

Materias primas y procesos de producción para la obtención de combustible sustentable de aviación en México

Raw materials and production processes to obtain sustainable aviation fuel in México

Claudia Gutiérrez-Antonio
claudia.gutierrez@uaq.mx

RESUMEN

El sector de la aviación enfrenta hoy uno de sus principales retos: la recuperación económica sostenible. Para ello se han propuesto diversas estrategias, dentro de las cuales destaca el combustible sustentable de aviación. Este biocombustible puede producirse a partir de cualquier tipo de biomasa, mediante diferentes rutas de procesamiento. A nivel internacional, en varios países se ha comenzado a establecer la producción a nivel industrial de este biocombustible. Sin embargo, en México esta industria aún es incipiente. Por ello, en el presente trabajo se proponen las materias primas y las rutas de procesamiento con mayor viabilidad de implementación industrial en México de la producción de combustible sustentable de aviación. Esto permitirá enfocar los esfuerzos de la comunidad científica, industrial y gubernamental, lo cual contribuirá al establecimiento de la cadena de suministro para la producción de este biocombustible, así como a la eventual recuperación sostenible del país.

Palabras claves: combustible sustentable de aviación, procesos de producción, biomasa, bioqueroseno, bioturbosina, combustible renovable de aviación

ABSTRACT

Today, the aviation sector faces one of its main challenges: sustainable economic recovery. For this, various strategies have been proposed, among which sustainable aviation fuel stands out. This biofuel can be produced from any type of biomass, through different processing routes. At an international level, several countries

have begun to establish industrial production of this biofuel. However, in Mexico this industry is still incipient. Therefore, this paper proposes the raw materials and the processing routes with the greatest feasibility of industrial implementation in Mexico for the production of sustainable aviation fuel. This will allow to focus the efforts of the scientific, industrial and governmental community, which will contribute to the establishment of the supply chain for this biofuel, as well as to the eventual sustainable recovery of the country.

Keywords: sustainable aviation fuel, production processes, biomass, biokerosene, biojet fuel, renewable aviation fue

INTRODUCCIÓN

Dentro de los medios de transporte, el sector de la aviación ha sido el de mayor crecimiento en los últimos años. De acuerdo con la Agencia Internacional de Transporte Aéreo (IATA, 2021a), en el período 2014-2019 la industria de la aviación incrementó en 22.12 % el número de vuelos a nivel mundial; lo anterior permitió que los ingresos aumentaran en el mismo período en 13.68 %. Este crecimiento fue posible gracias a la inversión de las aerolíneas, la optimización de las terminales aéreas, así como el combustible de aviación. Durante el período 2014-2019, el consumo de combustible incrementó en 27.27 %, lo cual ocasionó un incremento de las emisiones del sector en 27.69 % (IATA, 2021a). Con base en esta tasa de crecimiento, se pronosticaba que el sector de la aviación podría incrementar de manera significativa sus requerimientos de combustible; por lo que, en consecuencia, también aumentarían las emisiones de dióxido de carbono. Debido a ello, el sector de la aviación estableció objetivos para garantizar su desarrollo sostenible; dichos objetivos se presentan a continuación (IATA, 2009):

- Mejora de eficiencia en motores y estructuras en 1.5% anual hasta 2020
- Crecimiento neutro de emisiones a partir de 2020
- Reducción neta de emisiones en un 50% en 2050, respecto a los niveles de emisiones reportadas en 2005
- Independencia de combustibles

Para poder alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, la Agencia Internacional de Transporte Aéreo, junto con la Organización de Aviación Civil

Internacional, propuso en 2009 la estrategia de los cuatro pilares que incluye:

- Mejoras en la tecnología de las aeronaves
- Mejoras operacionales
- Esquema de intercambio de emisiones
- Combustibles sustentables de aviación

Dentro de las mejoras en las tecnologías de aeronaves se considera la reducción en el peso de éstas, el incremento de la eficiencia de los motores, y el diseño de aeronaves más aerodinámicas que minimicen la fricción con el aire. Por otra parte, las mejoras operacionales incluyen la disminución de los tiempos de carreteo, así como la optimización en línea del uso de combustible con base en las condiciones climatológicas existentes. El esquema de intercambio de emisiones se enfoca en el establecimiento de un sistema de compensación de las emisiones del sector de la aviación mediante la reducción de éstas en otros sectores. Finalmente, los combustibles sustentables de aviación se consideran la alternativa más promisoría para el desarrollo sustentable del sector de la aviación.

