



## PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO. PARTE 2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y ÁREAS DE OPORTUNIDAD.

## PRODUCTION OF BIOFUELS IN MEXICO. PART 2. PRODUCTION PROCESSES AND OPPORTUNITY AREAS.

Fernando Israel Gómez-Castro<sup>1\*</sup>, Claudia Gutiérrez-Antonio<sup>2</sup>, Salvador Hernández<sup>1</sup>, Carolina Conde-Mejía<sup>3</sup>, Antioco López-Molina<sup>3</sup>, Ricardo Morales-Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

<sup>2</sup> Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/n, Col. Las Campanas, Querétaro, Querétaro, 76010, México.

<sup>3</sup> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Carretera Villahermosa-Comalcalco km. 27, Jalpa de Méndez, Tabasco, 86200, México.

\*Autor de correspondencia. Correo electrónico: [fgomez@ugto.mx](mailto:fgomez@ugto.mx)

### Resumen

En las últimas décadas, uno de los principales retos para los ingenieros ha sido el desarrollo de tecnologías que permitan generar energía, para asegurar la cobertura global de la demanda con un reducido impacto ambiental. El uso de combustibles en los medios de transporte, ya sea terrestre o aéreo, ha ocasionado especial atención debido a su alta tasa de crecimiento. En particular, en el sector transporte se han desarrollado combustibles alternativos a los derivados del petróleo; no obstante, se ha generado mucha inquietud en la población con relación a si son o no ambientalmente amigables, si en realidad serán capaces de sustituir a los combustibles fósiles, e inclusive si su producción es o no ética. Así pues, en este trabajo se describirán las ventajas y desventajas del uso de estos combustibles alternos, también conocidos como biocombustibles; con especial énfasis en los que tienen potencial para ser empleados en el sector transporte, así como los retos que deben superarse para la implementación de una industria de biocombustibles en México.

Palabras clave: biocombustibles, tecnologías de producción, producción en México.

### Abstract

*On the last decades, one of the main challenges for the engineers has been the development of technologies for energy production, which allows ensuring the global coverage of the demand with a low environmental impact. The use of fuels in transportation devices, either terrestrial or aerial, has caused interest due to its high growth rate. For this particular sector, alternative fuels have been developed; nevertheless, uneasiness has been generated among the citizens, in terms of their environmental impact, their potential to replace the fossil fuels, and even on the ethical issues associated with their production. With this in mind, in the present work the advantages and disadvantages on the use of such alternative fuels, or biofuels, are described, mainly for those with potential use in the transport sector. Additionally, some of the challenges to overcome for the implementation of a biofuel industry in Mexico are discussed.*

*Keywords: biofuels, production technologies, production in Mexico.*

## Introducción

El uso de combustibles para la producción de energía es imperante en sectores como el industrial y el de transporte. En el caso del sector transporte, los motores de la mayoría de los vehículos empleados en la actualidad funcionan a través de la quema de gasolina o diésel, los cuales son fracciones del petróleo. En el caso del transporte aéreo, el combustible empleado es la turbosina, la cual es también una fracción del petróleo. Así pues, es evidente que el sector del transporte es aún dependiente de la producción de petróleo. Adicionalmente, la producción de petróleo es inestable, y el uso de sus derivados es parcialmente responsable del fenómeno de calentamiento global. Debido a esto, la búsqueda y aprovechamiento de fuentes alternativas de energía es indispensable.

En los últimos años se han tenido grandes avances en el aprovechamiento de fuentes renovables de energía. Para el sector transporte se han desarrollado combustibles líquidos alternativos, los cuales son parte de los denominados biocombustibles, teniendo como objetivo inicial la sustitución parcial de los combustibles fósiles. No obstante, algunos biocombustibles líquidos también pueden ser empleados para satisfacer las necesidades energéticas de la industria. En la actualidad, existen factores tanto técnicos como de disponibilidad de materia prima que complican la sustitución total de combustibles fósiles con biocombustibles líquidos; por ello, ambos combustibles se emplean en mezclas. Por otra parte, en algunas industrias se requieren combustibles sólidos, como el carbón mineral y la madera. Como es bien sabido el carbón mineral es un combustible no renovable, por lo que ha habido un creciente interés en el desarrollo de combustibles sólidos renovables o biocombustibles sólidos; adicionalmente, dicho desarrollo permitiría reducir el uso de la madera, que implica la tala de árboles y una posible deforestación. Asimismo, desde hace algunas décadas se han desarrollado biocombustibles gaseosos, los cuales se emplean para satisfacer necesidades de calentamiento principalmente.

Los biocombustibles (líquidos, sólidos y gaseosos) poseen interesantes ventajas, entre las que destacan que podrían obtenerse a partir de materia prima considerada como desecho; y, en general, emiten menores cantidades de gases de efecto invernadero al ser quemados, en comparación con los combustibles fósiles. De acuerdo con

varios estudios (Davis y col., 2009; Morales y col., 2015), los biocombustibles elaborados a partir de materias primas de desecho pueden tener un impacto ambiental positivo si se considera todo el ciclo de vida del combustible; es decir, la cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten en toda la cadena de producción es menor que la cantidad absorbida por los distintos cultivos que se emplean como materia prima. Sin embargo, para que lo anterior sea cierto es necesario que tanto la cadena de suministro como los procesos de producción sean eficientes. A pesar de los retos, la producción de los combustibles renovables sigue siendo un tema de interés para diversas áreas del conocimiento; debido a que pueden ayudar al desarrollo de las economías locales y regionales, generando una mayor interacción entre los sectores agrícola, industrial y social.

Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo presenta una descripción de los principales biocombustibles que pueden producirse en el país, considerando las materias primas más promisorias (descritas en la primera parte). Por otra parte, se discutirán algunos de los principales retos y oportunidades a futuro, los cuales, de superarse, darán pie al desarrollo de una industria mexicana de biocombustibles económica y ambientalmente sustentable.

## 2. Aceites vegetales

### 2.1 Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible que se emplea mezclado con diésel fósil tanto en maquinarias como en motores diésel; esta mezcla es necesaria debido a que el biodiésel puro puede desgastar algunas de las partes de hule en los motores, tapar los filtros o causar fugas en los sellos, particularmente a bajas temperaturas (Festel, 2008). El biodiésel se obtiene mediante un proceso conocido como transesterificación, el cual puede ocurrir por tres rutas catalíticas diferentes: homogénea, heterogénea y supercrítica. De manera general, los aceites vegetales contienen componentes complejos denominados triglicéridos, así como ácidos grasos libres. Los triglicéridos se descomponen empleando alcoholes a través de una reacción química denominada transesterificación, para obtener alquil ésteres. De manera similar, los ácidos grasos libres se convierten en alquil ésteres a través de una reacción conocida como esterificación. A la mezcla de alquil ésteres obtenida por el procesamiento de triglicéridos se

Fernando Israel Gómez-Castro, Claudia Gutiérrez-Antonio, Salvador Hernández, Carolina Conde-Mejía, Antioco López-Molina, Ricardo Morales-Rodríguez [pp. 51- 60]

le denomina biodiésel. El biodiésel obtenido contiene aún otros componentes, tales como glicerol, agua y alcohol; por lo que es necesario purificarlo en diversos equipos, empleando agentes externos o energía, con el fin de obtener el biodiésel con la calidad necesaria para

su uso en el motor. La Figura 1 muestra un diagrama simplificado del proceso de producción de biodiésel por catálisis homogénea, que es la más común. Como se ha mencionado, la sección de purificación requiere varios equipos y operaciones.

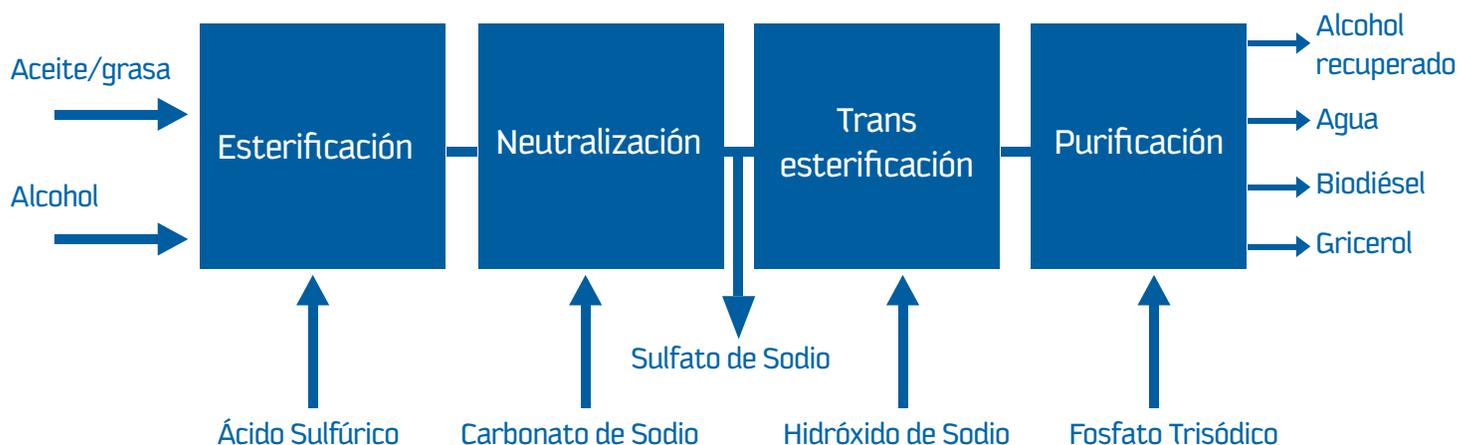


Figura 1. Diagrama simplificado del proceso de producción de biodiésel por catálisis homogénea.

El biodiésel tiene un menor contenido energético que el diésel fósil, lo cual implica que se requiere un mayor volumen de biodiésel para recorrer la misma distancia.

