



## BIOCOMBUSTIBLES DE CARA AL FUTURO: UN PANORAMA ACTUAL

### Biofuels going forward: current outlook

**Soria-Ornelas  
Maritza Lisette,  
Gutiérrez-Antonio Claudia\* y  
Rodríguez José Manuel.**

*Facultad de Química de la  
Universidad Autónoma de Querétaro*

*\*Correo para correspondencia:  
claudia.gutierrez@uaq.mx  
Fecha de recepción: 31/08/2015  
Fecha de aceptación: 09/02/2016*

#### Resumen:

El incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub> así como la dependencia energética hacia los combustibles fósiles ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas renovables. En particular, los sectores de transporte y generación de energía contribuyen con las dos terceras partes de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Debido a ello, estos sectores han enfocado sus esfuerzos en la investigación de fuentes de energía que posibiliten su crecimiento sostenible. En el sector transporte la única solución, en el corto y mediano plazo, es el desarrollo de biocombustibles con propiedades idénticas o muy similares a los combustibles fósiles, que paulatinamente vayan sustituyendo a éstos. Los biocombustibles son carburantes generados a partir de biomasa y distintas tecnologías que se encuentran en diferentes fases de avance; algunos biocombustibles ya se posicionan en el mercado mundial,

mientras que otros se encuentran en etapas más tempranas de desarrollo. En el presente artículo serán revisadas las tecnologías para la producción de los biocombustibles líquidos renovables de mayor potencial para el sector transporte: bioetanol, biobutanol, biodiésel y bioturbosina.

#### Palabras clave:

biocombustibles, biobutanol, bioetanol, biodiésel, bioturbosina, desarrollo sostenible.

#### Abstract:

The increase in CO<sub>2</sub> emissions along with energy dependency on fossil fuels have prompted the search for renewable energy alternatives. In particular, the transport and energy generation sectors contribute with two-thirds of total CO<sub>2</sub> emissions. As a result, these areas have focused their research efforts on energy sources that will enable their sustainable growth. In the transport sector, the only solution in the short

and medium term is the development of biofuels with identical or very similar properties to fossil fuels, which will gradually replacing them. Biofuels are fuels produced from biomass technologies at different stages of advancement; some of them already positioned in the world market, while others are at earlier stages of development. In this work we review the technologies for the production of renewable liquid biofuels with the greatest potential for the transport sector: bioethanol, biobutanol, biodiesel and biojet fuel.

**Key words:**

biofuels, biobutanol, bioethanol, biodiesel, biojet fuel, sustainable development.

## I. Introducción

En las últimas décadas se ha observado un incremento global en la temperatura de la tierra; este fenómeno, conocido como cambio climático, se debe al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, derivadas principalmente de los sectores de generación de energía y transporte (IEA, 2014). Además, un elevado porcentaje de la energía que se usa actualmente proviene del petróleo y otros recursos fósiles, cuya producción máxima, se estima, ya ha sido alcanzada ( Bentley, 2002; IEA, 2008; Aleklett y col. 2010; Owen y col. 2010). Debido a ello es necesario comenzar la transición energética hacia fuentes renovables de energía que permitan sostener el crecimiento económico actual (IEA 2015; OCDE, 2015).

En el sector de la generación de energía eléctrica se tienen varias opciones renovables que podrían incorporarse a la infraestructura existente. Actualmente, la energía eléctrica puede ser generada a partir de las energías solar, eólica, mareomotriz, hidráulica y geotérmica, mediante celdas fotovoltaicas, generadores eólicos y turbinas hidráulicas. Si bien cada una de estas alternativas posee diferentes eficiencias y precios, todas

ellas representan alternativas renovables que solucionan el problema de generación de energía eléctrica. En contraparte, en el sector del transporte el escenario es completamente diferente. El reemplazo de los combustibles fósiles sólo es factible mediante el desarrollo de biocombustibles con propiedades idénticas o muy similares; así, su incorporación a la infraestructura existente sería directa o con mínimas modificaciones. Si bien algunos investigadores están trabajando en el desarrollo de automóviles que funcionen con energía eléctrica, es un hecho que su uso conlleva la adquisición de un vehículo completamente nuevo; por lo tanto, su implementación no es compatible con la infraestructura existente, sin contar que traslada el problema energético al sector de generación de energía eléctrica. Además, sólo resuelve una parte del problema del sector transporte dejando de lado los sectores aéreo, de transporte de mercancías por tierra y marítimo. Por ello, en primera instancia debe trabajarse en el desarrollo de biocombustibles cuyas propiedades sean similares a los de origen fósil, de forma que puedan ser usados en mezclas con estos últimos, y así comenzar la transición energética. Sin embargo, lo deseable es el desarrollo de biocombustibles con propiedades idénticas, los cuales podrían reemplazar al 100% a los combustibles fósiles.

El gran crecimiento pronosticado para el sector transporte se ha convertido en un importante motor para el desarrollo de los biocombustibles. La Agencia Internacional de Energía (IEA siglas en inglés) estima que, para el año 2050, los biocombustibles representarán el 27% del total de combustibles para el sector transporte (IEA, 2011). Por lo tanto, resulta de gran interés el desarrollo de procesos eficientes y sostenibles para la producción de biocombustibles.

El término biocombustible alude a los combustibles generados a partir de biomasa



renovable, entendiendo como biomasa toda la materia orgánica de los seres vivos que están integrados en el ecosistema. La biomasa, como recurso energético, puede clasificarse en biomasa natural, residual y cultivos energéticos (Tojo y col., 2014). Los biocombustibles pueden hallarse en estado sólido (madera, astillas, etc.), líquido (bioetanol, biobutanol, biodiésel, bioturbosina) y gaseoso (biogás, syngas); estos combustibles renovables pueden utilizarse en vehículos automotores, para la generación de energía eléctrica, calor, e inclusive como materia prima para la generación de otros bioproductos de mayor valor agregado. También pueden clasificarse por generaciones, en función del tipo de biomasa que se utilice para producirlos. Así, los biocombustibles de primera generación se generan a partir de cultivos energéticos utilizados para la alimentación humana, por ejemplo maíz, trigo, caña de azúcar, entre otros. Los cultivos energéticos no utilizados como alimento así como los residuos agroindustriales constituyen las materias primas de segunda generación; mientras que aquellas de tercera generación incluyen algas, microalgas y algunos microorganismos.

