcla de aceite de jatrofa no comestible, n-hexadecano y 4,6-dimetildibenzotiofeno; la reacción se llevó a cabo sobre NiMo/Al₂O₃ a 339.85-359.85 °C y 8 MPa. También se realizó el hidrocraqueo del n-C₁₆ y las n-parafinas generadas a partir de los ácidos carboxílicos; las conversiones más altas fueron entre 81.04-99.60 %.

Por otro lado, Sinha *et al.* [40] convirtieron el aceite de la jatrofa a 8 MPa, 380-440 °C, una relación de H₂/ volumen de alimentación de 2500, un catalizador Ni-Mo/γ-Al₂O₃; la conversión se llevó a cabo en dos reactores a escala laboratorio tipo microcanal y monolítico. Los resultados muestran una proporción rendimiento aceite/bioturbosina en peso de 46 % para el microcanal y 36.2 % para el monolítico.

Ramírez *et al.* [41] analizaron y determinaron las características óptimas de combustión y la durabilidad mecánica de pellets elaborados a partir de la cáscara (Jsh) y el biocarbón de torta de semilla (SCB) de *Jatropha curcas*. Con el fin de evaluar el comportamiento de los pellets se utilizaron mezclas SCB-Jsh (100, 75, 50, 25 y 0 % cada una), dos tamaños de partícula (2 y 4 mm), y agua añadida antes del proceso de peletización (15 % y 25 %). Los pellets compuestos de 50 % Jsh y 50 % SCB, con 25 % de agua adicional y un tamaño de partícula de 4 mm presentaron la mayor durabilidad mecánica (96.83 %) y un mayor poder calorífico (22.14 MJ/kg). La combustión de los pellets obtenidos a estas condiciones de operación en un quemador industrial mostró temperaturas medias que oscilan entre 300 y 350 °C, con una temperatura máxima de 460 °C. La mezcla estudiada se recomienda para uso industrial en grandes quemadores, ya que se genera un bajo porcentaje de cenizas, y su costo energético [USD/MJ] es 60 % menor que el del GLP.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se revisaron diferentes alternativas para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos a partir de diferentes biomásas. La revisión de literatura muestra que diferentes fracciones de la misma biomasa pueden emplearse para generar biodiésel, bioturbosina, así como pellets combustibles. Ade-

más, los estudios muestran que el aprovechamiento de las fracciones se ha propuesto por separado, por lo que un área interesante es el uso integral de la biomasa para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos.

Se puede esperar que desde el punto de vista económico y ambiental el aprovechamiento integral de la biomasa permita que los biocombustibles obtenidos tengan precios más competitivos y un menor impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero brindado por Conacyt mediante la beca de manutención de L.A. Rodríguez Romero.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency. (2019). [Online]. Available: <http://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>
- [2] Secretaria de Energía, "Reporte de avances de energías limpias," 2018.
- [3] International Renewable Energy Agency. (2018). [Online]. Available: <https://www.irena.org/Statistics>
- [4] M. Guo, W. Song and J. Buhain, "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 712-725, 2015.
- [5] H. A. Alalwan, A. H. Alminshid and H. A. S. Aljaafari, "Promising evolution of biofuel generations," *Renewable Energy Focus*, pp. 127-139, 2019.
- [6] S. M Garrido, "Tecnología, territorio y sociedad, producción de biodiesel a partir de aceites usados," *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 37, pp. 75-86, 2010.
- [7] A.E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. Mahlia, H. H. Masjuki and S.A. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2070-2093, 2012.
- [8] M. Stoytcheva and G. Montero, "Biodiesel, Feedstocks and Processing Technologies," CROACIA IN TECHNOLOGIES, 2011.
- [9] Secretaria de Energía, "Reporte de Inteligencia Tecnológica, Biodiésel," Instituto Mexicano del petróleo, 2018.
- [10] M. Tabayabaei, K. Karimi, I. S. Horvatáh and R. Kumar, "Recent trends in biodiesel production," *Biofuel Research Journal*, pp. 258-267, 2015.
- [11] S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout and A. K. Dalai, "Production first and second-generation biofuels: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable*



Energy Reviews, vol. 14, pp. 578-597, 2010.

[12] G. Knothe, J. Krahl and J. Van Gerpen, *The Biodiesel Handbook*, Urbana, Illinois: AOCS Press, 2010.

[13] Y. Warabi, D. Kusdiana and S. Saka, "Biodiesel fuel from vegetable oil by various supercritical alcohols," *App. biochem. biotech.* pp. 793-801, 2004.

[14] S. Saka and D. Kusdiana, "Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol," *Fuel*, vol. 80, pp. 225-231, 2011.

[15] J. P. Da Costa Evangelista, A. D. Gondim, L. D. Souza and A. S. Araujo, "Alumina-supported potassium compounds as heterogeneous catalysts for biodiesel production: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 887-894, 2016.

[16] E. Nygren, K. Aleklett and M. Hook, "Aviation fuel and future oil production scenarios," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 4003-4010, 2009.