Algunos estudios han reportado que empleando mezclas con un máximo de 10% en volumen de biodiésel no se observa una modificación importante en el desempeño del motor [Can, 2014]. Otros estudios han analizado el efecto del uso de biodiésel en autobuses urbanos durante 6 meses, reportando que el uso de una mezcla al 50% ocasionó un incremento en el consumo de combustible y pérdidas de potencia. A su vez, se reporta que no hubo diferencia en cuanto al servicio y mantenimiento de los autobuses, y que los inyectores no presentaron un comportamiento distinto al de los autobuses que emplearon diésel fósil [Tormos y col., 2009]. Por otra parte, el uso de biodiésel permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debidas a la combustión. Se han realizado estudios donde se observa una disminución de alrededor del 12% en emisiones de monóxido de carbono y partículas, así como del 20% en hidrocarburos remanentes; lo anterior al emplear mezclas con 20% de biodiésel, con un incremento de alrededor del 2% en emisiones de óxidos de nitrógeno [EPA, 2002]. Aunque es posible reducir aún más las emisiones al aumentar el porcentaje de biodiésel, esto podría ocasionar daños en el motor a largo plazo.

Los países de la Unión Europea se encuentran entre los mayores productores de biodiésel, aportando alrededor del 85% de la producción mundial [Ahmad y col., 2011]. No obstante, países como Malasia e Indonesia presentan un alto potencial para la producción de este biocombustible [Atabani y col., 2012]. En el caso de México, ha habido plantas de producción con escalas entre los 9,000 y 18,000 m<sup>3</sup> de biodiésel por año; sin embargo, éstas cerraron entre 2008 y 2011. Por otra parte, se ha reportado la operación de 6 plantas en escala demostrativa, con una capacidad combinada de 4,182 m<sup>3</sup> por año [Riegelhaupt y col., 2016]. Uno de los principales aspectos a cuidar en la producción de biodiésel es su costo final, el cual, dependiendo de las fluctuaciones en los precios del petróleo, usualmente resulta mayor que el costo del diésel fósil. Esto se debe a varios factores, entre ellos el tipo de materia prima empleado, así como la tecnología utilizada para la transformación de la materia prima en biodiésel.

### 2.2 Bioturbosina y diésel verde

La bioturbosina y el diésel verde son mezclas de hidrocarburos con propiedades similares a la turbosina y el diésel fósil, respectivamente. La bioturbosina se emplea como combustible renovable en el sector de la aviación, mientras que el diésel verde se emplea en motores diésel al

Fernando Israel Gómez-Castro, Claudia Gutiérrez-Antonio, Salvador Hernández, Carolina Conde-Mejía, Antioco López-Molina, Ricardo Morales-Rodríguez [pp. 51- 60]

igual que el biodiésel. A continuación, se describe brevemente el proceso de producción de estos biocombustibles. Los triglicéridos presentes en los aceites vegetales pueden ser convertidos a hidrocarburos, a través de un tratamiento con hidrógeno. A su vez, esos hidrocarburos se tratan por medio de reacciones de craqueo e isomerización. Los productos finales de este tipo de procesos son justamente la bioturbosina y el diésel verde. La bioturbosina se emplea mezclada con turbosina fósil hasta un 50% en volumen de bioturbosina, para generar energía en las turbinas de aviones. La bioturbosina no se emplea directamente en las turbinas ya que, dependiendo el proceso de producción, carece de un tipo de componentes denominados aromáticos, cuya ausencia puede ocasionar fugas en los sellos de los tanques de almacenamiento de combustible. Por otra parte, el diésel verde puede emplearse de manera directa en motores diésel. Dado que la bioturbosina y el diésel verde consisten en hidrocarburos, sus propiedades físicas y químicas son prácticamente iguales a las de sus contrapartes fósiles. Debido a que se trata de hidrocarburos, las emisiones de gases de efecto invernadero originadas por la quema de estos biocombustibles

son similares a las de sus contrapartes de origen fósil. Sin embargo, debido a la naturaleza renovable de la materia prima a partir de la cual se obtienen, muchas de esas emisiones, particularmente las de dióxido de carbono, son recapturadas por los plantíos o los procesos de cultivo de micro-algas de donde se obtiene el aceite vegetal. Hasta la fecha se han llevado a cabo diversos vuelos empleando mezclas bioturbosina-turbosina con resultados positivos (Japan Airlines, 2009; Hilkevitch, 2011, KLM, 2016).

Una de las tecnologías más avanzadas para obtener bioturbosina ha sido patentada por la empresa UOP Honeywell, y consiste básicamente en el hidrotreamiento del aceite vegetal o grasa animal, y el posterior craqueo e isomerización de los hidrocarburos obtenidos. Una vez que se producen los hidrocarburos, éstos deben separarse en las fracciones de turbosina y diésel verde, así como en una fracción de gases ligeros, lo cual implica el uso de energía. La principal desventaja de este proceso es la gran cantidad de hidrógeno que se requiere para convertir los aceites vegetales en hidrocarburos.

La Figura 2 presenta un diagrama simplificado del proceso de producción de bioturbosina por hidrotreamiento.