Como se mencionó anteriormente, estos biocombustibles también pueden emplearse como materia prima para la generación de bioproductos de mayor valor agregado, cuyo interés ha ido aumentando, sobretodo porque la sociedad actual, el mundo como se conoce hasta ahora, se ha construido en torno al petróleo. Los compuestos derivados del petróleo conforman una larga lista que incluye asfaltos, pinturas, perfumes, jabones, tintes, polímeros, entre muchos otros, y se han vuelto imprescindibles para la vida cotidiana. Consecuentemente, los biocombustibles no sólo

representarán una fuente de energía, sino también material de síntesis para la obtención de derivados del petróleo.

Asimismo, cada generación de biocombustibles enfrenta sus propios retos. Uno de los principales argumentos contra las materias primas de primera generación es que atentan contra la seguridad alimentaria. Respecto a la segunda generación, los cultivos energéticos no comestibles siguen compitiendo por el uso de suelo; los residuos agroindustriales requieren pretratamientos muy específicos, lo cual implica un mayor procesamiento y por consecuencia un aumento en los costos del proceso. Respecto a la tercera generación, donde se superan los problemas de las generaciones anteriores, el cultivo de microalgas a gran escala para producción de biocombustibles aún no es económica ni energéticamente viable. Así, las tecnologías para la producción de biocombustibles se encuentran en diferentes etapas. A continuación se revisarán las tecnologías para la producción de los biocombustibles líquidos renovables de mayor potencial para el sector transporte: bioetanol, biobutanol, biodiésel y bioturbosina.

## **II. Bioetanol**

El bioetanol es un combustible renovable líquido que posee las mismas características y composición química que el etanol ( $C_2H_6O$ ), pero se diferencia de éste en que no se obtiene del petróleo. El bioetanol se presenta como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de  $78^{\circ}C$  cuyo grupo funcional es el grupo hidroxilo (R-OH); al mezclarse con agua en cualquier proporción forma una mezcla azeotrópica que es difícil separar. El alcohol etílico que prácticamente no contiene agua ( $>99.7\%$  (v/v)) se conoce como etanol anhidro, mientras que, mezclas con una concentración mayor de agua se conocen como etanol húmedo o hidratado.

La concentración de agua presente en la mezcla con etanol resulta especialmente importante para la aplicación a la que se le destine. Tenemos que para ser utilizado como aditivo para la gasolina se requiere que prácticamente se haya eliminado toda el agua presente (etanol anhidro) (Dias y col., 2011) this industry is characterized by low energy efficiency, using a large fraction of the bagasse produced as fuel in the cogeneration system to supply the process energy requirements. The possibility of selling surplus electricity to the grid or using surplus bagasse as raw material of other processes has motivated investments on more efficient cogeneration systems and process thermal integration. In this work simulations of an autonomous distillery were carried out, along with utilities demand optimization using Pinch Analysis concepts. Different cogeneration systems were analyzed: a traditional Rankine Cycle, with steam of high temperature and pressure (80 bar, 510 °C, lo mismo que cuando se utiliza como materia prima en procesos de la industria química y procesos de síntesis orgánica, como solvente de extracción (Brossard-González y col., 2010) o como anticongelante. Mientras que el etanol hidratado encuentra aplicación en procesos de elaboración de bebidas alcohólicas, como facilitador de procesos de impresión y pintado, en la industria farmacéutica se utiliza como excipiente de algunos medicamentos y cosméticos, también se utiliza como antiséptico al 70% (v/v) pues es a esta concentración que presenta su mayor capacidad bactericida (Arévalo y col., 2012), entre otras aplicaciones.

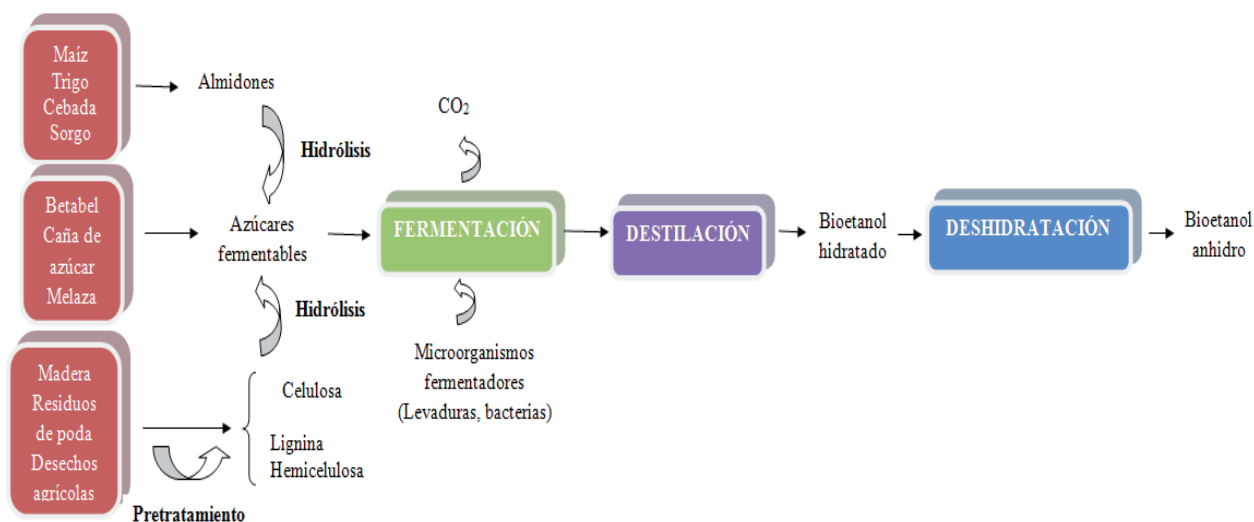
El uso del bioetanol como aditivo contribuye a reducir la contaminación atmosférica gracias a que reduce las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> sin deteriorar las propiedades detonantes de la gasolina cuando se mezclan en pequeñas proporciones. No obstante, su producción y precio está directamente ligado al mercado nacional e internacional de la materia prima utilizada, requie-

re infraestructura especial para su distribución dada su alta afinidad por el agua, y no es viable como sustituto de la gasolina debido a su bajo contenido energético (Chaves, 2004; Chevron®, 2006; Lee y col., 2008).