En este contexto, se comenzó a trabajar en las estrategias planteadas, con especial énfasis en el desarrollo de biocombustibles para el sector de la aviación. No obstante, a fines del 2019 apareció en la escena mundial el virus SARS-CoV-2 que ocasionó una pandemia (Hantoko et al, 2021). En aras de ralentizar la propagación del virus, se implementaron medidas de aislamiento social; dichas medidas implicaron la realización de actividades escolares y laborales desde casa, lo cual modificó los patrones de consumo de la sociedad (Jiang et al, 2021). En particular, las restricciones de movilidad afectaron de manera severa al sector transporte, en particular a la aviación. De acuerdo a la Agencia Internacional de Transporte Aéreo, 2020 es el peor año en la historia de la aviación; a nivel internacional, la demanda de pasajeros fue 75.6% menor que aquella registrada para el 2019 (IATA, 2021b). Por ello, los esfuerzos del sector de la aviación se encuentran enfocados en su recuperación sostenible; en este contexto, el combustible sustentable de aviación jugará un papel clave para alcanzar este objetivo.

El combustible sustentable de aviación es un biocombustible drop in; esto significa que su composición y propiedades son exactamente las mismas que las de su contraparte fósil, pero con la diferencia de que se origina de biomásas correspondientes al ciclo corto de carbono. Actualmente, existen varias tecnologías certificadas por la Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales (ASTM por sus siglas en inglés) para la producción del combustible renovable de aviación (ASTM, 2020); por lo que estas tecnologías ya se encuentran en implementación a nivel industrial en Estados Unidos, Brasil, Francia, Países Bajos, Reino Unido,

Suecia, Finlandia, Emiratos Árabes Unidos y Singapur (Gutiérrez-Antonio et al, 2021). En México, ha habido esfuerzos para implementar la producción a escala industrial de bioturbosina; sin embargo, hasta el momento no se dispone de ninguna planta de producción.

Por ello, en el presente trabajo se presentan propuestas de implementación diseñadas para México, que permitan producir de manera sustentable y competitiva este biocombustible. El contenido de este artículo se menciona a continuación. En la Sección 2 se presentan las generalidades del combustible, así como las materias primas y procesos de producción existentes. Posteriormente, la Sección 3 contiene las propuestas con mayor potencial en México para la producción de bioturbosina, considerando tanto las materias primas como los procesos de producción. Finalmente, las conclusiones de este estudio se incluyen en la Sección 4.

COMBUSTIBLE SUSTENTABLE DE AVIACIÓN

El combustible sustentable de aviación también se conoce como bioturbosina, bioqueroseno, combustible renovable de aviación, o queroseno parafínico sintético. A partir de este momento se usarán de manera indistinta los términos antes mencionados. La bioturbosina consta de hidrocarburos en el rango del C8 al C16, principalmente parafinas y naftenos. Dependiendo de la materia prima y el proceso de producción, la bioturbosina puede o no contener compuestos aromáticos (Gutiérrez-Antonio et al, 2017). La ausencia de estos componentes no afecta las propiedades del combustible; sin embargo, la norma ASTM D7566 establece una cantidad mínima de 8.4% en volumen de compuestos aromáticos en las mezclas de combustible fósil y renovable en el tanque de la aeronave (ASTM, 2020). Por ello, el combustible renovable de aviación sólo puede usarse en mezclas, siendo el porcentaje máximo permitido dependiente de la cantidad de compuestos aromáticos presentes en el biocombustible.