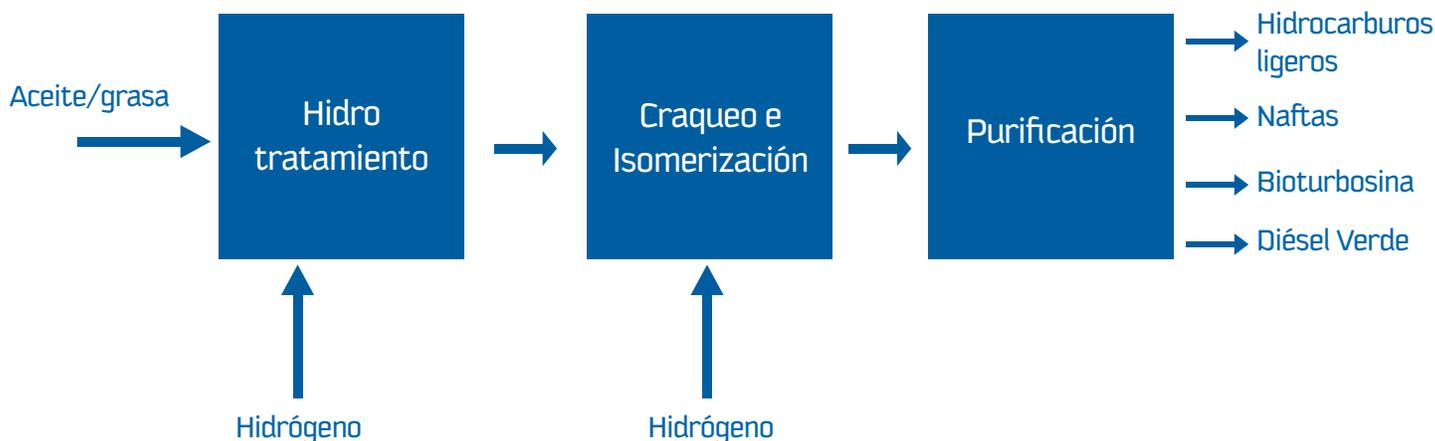


Figura 2. Diagrama simplificado del proceso de producción de bioturbosina por hidrotreamiento.

### 3. Biocombustibles a partir de biomasa sólida

#### 3.1 Bioalcoholes

El término bioalcoholes se refiere a alcoholes obtenidos a partir de biomasa. Uno de los primeros bioalcoholes en despertar el interés de la comunidad científica e industrial fue el bioetanol, el cual es básicamente alcohol etílico. El bioetanol se utiliza como aditivo para la gasolina, ya que mejora la combustión y reduce las emisiones de gases de efecto

invernadero. El bioetanol suele emplearse mezclado con gasolina debido a que tiene un menor contenido energético, lo cual implicaría un mayor consumo de combustible para cubrir la misma distancia, y puede ocasionar problemas para el arranque del motor (McMillan, 1997). Debido a esto, es común emplear mezclas con 10 o 20% de bioetanol en gasolina (Gray y col., 2006). Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado vehículos con motores especiales,

Fernando Israel Gómez-Castro, Claudia Gutiérrez-Antonio, Salvador Hernández, Carolina Conde-Mejía, Antioco López-Molina, Ricardo Morales-Rodríguez (pp. 51- 60)

denominados Flex Fuel, que permiten emplear mezclas con composición de hasta 85% de etanol.

El bioetanol se obtiene principalmente a través de la fermentación de los azúcares contenidos en la caña de azúcar, el maíz u otros materiales. Sin embargo, estos materiales compiten directamente con la alimentación; por lo que se han propuesto a los materiales lignocelulósicos como materias primas alternativas, con particular énfasis a los residuos agroindustriales en el caso de México. En el procesamiento de estos residuos es necesario, en una primera etapa, eliminar la lignina, con el fin de acceder a la celulosa y hemicelulosa; posteriormente, se deben romper dichas moléculas para obtener los azúcares que serán fermentados. Una vez que se ha obtenido el alcohol es necesario separarlo de los sub-productos, principalmente del agua, debido a que el bioetanol debe ser anhidro para ser empleado como aditivo de gasolina. Esto representa un problema técnico, ya que la separación total del agua del etanol no es simple.

Por otra parte, el biobutanol también ha tomado importancia entre los bioalcoholes, debido a que su contenido energético es mayor al del etanol, y puede emplearse directamente en el motor, sin necesidad de mezclarlo con gasolina. El biobutanol es n-butanol (o

alcohol butílico) obtenido a partir del procesamiento de biomasa. El proceso de producción de biobutanol es similar al de bioetanol, utilizando una materia prima con alto contenido de azúcares, la cual se fermenta en un proceso denominado ABE; el nombre del proceso se deriva de los productos que se obtienen: acetona, butanol y etanol. Similar al proceso de producción de bioetanol, la obtención de biobutanol a partir de biomasa lignocelulósica implica un tratamiento previo para acceder a los azúcares contenidos en este tipo de material. En ambos procesos de producción, tanto para bioetanol como biobutanol, uno de los principales problemas es la baja eficiencia de la fermentación, así como la gran cantidad de agua necesaria. Por otra parte, en el caso del biobutanol la obtención de los productos puros resulta complicada, debido a las interacciones que existen entre estos compuestos y el agua. La Figura 3 presenta un diagrama simplificado de un proceso generalizado para la producción de bioalcoholes. El bioalcohol obtenido depende principalmente del tipo de levadura empleado para la fermentación.

Por otra parte, las operaciones necesarias para la purificación dependen del tipo de alcohol obtenido. Finalmente, los sub-productos también varían en términos del alcohol producido.