La tecnología para la producción del bioetanol incluye el pretratamiento para obtener los azúcares fermentables de la biomasa, el proceso de transformación (o fermentación) de los azúcares en bioetanol, y el proceso de purificación del mismo. Los pretratamientos para obtener los azúcares fermentables son muy variados, y prácticamente dependen de la materia prima seleccionada. Hoy por hoy, la caña de azúcar es la materia prima más atractiva para la producción industrial de bioetanol; típicamente de una tonelada de caña de azúcar se producen alrededor de 85 litros de etanol (Dias y col., 2011) en aproximadamente 48 horas. Por otra parte, el maíz y la papa son ricos en almidón, un hidrato de carbono complejo que necesita ser primero transformado en azúcares simples (glucosa) mediante hidrólisis. Se estima que de una tonelada de maíz se pueden producir 400 litros de etanol, siendo la media de la producción industrial de 324 litros (SENER, 2006). Sin embargo, el uso de cultivos primarios como materia prima para la producción de biocombustibles ha generado controversia; por ello, los esfuerzos de investigación se han enfocado en las materias primas lignocelulósicas (con alto contenido de celulosa) como residuos agrícolas y forestales, desechos municipales y cultivos energéticos no comestibles. La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica requiere un proceso de pretratamiento para separar las cadenas poliméricas de la celulosa y hemicelulosa de la lignina, y posteriormente liberar las moléculas de glucosa (Limayem y Ricke, 2012). Entre los procesos disponibles para pretratar la materia lignocelulósica se encuentran: hidrólisis (ácida, alcalina o enzimática), pretratamiento con sulfito, agua caliente, ozono, entre otros. En general, en estos pretratamientos se requieren

largos tiempos de procesamiento, o bien elevadas presiones y temperaturas, sin contar que en algunos de ellos se generan compuestos nocivos e inhibidores para la fermentación (p.ej. furfural). Por ello, aún quedan importantes retos por resolver para el uso eficiente de la biomasa lignocelulósica como materia prima.

El proceso de transformación (Figura 1) se lleva a cabo mediante fermentación. En la actualidad, se está trabajando en la modificación genética de cepas de *Saccharomyces cerevisiae* con el objetivo de volverlas más eficientes en la producción de bioetanol. Mientras que, por otro lado, se ha buscado desarrollar procesos de producción de bioetanol mediante métodos termoquímicos. En general, los procesos termoquímicos se caracterizan porque no requieren de la acción de microorganismos para transformar las materias primas, trabajan a mayores temperaturas y requieren catalizadores sintéticos para potenciar las reacciones químicas. Aportan la ventaja de emplear un amplio rango de materias primas incluyendo biomasa lignocelulósica, gracias a que estas materias primas son termoquímicamente gasificadas para generar gas de síntesis y a partir de ello producir bioetanol.



**Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de bioetanol (Guerra y col. 2008)**

El proceso de separación (Figura 1) se realiza mediante la destilación, siendo esta etapa la de mayor costo energético. Además, el agua y el etanol forman una mezcla azeotrópica con una concentración de 95.63% de etanol a 1 atmósfera de presión; debido a ello, se deben utilizar solventes, tales como etilenglicol, líquidos iónicos o glicerol, que faciliten la separación de ambos líquidos, y de esta manera obtener bioetanol anhidro con una pureza del 99.7%, que es la requerida para su uso en mezclas con gasolina. Con el afán de reducir el consu-

mo energético de la etapa de separación se han propuesto tecnologías alternativas como la separación mediante líquidos iónicos, destilación con membranas, nanofiltración y pervaporación (Wei y col., 2014), así como la intensificación de procesos mediante acoplamiento térmico y sistemas de cogeneración que permitan optimizar el uso de energía (Chaves, 2004; Fernández y col., 2006; Lozano, 2009; Dias y col., 2011) en esta etapa del proceso.

Durante la última década, la producción de bioetanol a partir de biomasa recibió más atención en todo el mundo. En 2014, Estados Unidos (EUA) lideró la producción de bioetanol a partir de almidón de maíz, que representa casi el 60% de la producción mundial. Brasil produjo aproximadamente 6,2 mil millones de galones a partir de caña de azúcar, lo que representa el 25% de la producción mundial, mientras que la Unión Europea ha seguido con un 6% de acuerdo con la Asociación de Combustibles Renovables (RFA siglas en inglés) (RFA, 2015). La demanda mundial de bioetanol está aumentando y encontró rápidamente su camino en nuevos mercados internacionales. El bioetanol producido en 2014 por EUA desplazó aproximadamente 512 millones de barriles de crudo de gasolina refinada (RFA, 2015), y las exportaciones de bioetanol fueron de 825 millones de galones, el segundo total más alto de la historia.

El bioetanol anhidro se usa en múltiples mezclas con la gasolina. En concentraciones del 5% o el 10%, E5 y E10 respectivamente, no se requieren modificaciones en los motores actuales. La mezcla E10 es la mezcla más utilizada en EUA dado que produce una elevación de un octano en

la gasolina, y se obtiene una notable reducción en la emisión de gases contaminantes. Las mezclas E85 (85 % de bioetanol), E95 y E100 requieren motores especiales. En EUA, Brasil, Suecia y en algunos otros países algunas marcas ofrecen vehículos con motores adaptados a una variedad de mezclas llamados Flexible Fuel Vehicules (FFV) o vehículos de combustibles flexibles. Por último el E-diésel es una mezcla de bioetanol (entre 5 y 15%) con diésel utilizando un aditivo solvente (emulsionante).

### III. Biobutanol

El biobutanol es un biocombustible renovable líquido que posee las mismas características y composición química que el butanol ( $C_4H_9OH$ ); puede utilizarse en mezclas con gasolina, o bien reemplazarla totalmente, ya que es compatible con la tecnología de vehículos existente y con la infraestructura actual de distribución. El butanol actualmente es empleado como saborizante artificial en la industria alimentaria, solvente, plastificante, producto intermedio en la síntesis de polipropileno, acrilonitrilo y otros productos.

El butanol tiene un número de octano en investigación y en motor considerablemente menor que el del etanol, pero similares a los de la gasolina (Tabla 1); por tanto, el biobutanol como combustible alcanza el 90% de energía que el mismo volumen de gasolina, mientras que el mismo volumen de etanol no excede del 65%.

El biobutanol se puede mezclar con la gasolina convencional sin tener que hacer adaptaciones en los automóviles, tolera mejor la contaminación por agua, y es menos corrosivo que el



etanol; por ello, se podría mezclar directamente con la gasolina en la refinera y enviarlo por la misma infraestructura de distribución ( Lee y col., 2008; Abdehagh y col., 2013)butanol has been considered as a potential fuel or fuel additive. Biological production of butanol (with acetone and ethanol. El butanol también es menos peligroso de manejar debido a su menor presión de vapor y menor volatilidad.