Respecto de las propiedades del biocombustible, la Tabla 1 presenta una comparación del combustible de aviación, de origen fósil (Jet A y Jet A1) y renovable (elaborado con *Jatropha curcas* y camelina) (Gutiérrez-Antonio et al, 2017).

TABLA 1. PRINCIPALES PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN DE ORIGEN FÓSIL Y RENOVABLE.

PROPIEDAD	JET A	JET A1	BIOTURBOSINA (JATROPHA CURCAS)	BIOTURBOSINA (CAMELINA)
Temperatura de congelación (°C)	-40	-47	-57	-63.5
Temperatura de flash (mínimo, °C)	38	38	46.5	42.0
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	775-840	775-840	751-840	751-840
Viscosidad a -20 °C (máxima, mm ² /s)	8.0	8.0	3.66	3.33
Contenido energético (MJ/kg)	43.28	43.28	44.3	44.0

De la Tabla 1 se puede observar que las propiedades del combustible renovable no sólo satisfacen, sino que algunas propiedades exceden a las del combustible fósil. En particular, el contenido energético de la bioturbosina es mayor que el del combustible fósil, lo cual implica que permitirá recorrer una mayor distancia con la misma cantidad de combustible.

Ahora bien, el combustible renovable de aviación puede producirse prácticamente a partir de cualquier tipo de biomasa mediante diferentes rutas de

procesamiento. Existen diferentes clasificaciones para la biomasa; una de las más estratégicas es aquella que considera su naturaleza química. En este contexto, la biomasa se clasifica en triglicéridos, lignocelulosa, azúcares y almidones, Figura 1.

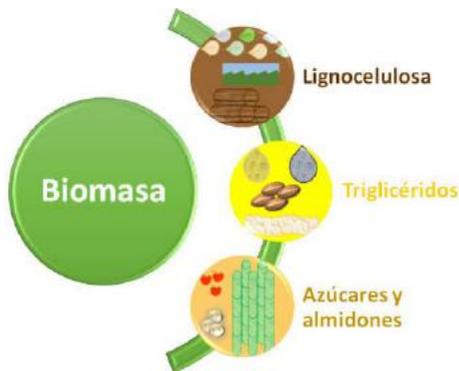


FIGURA 1. TIPOS DE BIOMASAS CON BASE EN SU NATURALEZA QUÍMICA.

De la Figura 1 puede observarse que dentro de las biomásas ricas en lignocelulosa se encuentran las maderas, residuos forestales, residuos agroindustriales, así como hojarasca y podas de jardín. Por otra parte, las biomásas ricas en triglicéridos incluyen los aceites vegetales (comestibles, no comestibles y residuales), así como las grasas animales. Finalmente, la caña de azúcar, las frutas, y los tubérculos son biomásas ricas en azúcares y almidones. Esta clasificación permite agrupar a las biomásas independientemente de si son comestibles, no comestibles o residuales; esto facilita el procesamiento de las diferentes biomásas.

Considerando la naturaleza química de la biomasa existen diferentes rutas de procesamiento que permiten obtener la bioturbosina, Figura 2. En el caso de los azúcares y almidones, éstos pueden ser fermentados, oligomerizados y finalmente purificados (alcohol a bioturbosina), o bien puede ser convertidos a compuestos precursores mediante microorganismos que posteriormente son oligomerizados y purificados (azúcares a hidrocarburos). En el caso de los triglicéridos, éstos son convertidos mediante hidropesamiento que consiste en reacciones a altas presiones y temperaturas empleando hidrógeno como reactivo; los hidrocarburos obtenidos son purificados para obtener la bioturbosina (hidrotratamiento). Adicionalmente al hidrotratamiento, se puede acoplar un proceso de generación de aromáticos para así cumplir con el contenido mínimo establecido en la norma ASTM D7566, y potencialmente podría emplearse al 100% (hidrotratamiento más aromáticos). En ambos casos se debe considerar la purificación de los

hidrocarburos renovables generados. Por otra parte, para la lignocelulosa existen varias opciones. La biomasa lignocelulósica puede pirolizarse para obtener bio-oil, el cual posteriormente se hidropcesa para obtener bioturbosina (pirólisis más hidrot ratamiento). Otra ruta de procesamiento considera la gasificación de la biomasa lignocelulósica para obtener syngas, que posteriormente se somete a un proceso de Fischer-Tropsch para generar bioturbosina (gasificación más Fischer-Tropsch). Finalmente, la biomasa lignocelulósica también puede convertirse mediante procesos hidrotérmicos para obtener combustible renovable de aviación.