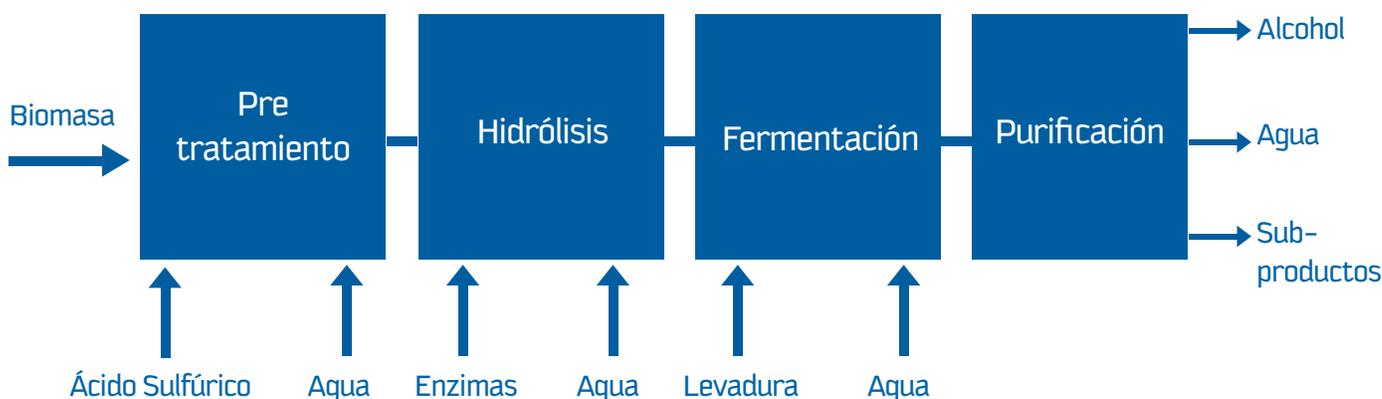


Figura 3. Diagrama simplificado del proceso de producción de bioalcoholes.

### 3.2 Bioturbosina

En la sección 2.2 se mencionó que la bioturbosina puede obtenerse a partir de aceites vegetales. Sin embargo, también se produce a partir de biomasa sólida, particularmente a partir de residuos lignocelulósicos. Una de

las maneras de llevar a cabo esta conversión es por medio de la gasificación de la biomasa; es decir, su vaporización a muy altas temperaturas. El gas obtenido, llamado syngas o gas de síntesis, es utilizado como materia prima para obtener los hidrocarburos que conforman la bioturbosina.

### 3.3 Pellets de biomasa

La biomasa sólida puede emplearse directamente como combustible para hornos u otros dispositivos. Incluso, los residuos agroindustriales pueden quemarse directamente; sin embargo, el contenido de agua en éstos puede reducir la eficiencia de la combustión (Virmond y col., 2012). Por otra parte, el transporte de los residuos puede ser ineficiente y costoso debido a su baja densidad, así como las variaciones en el tamaño y forma de los mismos, reduciendo la cantidad total de biomasa transportada. Una alternativa para evitar estos problemas es la obtención de pellets; es decir, unidades compactas y uniformes de biomasa, las cuales se generan por aplicación de presión. Los pellets de biomasa tienen un contenido de humedad mucho menor que la biomasa de origen; por ello tienen un mayor contenido energético por unidad de masa, y su quema reduce las emisiones de metano, dióxido de carbono e hidrocarburos (Washington State University, 2012). Además, el transporte y almacenaje de pellets es más sencillo que el de la biomasa, debido a su uniformidad y tamaño. La Figura 4 muestra una imagen de pellets obtenidos a partir de cascarilla de arroz. Los pellets de biomasa tienen potencial para reemplazar el uso de madera o carbón como combustible en industrias como la ladrillera (Méndez-Vázquez y col., 2017), o inclusive en la generación de energía eléctrica; así, se reduce el impacto ambiental debido al uso del carbón, la deforestación ocasionada por el uso de madera, y se aprovecha material residual para su empleo como combustible. En México, empresas como Todo Pellet ([www.todopellet.com.mx](http://www.todopellet.com.mx)) producen actualmente pellets de biomasa para su uso como combustible o como alimento para mascotas.