**Tabla 1. Propiedades de biobutanol, bioetanol y gasolina fósil como carburantes (Lee y col., 2008)butanol has been considered as a potential fuel or fuel additive. Biological production of butanol (with acetone and ethanol**

Propiedades	Biobutanol	Gasolina	Bioetanol
Densidad de energía (MJ/L)	29,2	32	19,6
Proporción aire-combustible	11,2	14,6	9
Calor de vaporización (MJ/Kg)	0,43	0,36	0,92
Número de octanos en investigación	96	91-96	129
Número de octanos en motor	78	81-89	102
Temperatura de ebullición (°C)	118	30-190	78

El biobutanol se obtiene mediante la fermentación anaerobia de azúcares que llevan a cabo varias especies de *Clostridium*, generando acetona-butanol-etanol (fermentación ABE por sus siglas en inglés). La bacteria *Clostridium* tiene la capacidad de utilizar azúcares simples y complejos así como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CO (Jang y col., 2012), lo cual posibilita el uso de diversas materias primas. No obstante, el proceso (Figura 2) enfrenta varias restricciones para el escalamiento a nivel industrial. Entre las principales limitantes se encuentran principalmente: el biobutanol generado es tóxico para las bacterias, ocasionando un lento crecimiento y baja densidad celular durante la fermentación solvatogénica, que conlleva a una baja productividad de bioetanol y bajos rendimientos. Además, el uso de materias primas de primera generación como sustrato de fermentación supone un alto costo de producción. A su vez esto conduce a altos costos de separación para la recuperación del biobutanol, debido a su baja concentración y a la formación de disolventes mixtos ( Qureshi y col., 2007; Jang y col., 2012). Una posible solución para incrementar la productividad del proceso es la separación del producto in situ, que consiste en la extracción del biobutanol desde el caldo de fermentación a medida que éste es producido en el medio. Esto puede lograrse mediante tecnologías de separación y purificación como la adsorción, extracción líquido-líquido, perstracción, ósmosis inversa, pervaporación y gas de arrastre. Estas tecnologías han sido evaluadas para determinar su eficien-

cia y rendimiento con respecto a la producción y recuperación butanol durante la fermentación ABE ( Qureshi y col., 2007; Lee y col., 2008; Abdehagh y col., 2013)butanol has been considered as a potential fuel or fuel additive. Biological production of butanol (with acetone and ethanol. La adsorción y la pervaporación son las técnicas de separación que ofrecen el mayor potencial para la separación de butanol a partir de soluciones diluidas (Abdehagh y col., 2013). La técnica de gas de arrastre también ha sido identificada como una de las mejores técnicas para la recuperación de biobutanol (Jang y col., 2012).

Por otro lado, la norma ASTM D7862 establece un estándar de calidad del butanol con el objeto de regular su producción y comercialización. Dicha norma está destinada a mezclas de biobutanol con gasolina de 1 a 12,5 volúmenes porcentuales, como combustible para motores de encendido por chispa.

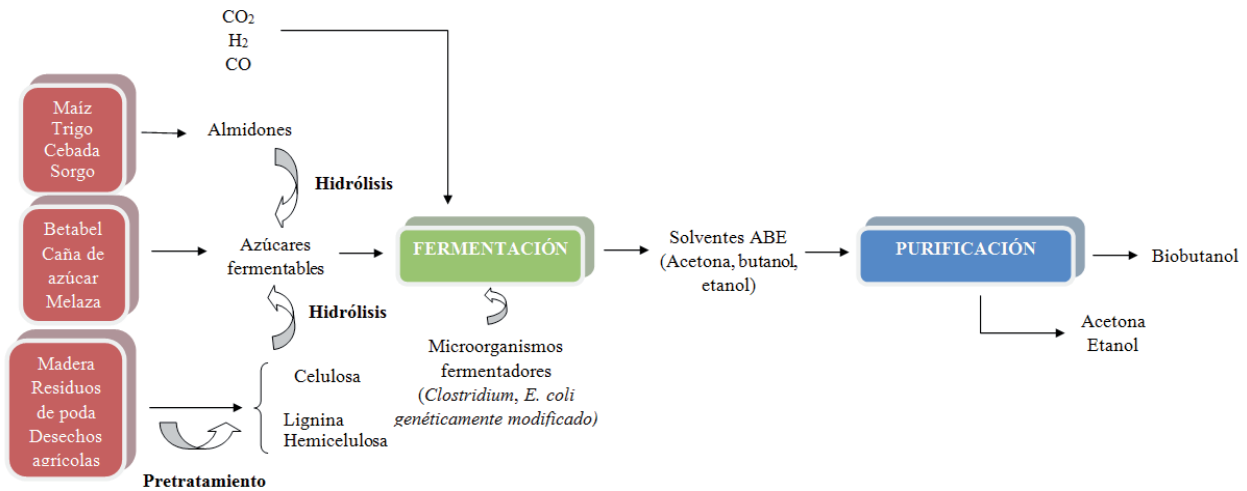


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de producción de biobutanol

A nivel industrial, se espera que en el corto plazo varias plantas en el mundo comiencen actividades, pues ya existen tecnologías probadas a escala piloto; estas pruebas y desarrollos han sido impulsadas por proyectos de inversión privada y entre las iniciativas más destacadas se encuentran las propuestas por BP© y Dupont© (Butamax®), Gevo©, Cobalt Technologies©, y Cathay©, entre otras. Pese a los grandes retos y oportunidades que aún presenta el proceso para la obtención de biobutanol existe un gran interés en este biocombustible, ya que, además, es un producto químico con una alta demanda para usos diversos.

#### IV. Biodiésel

El diésel es un hidrocarburo líquido, derivado del petróleo, generado a partir del hidrot ratamiento de las fracciones de gasolinas, naftas y kerosenos; está



compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados y un 25% de hidrocarburos aromáticos. En un esfuerzo por conseguir un combustible renovable y sostenible, análogo al diésel, se han buscado estrategias para lograr obtenerlo a partir de aceites; es importante mencionar que, pese a que pareciera atractivo, los aceites vegetales no pueden usarse como combustibles ya que afectan el buen funcionamiento de los motores, provocando daños irreversibles a mediano y largo plazo (Srivastava y Prasad, 2000; Demirbas, 2009; Aransiola y col., 2014). Los dos biocombustibles que se han generado hasta el momento a partir de aceites vegetales, y que podrían desplazar al diésel fósil son:

1. El diésel verde, compuesto de hidrocarburos de cadena larga (parafinas) obtenidos mediante hidrogenación catalítica. Se considera que emite 50% menos de  $\text{CO}_2$ , comparado con diésel.
2. El biodiésel, definido por la American Society for Testing and Materials (ASTM) como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables mediante una reacción de transesterificación.