[17] ASTM International, "ASTM D7566-16, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons," West Conshohocken, PA, 2016.

[18] Secretaria de Energía, "Reporte de Inteligencia Tecnológica, Bioturbosina," Instituto Mexicano del petróleo, 2018.

[19] J. C. Vigiú, N. Ullrich, P. Porot, L. Bournay, M. Hecquet and J. Rousseaus, "Biofuel project: Targeting the development of second-generation biodiesel and biojet fuels," *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 68, pp. 935-946, 2013.

[20] W. C. Wang and L. Tao, "Bio-jet fuel conversion technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, 2016.

[21] ISO, 17225-6:2014, *Solid Biofuels-Fuel specifications and classes-Part 6: Graded non-woody pellets*, 2014.

[22] C. Mock, H. Park, C. Ryu, V. Manovic and S. C. Choi, "Particle temperature and flue gas emission of a burning single pellet in air and oxy-fuel combustion," *Combustion and Flame*, vol. 213, pp. 156-171, 2020.

[23] T. Zeng, N. Weller, A. Pollex and V. Lenz, "Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices," *Fuel*, vol. 184, pp. 689-700, 2016.

[24] T. Zeng, A. Pollex, N. Eller, V. Lenz and M. Nelles, "Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options," *Fuel*, vol. 212, pp. 108-116, 2018.

[25] P. Pradhan, A. Arora and S. M. Mahajani, "Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 43, pp. 1-14, 2018.

[26] J. Kansedo, K. Teong Lee and S. Bhatia, "Bio-

diesel production from palm oil via heterogeneous transesterification," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, pp. 271-276, 2009.

[27] K. Chaiaomporn and O. Chavalorit, "Fuel pellets production from biodiesel waste," *Environment Asia*, vol. 3, pp. 103-110, 2010.

[28] R. Maceiras, M. Rodríguez, A. Cancela, S. Urréjola and A. Sánchez, "Macroalgae: Raw material for biodiesel production," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3318-3323, 2011.

[29] M. T. Miranda, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, I. Montero and C. V. Rojas, "Physical-energy characterization of microalgae *Scenedesmus* and experimental pellets," *Fuel*, vol. 226, pp. 121-126, 2018.

[30] P. Álvarez, J. L. Salgueiro, L. Pérez, A. Cancela, A. Sánchez and L. Ortiz, "Total use of Microalgae as feedstock for biodiesel and pellet production," *Int. J. .Env. Res.*, vol. 10, pp. 637-644, 2016.

[31] X. Yuan, J. Liu, G. Zeng, J. Shi, J. Tong and G. Huang, "Optimization of conversion of waste rapeseed oil with high FFA to biodiesel using response surface methodology," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1678-1684, 2008.

[32] E. Klugmann-Radziemska and K. Ciunel, "Rapeseed Pellet- A byproduct of Biodiesel production- As an excellent Renewable Energy Source," *Chem. Didact Ecol Metrol.*, vol. 18, pp. 109-119, 2013.

[33] H. Olcay, A. V. Subrahmanyam and R. Xing, "Production of renewable petroleum refinery diesel and jet fuel feedstocks from hemicellulose sugar streams," *Energy and Environmental Science*, vol. 6, pp. 205-216, 2013.

[34] P. Simacek, D. Kubicka, G. Sebor and M. Pospisil, "Properties of hydroprocessed rapeseed oil," *Fuel*, vol. 89, pp. 611-615, 2010.

[35] Z. Liu, A. Quek and R. Balasunramanian, "Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1315-1322, 2014.

[36] S. Bezergianni, A. Kalogianni and A. Dimitriadis, "Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing," *Fuel*, vol. 93, pp. 638-641, 2012.

[37] S. A. Hanafi, M. S. Elmelawy and N. H. Shalaby, "Hydrocracking of waste chicken fat as a cost-effective feedstock for renewable fuel production: a kinetic study," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, pp. 531-537, 2016.

[38] T. Wang, Y. Li, J. Zhang, J. Zhao, Y. Liu, L. Sun, B. Liu, H. Mao, Y. Lin, W. Li, M. Ju and F. Zhu, "Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel," *Waste Management*, vol. 74, pp. 260-266, 2018.

[39] P. Rizo-Acosta, M.T. Linares-Vallejo and J.A.

Muñoz-Arroyo, "Co-hydroprocessing of a mixture: Vegetable oil/n-hexadecane/4,6-dimethyldibenzothio-pene for the production of sustainable hydrocarbons. A kinetic modeling," *Catal Today*, vol. 234, pp. 192-199, 2014.

[40] A.K. Sinha, M.G. Sibi, N. Naidu, S.A. Farooqui, M. Anand and R. Kumar, "Process intensification for hydro-processing of vegetable oils: experimental study," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, pp. 19062-70, 2014.

[41] V. Ramírez, J. Martí-Herrero, M. Romero and D. Rivadeneira, "Energy use of Jatropha oil extraction wastes: Pellets from biochar and Jatropha shell blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, pp. 1095-1102, 2019.