Figura 4. Pellets de cascarilla de arroz

### 3.4 Biogás

El biogás resulta de la descomposición anaerobia de materia orgánica, cuyos componentes principales son el dióxido de carbono y el metano; además, puede ser usado como una fuente de energía térmica y eléctrica. El biogás es considerado como uno de los biocombustibles más eficientes y ambientalmente amigable, ya que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (Fehrenbach y col., 2008). Se puede producir biogás a partir de casi cualquier desecho o materia prima orgánica, excepto las materias con abundante proporción de lignina, por ejemplo, la madera. Entre las fuentes para producir biogás se pueden mencionar el estiércol de vaca y cerdo, pastos, remolachas, maíz, bio-desperdicios, residuos de comida, grasas recuperadas y grasas usadas. Dependiendo del tipo de materia prima empleada es posible obtener rendimientos entre 0.15 y 0.85 metros cúbicos de biogás por kilogramo de materia orgánica seca, con contenidos entre 40 y 80% de metano por metro cúbico de biogás (KTBL, 2012). Diversos estudios indican que las grasas tienen la mayor producción de biogás, seguido de las fuentes ricas en carbohidratos, y por último los abundantes en proteína (Weiland, 2010). El proceso bioquímico por el cual se produce el biogás se denomina metanogénesis, el cual involucra una serie de reacciones bioquímicas complejas; pero que de manera general se pueden dividir en cuatro etapas que se desarrollan de manera simultánea y secuencial: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, y metanogénesis, es justamente en la última etapa donde se forma el metano (Hagos y col., 2017). Algunos factores que afectan de manera importante la producción de biogás son el tiempo de arranque de la reacción y las inestabilidades operacionales (Achinas y col., 2017), así como los costos de instalación, operación y mantenimiento (Wellinger y col., 2013). Un aspecto a tomar en cuenta en la producción de este biocombustible es su alta inflamabilidad, lo cual hace necesario un particular énfasis en la seguridad del proceso. Alemania es el mayor productor de biogás en el mundo, y el país que más accidentes ha registrado (76%), seguido de Italia y Francia con 11% cada uno (Casson Moreno y col., 2016).

#### 4. Retos Y Oportunidades

La implementación de procesos sustentables de producción de biocombustibles en México presenta diversas áreas de oportunidad, relacionadas con aspectos económicos, ambientales y sociales. Reportes previos mencionan que, de seguir la tendencia marcada en 2016, la producción de biodiésel no sería rentable en años posteriores. Sin embargo, la adopción de políticas de apoyo podría mejorar el panorama, con ingresos adicionales para el sector agrícola entre 60,000 y 261,000 millones de pesos entre 2018 y 2036, dependiendo de los objetivos a largo plazo en cuanto a cuota de mercado (Riegelhaupt y col., 2016). Esto marca una de las pautas a seguir en el desarrollo de la industria de biocombustibles. Algunos aspectos adicionales se discuten a continuación.

Respecto a las materias primas, se ha reportado que los aceites vegetales para la producción de biodiésel representan entre 60 y 80% del costo total de producción (Lee y col., 2011); este porcentaje se incrementa a casi 90% en la producción de bioturbosina (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2016). Por ello, una de las áreas de oportunidad implica el uso de aceites de bajo costo; como el aceite usado que es un desecho, y cuyo empleo para producir biocombustibles evitaría su descarga al drenaje. La producción puede complementarse con otros aceites de segunda generación como el de *Jatropha* y de higuera. En el caso de los biocombustibles obtenidos a partir de biomasa sólida, el empleo de residuos agroindustriales representa una alternativa de bajo costo (respecto a materias primas tradicionales como maíz y caña de azúcar), y a su vez dando un segundo uso a este tipo de materia. Sin embargo, tanto los aceites usados como los residuos agroindustriales requieren tratamientos adicionales antes de su transformación a biocombustibles, por lo que el desarrollo de tecnologías eficientes y limpias para tal tarea es indispensable.

Los retos en el área tecnológica son variados. En la producción de biodiésel, el uso de ácidos es común para el tratamiento de aceites de desecho, por lo que se ha propuesto como alternativa el empleo de alcoholes a alta presión (Saka y Kusdiana, 2001). Sin embargo, en ambos casos se requiere el uso de materiales especiales para soportar condiciones de proceso más severas; lo anterior representa oportunidades en el área de seguridad de

procesos, dado que todo proceso tiene asociado un riesgo. Por ello, es necesario desarrollar metodologías para identificar peligros y cuantificar los riesgos en la producción de biocombustibles. También se ha propuesto el uso de enzimas para producir biodiésel; no obstante, la actividad de éstas se inhibe a altas concentraciones de metanol, por lo que mejorar el desempeño de las enzimas y reducir su costo representan retos adicionales. Otra opción en la producción de biodiésel implica el uso de catalizadores sólidos, los cuales promueven la reacción química, reduciendo la necesidad de etapas de purificación posteriores a la reacción; en esta área es necesario el desarrollo de estrategias para reducir la desactivación de los catalizadores. En el proceso de producción de bioturbosina se requieren altos flujos de hidrógeno para convertir los aceites vegetales a hidrocarburos; esto representa un área de oportunidad para la producción total de hidrógeno en el país, así como de la logística para su transporte. De igual manera, es necesario el desarrollo de catalizadores que permitan reducir los requerimientos de hidrógeno en el proceso. En el caso de los procesos de producción de bioalcoholes, el principal problema es el bajo rendimiento de biomasa hacia el producto deseado; por lo que deben desarrollarse microorganismos genéticamente modificados para obtener mayores rendimientos hacia bioetanol o biobutanol. En cualquiera de los procesos mencionados, los productos de la reacción deben separarse de los sub-productos y los reactivos en exceso; esto se lleva a cabo empleando distintas tecnologías de separación, tales como la destilación, la absorción, la adsorción, la extracción líquido-líquido, la pervaporación, la decantación, entre otros. En el caso de la destilación se requiere el uso de vapor de calentamiento, lo cual implica tanto costo de servicios como emisiones de dióxido de carbono debidas a la producción de dicho vapor. Por otra parte, la extracción líquido-líquido requiere el uso de solventes, los cuales deben recuperarse para mejorar la economía del proceso mediante etapas de separación adicionales; el manejo de solventes impacta negativamente la seguridad del proceso, por lo cual es necesario mejorar la selección de los solventes empleando técnicas de diseño de moléculas. Con respecto a la tecnología de adsorción se requiere el uso de materiales adsorbentes, los cuales pueden ser costosos y requieren ciclos de regeneración; así, el desarrollo de materiales económicos y con alta eficiencia de separación es