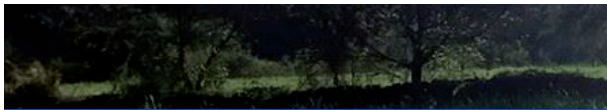
La transesterificación es, por excelencia, el método más recurrido para producir biodiésel debido a su bajo costo y simplicidad; en este proceso los triglicéridos de los aceites reaccionan con alcoholes en presencia de un catalizador (álcali o ácido) homogéneo o heterogéneo para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos. El alcohol más utilizado es el metanol, razón por la cual otro nombre para el biodiésel es metiléster de ácido graso o FAME (Fatty Acid Methyl Esters) por sus siglas en inglés.

A diferencia del bioetanol y el biobutanol, el biodiésel difiere de la composición química del

diésel. Por ello, las propiedades del biodiésel deben cumplir con las especificaciones internacionales ASTM 6751-3 y/o EN 14214. Las propiedades del biodiésel obtenido dependen del tipo de materia prima oleaginosa utilizada así como de la composición de sus ácidos grasos.

El biodiésel ha sido probado tanto en mezclas como al 100%. La B5 es una mezcla de 5% de biodiésel y 95% de diésel. El biodiésel se puede utilizar en cualquier mezcla o al 100% si cumple con la especificación ASTM D6751, EN 14214 (UE) o equivalente. Sin embargo, al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla se observan cambios en las propiedades combustibles de ésta; por ejemplo, al utilizar un 20% de biodiésel (B20) la potencia se reduce en un 2% y el consumo de combustible aumenta en un 3%. Al utilizar biodiésel al 100% la potencia se reduce un 12%, y el consumo de combustible aumenta en un 18% (Deere and Company®, 2015). La disminución del poder calorífico tanto del biodiésel como sus mezclas representa una desventaja comparado con el diésel, ya que implica un descenso de la potencia y torque del motor, así como un incremento en el consumo de combustible (Shahir y col., 2015).

Las principales ventajas del biodiésel incluyen la reducción de las emisiones de partículas,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  e hidrocarburos aromáticos policíclicos, además de otorgar una buena lubricidad al motor; dada la naturaleza de su materia prima podría fortalecer la agroindustria, y contribuir a la independencia energética en países que no cuentan con reservas petroleras. En contraparte, sus desventajas comprenden problemas de almacenamiento por su degradación en los depósitos, densidad ligeramente más alta en comparación con el diésel, problemas de congelación en invierno, punto de ignición y costos superiores a su análogo fósil (Bozbas, 2008; FAO, 2008; Shahir y col., 2015).



Los avances en el proceso de producción de biodiésel (Figura 3) se centran en la búsqueda de materias primas con reducido costo, procesos de bajo consumo de energía para llevar a cabo la transesterificación. Como materia prima se han utilizado aceites vegetales de primera y segunda generación. Las grasas de origen animal y el aceite vegetal de desecho también son una opción. Los aceites derivados de microalgas (tercera generación) han recibido gran atención, dado el alto contenido de lípidos en algunas especies, así como al hecho de no requerir tierra fértil ni utilizarse como alimento (Rawat y col., 2013; Maity y col., 2014; Zhu y col., 2014) leads to lipid accumulation, including TAG (triacylglycerols. Tampoco requieren cantidades grandes de fertilizantes, y pueden usarse fuentes de nutrientes residuales, como aguas de riego y gases de combustión (Brennan y Owende, 2010; Vanthoor-koopmans y col., 2013) and it involves operational efficiency, minimisation of environmental impact and socio-economic considerations; all of which are interdependent. It has become increasingly obvious that continued reliance on fossil fuel energy resources is unsustainable, owing to both depleting world reserves and the green house gas emissions associated with their use. Therefore, there are vigorous research initiatives aimed at developing alternative renewable and potentially carbon neutral solid, liquid and gaseous biofuels as alternative energy resources. However, alternate energy resources akin to first generation biofuels derived from terrestrial crops such as sugarcane, sugar beet, maize and rapeseed place an enormous strain on world food markets, contribute to water shortages and precipitate the destruction of the world's forests. Second generation biofuels derived from lignocellulosic agriculture and forest residues and from non-food

crop feedstocks address some of the above problems; however there is concern over competing land use or required land use changes. Therefore, based on current knowledge and technology projections, third generation biofuels specifically derived from microalgae are considered to be a technically viable alternative energy resource that is devoid of the major drawbacks associated with first and second generation biofuels. Microalgae are photosynthetic microorganisms with simple growing requirements (light, sugars, CO<sub>2</sub>, N, P, and K). Para mejorar la etapa de transformación se han propuesto varias tecnologías. Mientras que la ruta catalítica para la producción de biodiésel es la ruta más común utiliza industrialmente, los principales inconvenientes de este método incluyen la necesidad de tratar los ácidos grasos libres y los triglicéridos en diferentes etapas de reacción, los efectos negativos de la presencia de agua en la mezcla, el consumo de catalizador, la necesidad de eliminar las trazas de catalizador de la mezcla de producto, entre otros (Aransiola y col., 2014). En la búsqueda por superar estos inconvenientes, entre las tecnologías propuestas se destacan: el proceso de transesterificación con metanol u otro alcohol en condiciones supercríticas y las variantes del proceso (p. ej. Proceso Saka-Dadan), la radiación ultrasónica, tecnologías de membrana, la transesterificación enzimática, y recientemente se ha propuesto la destilación reactiva como una tecnología de enorme potencial para la producción de biodiésel (Gómez Castro, 2010; Aca, 2012; Aransiola y col., 2014).

En los últimos años la producción y consumo de biodiésel a nivel internacional se ha incrementado. En 2014, los principales países productores de biodiésel fueron EUA y Alemania; a nivel mun-

dial se produce principalmente a partir de aceite de colza, palma, soya y girasol (BP©, 2014).

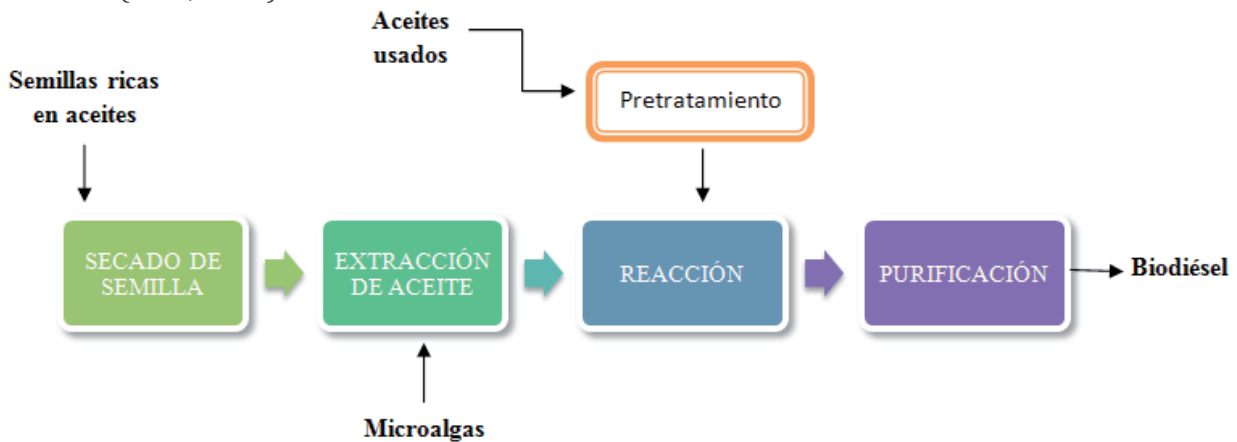


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiésel

## V. Bioturbosina

La industria de la aviación y la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) en trabajo conjunto con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) han trazado una estrategia de acción para hacer frente al cambio climático. Dentro de esta estrategia, la búsqueda de combustibles alternativos resulta una de las soluciones más prometedoras para el sector aviación.

La bioturbosina, kerosenos parafínicos sintéticos (KPS), ha sido identificada por la Agencia Internacional de Transporte Aéreo, IATA, como la alternativa más viable para sustituir a los combustibles fósiles para la aviación ( IATA, 2009; Blakey y col., 2011). La turbosina de origen fósil consiste aproximadamente en un 20% de parafinas, 40% de isoparafinas, 20% de naftenos y 20% de aromáticos (Bernabei y col. 2002). Esta combinación de hidrocarburos otorga a la turbosina de origen fósil sus propiedades físicas, de entre las que destacan las de punto de congelación (- 47°C) y contenido energético (43.28 MJ/kg) (Agosta, 2002; Chevron©, 2000). Por otra parte, la bioturbosina es muy similar en composición a la turbosina de origen fósil, pero no contiene compuestos aromáticos, contiene una baja concentración de azufre y genera menos emisiones que la turbosina. Pero la falta de compuestos aromáticos en la bioturbosina puede causar desgaste en ciertos tipos de motores (Liu y col., 2013). Por ello, la bioturbosina se ha utilizado en mezclas de hasta el 50% (v/v) como máximo con el combustible fósil (norma ASTM D7566). Sin embargo, los compuestos aromáticos pueden ser añadidos a la bioturbosina, y en este caso podría emplearse al 100% en los motores de los aviones (Gutiérrez-Antonio y Gómez-Castro, 2010).

La bioturbosina puede producirse a partir de biomasa, gas natural o carbón

(Liu y col., 2013), siendo los aceites vegetales de segunda y tercera generación los más utilizados. Existen diversos procesos para la producción de bioturbosina; los cinco más importantes son: el proceso de hidrotratamiento (Holmgren, 2008), el proceso Centia (Roberts, 2008), el proceso Greasoline (Cinquemani y col., 2004), y el proceso Bio-Synfining (Abhari y Havlik, 2008). De estas tecnologías, el proceso de hidrotratamiento (Figura 5) constituye la opción más viable dado que se encuentra certificado, la tecnología está probada a nivel de planta piloto, y su semejanza con los procesos tradicionales de refinación permitirían la reconversión de las mismas para producción de bioturbosina.

El proceso de hidrotratamiento consta de tres etapas: hidrotratamiento, craqueo/isomerización y refinación (Figura 5); en este proceso además de la bioturbosina es posible obtener diésel, nafta y gas LPG. Entre las ventajas que presenta este proceso se encuentra su flexibilidad para tratar diversos tipos de aceites vegetales y/o grasas animales. De acuerdo con pruebas realizadas por UOP Honeywell© es posible obtener rendimientos de hasta 36% de bioturbosina con respecto a la alimentación (Brandvold y McCall, 2009; Gosling, 2009; Kocal y col., 2009; McCall y col., 2009). Entre las principales desventajas se encuentra el alto costo de los catalizadores, principalmente en la etapa de craqueo/isomerización. Por otra parte, para mantener una alta conversión y evitar la formación de coque en el catalizador se requieren cantidades relativamente altas de hidrógeno.

En la actualidad, se encuentran en fase de desarrollo las primeras biorefinerías. En 2014 se aprobó un préstamo de la Secretaria de Agricultura en EUA a Fulcrum Sierra Biofuels, LLC para construir una biorefinería de bioturbosina a partir de residuos sólidos urbanos (USDA, 2014), se espera que inicien actividades comerciales a finales del año 2017. Petriox Oil & Gas© anunció a principios de 2015 que invertirá \$800 millones para la construcción de una nueva refinería, con la tecnología de hidrotratamiento de UOP Honeywell©, cuya capacidad de diseño será de un millón de toneladas, y se afirma que será la primera planta de producción de bioturbosina a escala comercial fuera de Norteamérica.

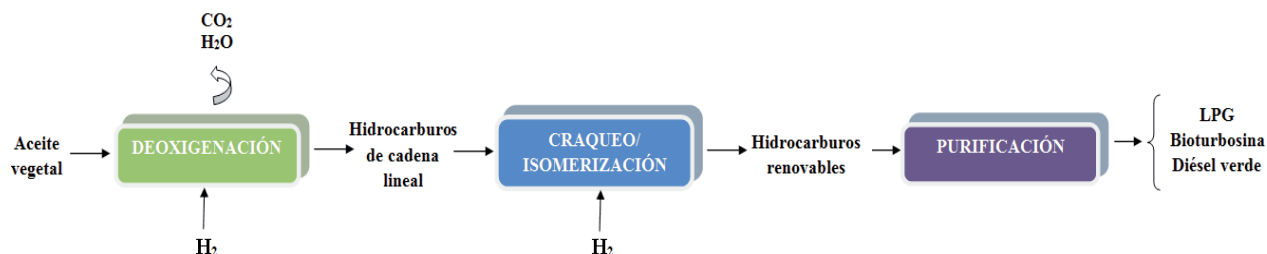


Figura 5. Proceso de hidrotratamiento para producción de bioturbosina (Gutiérrez-



Antonio y col. 2015)

Si bien todos los procesos propuestos hasta el momento logran cumplir con las propiedades fisicoquímicas requeridas para la bioturbosina, se detectan como áreas de oportunidad la reducción en el consumo energético del proceso y el aumento de la selectividad hacia la producción de la bioturbosina. Una de las opciones es implementar estrategias de intensificación en el proceso de producción de bioturbosina, con el fin de reducir los costos de producción, el impacto ambiental asociado, así como el consumo energético del proceso (Gómez-Castro y Gutiérrez-Antonio, 2012; Gutiérrez-Antonio y col., 2015; Romero-Izquierdo y col., 2015). Esto permitiría que la bioturbosina fuese competitiva con respecto a la turbosina fósil (Gómez-Castro y Gutiérrez-Antonio, 2012).