necesario. En el caso de las membranas de pervaporación, uno de los principales retos consiste en reducir sus costos, así como la generación de estrategias para tratar flujos a escala industrial. En general, para los procesos de separación se requieren estrategias para reducir el costo de los equipos, así como el uso de servicios auxiliares (agua, vapor, electricidad); lo anterior es posible a través de la intensificación e integración de procesos, herramientas con un amplio desarrollo en la Ingeniería Química. Finalmente, se debe promover también la generación de tecnologías híbridas, es decir, la combinación eficiente de dos o más tecnologías de separación. En el caso de la producción de biogás, cuya producción se lleva a cabo en muchas partes del mundo, aún quedan retos técnicos que deben resolverse para lograr su máximo aprovechamiento. Los esfuerzos en el desarrollo de tecnologías más eficientes están concentrados en el pretratamiento de desechos, ya que esta operación aumenta significativamente la producción de metano; otro reto es mejorar la operación de composteo, para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, así como los tiempos de tratamiento. Por otra parte, se requiere desarrollar metodologías y estudios que ayuden a mejorar las condiciones de seguridad de las tecnologías de producción de biogás.

Un aspecto fundamental en el desarrollo de procesos de producción de biocombustibles es la huella hídrica, dado que muchos de ellos emplean grandes cantidades de agua. Por otra parte, se requiere agua en el cultivo de las materias primas, tal como la higuera, *Jatropha* o las micro-algas, para la producción de biocombustibles. Actualmente, una de las líneas de investigación involucra el uso de aguas residuales para los cultivos de micro-algas, lo cual puede contribuir a reducir la huella hídrica en la generación de este tipo de biomasa. También es necesario desarrollar estrategias para recuperar el agua de proceso y reusarla en la medida de lo posible, así como diseñar procesos con bajos requerimientos de agua.

Finalmente, la producción de biocombustibles en procesos individuales, en general, es poco factible en términos económicos. Por ello, es necesario establecer la producción de biocombustibles desde una perspectiva de biorefinería. De manera similar a una refinería tradicional, una biorefinería es la conjunción de diversos procesos de producción interconectados entre sí, de manera que se obtiene un gran número de productos a partir de una

sola materia prima. Esta perspectiva permite la interacción entre los distintos procesos, donde los sub-productos de un proceso pueden ser empleados como reactivos o solventes en un proceso vecino. Como ejemplo, el glicerol que se obtiene como sub-producto en la producción de biodiésel, puede usarse como agente de separación en el proceso de bioetanol. Asimismo, parte de bioetanol puede emplearse como reactivo en la producción de biodiésel. El desarrollo de biorefinerías permite también llevar a cabo integración energética entre los procesos, con importantes reducciones en los requerimientos energéticos, costo de servicios y la emisión de dióxido de carbono por la producción de vapor. En este contexto, es importante visualizar la generación de productos de alto valor agregado dentro de las biorefinerías; tales como el ácido láctico, el furfural, el xilitol, el ácido succínico, entre otros, adicionales a los propios biocombustibles, con el fin de incrementar el potencial económico de la refinería. De igual manera, es necesario contar con el apoyo gubernamental para financiar las primeras biorefinerías, así como el desarrollo de mecanismos y procedimientos concretos que simplifiquen la aplicación de la legislación vigente en la materia, promoviendo así la transición hacia una economía basada en los biocombustibles y los bioproductos. En la actualidad se tienen avances significativos; SENER ha entregado 8 permisos para la producción de bioenergéticos, 44 permisos para su comercialización, 7 permisos para transporte y 25 avisos de exención de permisos; todos los anteriores para bioetanol y biodiésel (Secretaría de Energía, 2018). Por otra parte, se requieren desarrollar mecanismos de recolección que incentiven la participación ciudadana, de tal manera que la recolección de materias primas como los aceites de re-uso y los desechos agroindustriales sólidos sea más eficiente.

## 5. Conclusiones

Los biocombustibles son una alternativa promisoría para sustituir parcialmente los combustibles derivados del petróleo, tanto en el sector transporte como en la industria. En México se tiene un alto potencial de producción de biocombustibles debido a la diversidad de biomasa con que se cuenta, así como la alta cantidad de residuos generados. Sin embargo, se presentan diversas áreas de oportunidad para el desarrollo de una industria

Fernando Israel Gómez-Castro, Claudia Gutiérrez-Antonio, Salvador Hernández, Carolina Conde-Mejía, Antioco López-Molina, Ricardo Morales-Rodríguez (pp. 51- 60)

redituable y sustentable. Por una parte, es necesario mejorar los procesos de producción de biocombustibles, con el objetivo de reducir el uso de energía térmica, así como el uso de agua fresca. Asimismo, la obtención de combustibles renovables se debe llevar a cabo en esquemas de biorefinerías, donde se generen biocombustibles así como productos de alto valor agregado, incrementando el potencial económico de esta industria. El desarrollo de estos esquemas implica un trabajo multidisciplinario, así como el apoyo de los diversos sectores que integran el país.