## VI. Conclusiones

Los biocombustibles representan, por ahora, la única solución factible para el reemplazo de los combustibles provenientes del petróleo en el sector transporte. Algunos de ellos, como el bioetanol y el biodiésel ya se encuentran disponibles para el reemplazo parcial, mientras que algunos otros se encuentran aún en desarrollo, como el biobutanol y la bioturbosina. Cabe mencionar que si bien los biocombustibles resultan de vital importancia para el sector transporte, éstos también pueden ser utilizados como materias primas para la generación de otros productos de mayor valor agregado. Por ejemplo, a partir del bioetanol podrían generarse compuestos como etileno o cloruro de polivinilo, entre otros. De igual manera, pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica.

Las investigaciones en torno a estos biocombustibles continúan, y debe ponerse especial énfasis en que sus procesos de producción se caractericen por un bajo consumo de energía,

mínimo impacto ambiental y máximo impacto social. Para que los biocombustibles contribuyan significativamente en la transición energética del transporte es necesario obtener un balance energético neto positivo. Preferentemente, los procesos de producción deben considerar el uso de residuos agroindustriales, de segunda generación, así como materias primas de tercera generación. Finalmente, es importante enfatizar que el desarrollo de los biocombustibles constituye la opción sostenible para el crecimiento económico del sector transporte.

## Resúmenes curriculares:

**Maritza L. Soria Ornelas.** Es Ingeniero Bioquímico por la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, y actualmente cursa la Maestría en Ciencias de la Energía en la Universidad Autónoma de Querétaro. Sus intereses de investigación versan sobre procesos intensificados para la producción de bioturbosina.

**Claudia Gutiérrez Antonio.** Es Profesor Investigador de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro. Sus intereses de investigación versan sobre procesos intensificados para la producción de biocombustibles mediante estrategias de integración energética y optimización estocástica multiobjetivo.

**José Manuel Rodríguez.** Se encuentra cursando la Maestría en Ciencias de la Energía en la Universidad Autónoma de Querétaro. Sus intereses de investigación versan sobre procesos intensificados para la producción de biodiésel.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico brindado por CONACYT mediante el proyecto 239765 para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, Maritza Soria Ornelas y José Manuel Rodríguez reciben una beca de CONACYT para la realización de sus estudios de posgrado.

**Referencias Bibliográficas:**

- Abdehagh, N., Tezel, F. H., y Thibault, J. (2013). Separation techniques in butanol production : Challenges and developments. *Biomass and Bioenergy*, 60, 222–246.
- Abhari, R., y Havlik, P. (2008). U.S. Patent 163543-A1.
- Aca, M. (2012). *Diseño conceptual de un proceso de reacción separación para la producción de biodiésel*. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa,
- Agosta, A. (2002). *Development of a Chemical Surrogate for JP-8 Aviation Fuel Using a Pressurized Flow Reactor*. Mechanical Engineering. Drexel University.
- Aleklett, K., Höök, M., Jakobsson, K., Lardelli, M., Snowden, S. y Söderbergh, B. (2010). The Peak of the Oil Age - analyzing the world oil production Reference Scenario in World Energy Outlook 2008, 38(3). *Energy Policy*. 1398–1414.
- Aransiola, E. F., Ojumu, T. V., Oyekola, O. O., Madzimbamuto, T. F., y Ikhu-Omoregbe, D. I. O. (2014). A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*, 61, 276–297.
- Arévalo, J. M., Arribas, J. L., Hernández, M. J., y Herruzo, M. L. C. R. Guía de utilización de anti-sépticos. (2012). Sociedad Española de Medicina Preventiva, Salud Pública e Higiene.
- Bentley, R. W. (2002). Global oil y gas depletion : an overview. *Energy Policy*, 30(2002), 189–205.
- Bernabei, M., Reda, R., Galiero, R., y Bocchinfuso, G. (2002). Proceedings of the 25th international symposium on capillary chromatography Riva Del Garda, Italy.
- Blakey, S., Rye, L., y Wilson, C. W. (2011). *Proceedings of the Combustion Institute*. 33, 2863–2865.
- Bozbas, K. (2008). Biodiesel as an alternative motor fuel : Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 542–552.
- BP. (2014). BP Statistical Review of World Energy June 2014. Disponible en: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>
- Brandvold, T. A., y McCall, M. J. (2009). U.S. Pub. 0250376-A1.
- Brennan, L., y Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557–577.
- Brossard-González, P. C., Ferrari, R. A., Pighinelli, L., y Park, J. (2010). Evaluación preliminar del etanol anhidro como solvente en la extracción de aceite de semillas de jatrofa ( *Jatropha curcas* L.). *Grasas y Aceites*, 61(3).
- Chaves, S. M. (2004). Etanol: Un biocombustible para el futuro. En *“Antecedentes y Capacidad Potencial de Cogenerar Energía y Producir Etanol por Parte del Sector Azucarero Costarricense.”*
- Chevron. (2006). *Alternative Jet Fuels*. Fuel.
- Chevron Product Company U.S.A. Inc. (2000). *Aviation Fuels: Technical Review*.
- Cinquemani, C., Jakob, J., Weber, A., y Heil, V. (2004). *GREASOLINE® - Treibstoffe in Erdöl-qualität aus Altfetten*.
- Deere and Company®. (2015). Biodiesel para motores John Deere. Disponible en: [https://www.deere.com.mx/es\\_AR/industry/engines\\_and\\_drivetrain/learn\\_more/bio\\_diesel/biodiesel\\_for\\_john\\_deere\\_engines.page](https://www.deere.com.mx/es_AR/industry/engines_and_drivetrain/learn_more/bio_diesel/biodiesel_for_john_deere_engines.page).
- Demirbas, M. F. (2009). Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy*, 86, S151–S161.
- Dias, M. O. S., Modesto, M., Ensinas, A. V., Nebra, S. a., Filho, R. M., y Rossell, C. E. V. (2011). Improving bioethanol production from sugarcane: Evaluation of distillation, thermal integra-