## Referencias bibliográficas

- Achinas, S., Achinas, V. y Euverink, G.J.W. (2017). A technological overview of biogas production from bio-waste. *Engineering*, 3(3), 299-307.
- Ahmad, A.L., Mat Yasin, N.H., Derek, C.J.C. y Lim, J.K. (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 584-593.
- Atabani, A.E., Silitonga, A.S., Badruddin, I.A., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H. y Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070-2093.
- Can, O. (2014). Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture. *Energy Conversion and Management*, 87(Noviembre), 676-686.
- Casson Moreno, V., Papisidero, S., Scarponi, G.E., Guglielmi, D. y Cozzani, V. (2016). Analysis of accidents in biogas production and upgrading. *Renewable Energy*, 96B(October), 1127-1134.
- Davis, S.C., Anderson-Teixeira, K.J. y DeLucia, E.H. (2009). Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. *Trends in Plant Science*, 14(3), 140-146.
- EPA - U.S. Environmental Protection Agency (2002). A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions, Reporte Técnico EPA420-P-02-001.
- Fehrenbach, H., Giegrich, J., Reinhardt, G., Sayer, U., Gretz, M., Lanje, K. y Schmitz, J. (2008). Kriterien einer nachhaltigen Bioenergienutzung im globalen Maßstab. UBA-Forschungsbericht, 206, 41-112.
- Festel, G.W. (2008). Biofuels - economic aspects. *Chemical Engineering and Technology*, 31(5), 715-720.
- Gray, K.A., Zhao, L. y Emptage, M. (2006). Bioethanol, *Current Opinions in Chemical Biology*, 10(2), 141-146.
- Gutiérrez-Antonio, C., Romero-Izquierdo, A.G., Gómez-Castro, F.I., Hernández, S. y Briones-Ramírez, A. (2016). Simultaneous energy integration and intensification of the hydrotreating process to produce bio-jet fuel from jatropha curcas. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 110, 134-145.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C. y Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(Septiembre), 1485-1496.
- Hilkevitch, J. (2011, noviembre 11). Continental Airlines flight is first in U.S. to use biofuel. *Los Angeles Times*. Extraído el 14 de noviembre de 2018 desde: <http://articles.latimes.com/2011/nov/11/business/la-fi-biofuel-airlines-20111111>.
- Japan Airlines (2009, enero 30). JAL flight brings aviation one step closer to using biofuel. *Press release*. Extraído el 14 de noviembre de 2018 desde: <http://press.jal.co.jp/en/release/200901/003159.html>.
- KLM (2016, enero 22). KLM's flights from Oslo to be powered by new biofuel. *Press release*. Extraído el 14 de noviembre de 2018 desde: <https://news.klm.com/klms-flights-from-oslo-to-be-powered-by-new-biofuel/>.
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2012). Biogasrechner. Extraído el 06 de noviembre de 2018 desde: <http://daten.ktbl.de/biogas/navigation.do?selectedAction=Startseite#start>.
- Lee, S., Posarac, D. y Ellis, N. (2011). Process simulation and economic analysis of biodiesel production processes using fresh and waste vegetable oil and supercritical methanol. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(12), 2626-2642.
- McMillan, J.D. (1997). Bioethanol production: status and prospects. *Renewable Energy*, 10(2), 295-302.
- Morales, M., Quintero, J., Conejeros, R. y Aroca, G. (2015). Life-cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: environmental impacts and energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42(Febrero), 1349-1361.
- Riegelhaupt, E., Odenthal, J. y Janerio, L. (2016). *Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento*. Ciudad de

- México: Ecofys. Saka, S. y Kusdiana, D. (2001). Biodiesel fuel from rape seed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*, 80(2), 225-231.
- Secretaría de Energía (2018, abril 05). Permisos otorgados por SENER para la producción, comercialización y transporte de bioenergéticos. Extraído el 16 de abril de 2019 desde: <https://www.gob.mx/sener/documentos/permisos-otorgados-por-sener-para-la-produccion-comercializacion-y-transporte-de-bioenergeticos>.
- Tormos, B., Macián, V., Gargar, K. y Redón, P. (2009). Results of an operating experience for urban buses fueled with biodiesel blends (B50). *SAE Technical Paper 2009-01-1827*.
- Virmond, E., de Sena, R.F., Albrecht, W., Althoff, C.A., Moreira, R.F.P.M. y José, H.J. (2012). Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuel and potential application in thermochemical processes. *Waste Management*, 32(10), 1952-1961.
- Washington State University (2012). Developing a wood pellet/densified biomass industry in Washington State: opportunities and challenges, *Washington State University Extension Energy Program*. Extraído el 06 de abril de 2018 desde: <http://www.energy.wsu.edu/portals/0/documents/Densified-BiomassReport-Dec28.pdf>.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
- Wellinger, A., Murphy, J. D. y Baxter, D. (2013). *The biogas handbook: science, production and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.