- tion and cogeneration systems. *Energy*, 36(6), 3691–3703.
- FAO. (2008). *El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación*. ISBN 978-925-30598-0-5.
- Fernandez, M., Liborio, H., y Romo, C. (2006). Sistemas de cogeneración, 67–72.
- Gómez Castro, F. I. (2010). *Diseño y optimización de sistemas reactivos térmicamente acoplados para la producción de biodiesel por el método supercrítico*. Instituto Tecnológico de Celaya.
- Gómez-Castro, F. I., y Gutiérrez-Antonio, C. (2012). Biojet fuel: challenges and opportunities. Primer Congreso Iberoamericano de Biorrefinerías, Ruiz-Aguilar G.M.L., Sánchez-Carmona A., Valdez-Vázquez I. (Eds.), ISBN 978-607-441-200-0, 502-508, 2012.
- Gosling, C.(2009). U.S. Pub. 0229173-A1.
- Guerra, M. J. F., Mallén, W. C., Struck, G. A. y Varela, V. T. (2008). *Producción de Bioetanol*. Universidad Iberoamericana. Cd. México, México.
- Gutiérrez-Antonio, C. y Gómez-Castro, F. I. (2010). *Estudio de benchmarking para las tecnologías de producción de bioturbosina*. Reporte técnico.
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., Hernández, S., y Briones-Ramírez, A. (2015). Intensification of a hydrotreating process to produce biojet fuel using thermally coupled distillation. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 88, pp. 29–36, 2015.
- Holmgren, J. (2008). *Bio Aviation Fuel*. UOP LLC, *World Biofuels Markets*. Disponible en: <http://www.ascension-publishing.com/BIZ/HD48.pdf>
- IATA. A global approach to reducing aviation emissions – First stop: carbon neutral growth from 2020 (2009). Disponible en: [www.iata.org](http://www.iata.org).
- IEA. (2008). *World Energy Outlook 2008*. Disponible en: [www.iata.org](http://www.iata.org).
- IEA. (2011). *Technology Roadmap - Biofuels for Transport*. Disponible en: [www.iata.org](http://www.iata.org).
- IEA. (2014). *Dioxide Carbon Emissions from Fuel Combustion: highlights 2014*. Disponible en: [www.iata.org](http://www.iata.org).
- IEA, y OCDE. (2015). *World Energy Outlook 2015*. Disponible en: [www.iata.org](http://www.iata.org)
- Jang, Y. S., Malaviya, A., Cho, C., Lee, J., y Lee, S. Y. (2012). Butanol production from renewable biomass by clostridia. *Bioresource Technology*, 123, 653–663.
- Kocal, J. A., Marinangeli, R. E., Marker, T. L., y McCall, M. J. (2009). U.S. Patent 158637-A1.
- Lee, S. Y., Park, J. H., Jang, S. H., Nielsen, L. K., Kim, J., y Jung, K. S. (2008). Fermentative butanol production by clostridia. *Biotechnology and Bioengineering*, 101(2), 209–228.
- Limayem, A., y Ricke, S. C. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4), 449–467.
- Liu, G., Yan, B., y Chen, G. (2013). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 59–70.
- Lozano, M. Á. (2009). Integración térmica de procesos. *Avances En Ingeniería, Eficiencia*, 69–86.
- Maity, J. P., Bundschuh, J., Chen, C. Y., y Bhattacharya, P. (2014). Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives: A mini review. *Energy*.
- McCall, M. J., Kocal, J. S., Bhattacharyya, A., Kalnes, T. N., y Brandvold, T. A. (2009). U.S. Pub. 0283443-A1.
- Owen, N. A., Inderwildi, O. R., y King, D. A. (2010). The status of conventional world oil reserves — Hype or cause for concern? *Energy Policy*, 38(8), 4743–4749.
- Qureshi, N., Saha, Æ. B. ;, y Cotta, Æ. M. A. (2007). Butanol production from wheat straw hydrolysate using *Clostridium beijerinckii*. *Bioprocess Biosyst Eng.* 30.419–427.
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., y Bux, F. (2013). Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale pro-

- duction. *Applied Energy*, 103, 444–467.
- Renewable Fuel Association. (2015). *Going global. 2015 Ethanol Industry outlook*.
- Roberts, W. L. (2008). Bio Jet Fuels. In *The 5th International Biofuels Conference*. N. Delhi, India, Febrero 2008.
- Romero-Izquierdo, A., Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., y Hernández, S. (2015). Modelado y simulación de un proceso de producción de bioturbosina a partir de jatropha curcas. Retos de la Ingeniería Química en la globalización; ISBN 978-607-95593-3-5, 2100-2105, 2015.
- SENER. (2006). “Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México.”
- Shahir, S. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Imran, A., y Ashraful, A. M. (2015). Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 62–78.
- Srivastava, A., y Prasad, R. (2000). Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 111–133.
- Tojo, S., Hirasawa, T., Chosa, T., Matsumoto, T., y Iwaoka, M. (2014). *Biomass as Local Resource. Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*.143-180.
- USDA. (2014). USDA Announces Loan Guarantee to Help Innovative Company Turn Waste Into Renewable Jet Fuel \$105 Million loan guarantee provided through the Biorefinery Assistance Program. Disponible en: <http://fulcrumbioenergy.com/documents/USDAAnnouncesLoanGuarantee2014-09-04.pdf>
- Vanthoor-koopmans, M., Wijffels, R. H., Barbosa, M. J., y Eppink, M. H. M. (2013). Biorefinery of microalgae for food and fuel. *Bioresource Technology*, 135, 142–149.
- Wei, P., Cheng, L. H., Zhang, L., Xu, X. H., Chen, H. L., y Gao, C. J. (2014). A review of membrane technology for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 388–400.
- Woody Biomass to Sustainable Bio-Jet Fuel by 2025. (n.d.). Disponible en: <http://www.icbb2015.org/news/2015/3/21/woody-biomass-to-sustainable-bio-jet-fuel-by-2025>.
- Zhu, L. D., Hiltunen, E., Antila, E., Zhong, J. J., Yuan, Z. H., y Wang, Z. M. (2014). Microalgal bio-fuels: Flexible bioenergies for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 1035–1046.