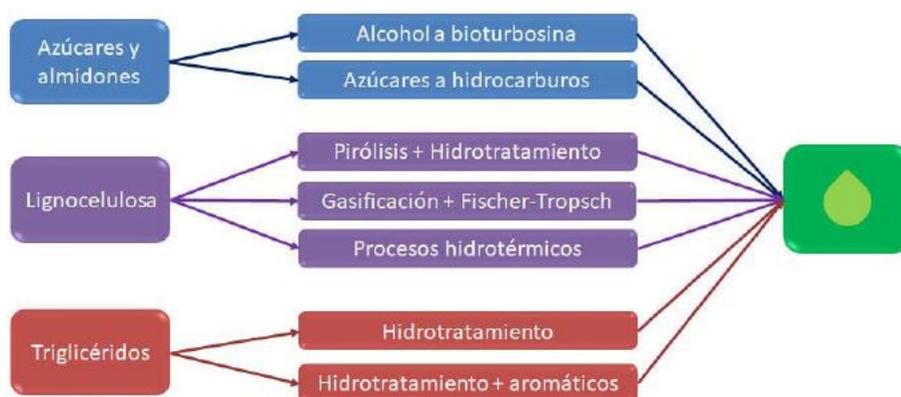


FIGURA 2. RUTAS DE PROCESAMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE RENOVABLE DE AVIACIÓN.

Por otra parte, la Tabla 2 presenta información técnica sobre las diferentes rutas de procesamiento para la obtención de bioturbosina (Gutiérrez-Antonio et al, 2021). De la Tabla 2 puede observarse que la disponibilidad de materias primas presenta una tendencia inversa con su costo; es decir, la biomasa lignocelulósica es la más abundante y la que presenta un menor costo, dado que principalmente son residuos.

En contraparte, la biomasa rica en triglicéridos tiene un costo alto y su disponibilidad es baja; lo anterior dado que la mayoría de los triglicéridos se emplean en el sector alimenticio. En el caso de los azúcares y almidones, éstos se encuentran intermedios, respecto de los otros tipos de biomasa, en relación a su disponibilidad y costo.

TABLA 2. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RUTAS DE CONVERSIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE RENOVABLE DE AVIACIÓN.

	TRIGLICÉRIDOS	AZÚCARES Y ALMIDONES	LIGNOCELULOSA
Disponibilidad	Baja	Media	Alta
Costo de materia prima	Alto	Medio	Bajo
Costo de conversión	Bajo	Medio	Alto
Rendimiento	46-80%	15-26%*	29-36%
Tecnologías de conversión certificadas	Sí	Sí	Sí

* Considerando la producción de alcohol.

De la Tabla 2 puede observarse también que el costo de procesamiento tiene una variación inversa con el costo de la biomasa. Es decir, los triglicéridos tienen un costo elevado como materia prima, pero su costo de procesamiento es bajo. En contraparte, la biomasa lignocelulósica es de costo bajo, pero su costo de procesamiento es elevado. Adicionalmente, los rendimientos son mayores en las rutas de conversión de triglicéridos, siguiendo los rendimientos de la conversión de biomasa lignocelulósicas. En el caso de los azúcares y almidones, tanto sus costos de adquisición como de procesamiento se encuentran intermedios con respecto a las biomasa ricas en triglicéridos y lignocelulósicas.

Con base en las materias primas y los procesos de conversión antes expuestos se propondrán propuestas viables para la implementación de la producción a escala industrial de la bioturbotina en México. Este tópico se discutirá en la siguiente sección.

PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN INDUSTRIAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA EN MÉXICO

En México, la agricultura junto con el aprovechamiento forestal, así como la cría y explotación de animales, contribuye con el 3.7 % del producto interno bruto (PIB) (CEDRSSA, 2019). De este porcentaje, la agricultura contribuyó específicamente con 64.6%, lo cual representa un aporte neto al PIB de 2.39%. De acuerdo con el INEGI (INEGI, 2020), en 2019 la producción agrícola en México incluyó a los cultivos mostrados en la Figura 3.

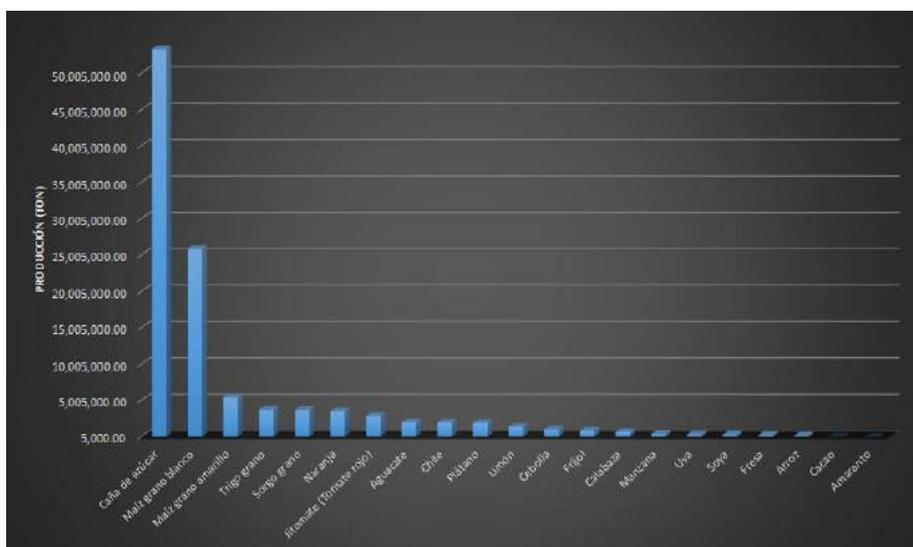


FIGURA 3. PRINCIPALES CULTIVOS PRODUCIDOS EN MÉXICO EN 2019.

De la Figura 3 podemos observar que todos los cultivos producidos en México son empleados en el sector alimenticio. Cabe mencionar que, en México, el maíz sólo puede emplearse para la producción de biocombustibles cuando existan excedentes de producción interna para satisfacer la demanda nacional y se cuente con permiso expedido por SAGARPA (DOF, 2009). El resto de los cultivos no están indicados en el Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (DOF, 2009); sin embargo, su uso pone en riesgo la seguridad alimentaria nacional. Por otra parte, los cultivos energéticos como *Jatropha curcas*, *Camelina* o *Higuerilla* aun no son opciones viables en México; dado que como puede observar en la Figura 3 no se consideran dentro de las estadísticas de

producción agrícola en México, a pesar de contar con una elevada superficie con las condiciones apropiadas para su cultivo. En contraparte, los residuos generados de los cultivos mostrados en la Figura 3 sí pueden ser empleados, así como los residuos agroindustriales asociados.

Los residuos agrícolas así como agroindustriales incluyen hojas, tallos, vainas, paja, cascarilla, olotes, bagazos, pulpas, melazas, cachazas (Mejías-Brizuela et al, 2021). La cantidad de residuos generada es elevada; por una parte, se cosechan, como se observa en la Figura 3, una gran cantidad de productos agrícolas. Adicionalmente, en el procesamiento de dichos insumos se suele aprovechar el 8% (cerveza), 9% (aceite de palma), 10% (café), 30% (papel) y máximo 50% (jugos) de ellos (Mejías- Brizuela et al, 2021). Con base en lo anterior, los residuos derivados de las actividades agrícolas y agroindustriales en México se consideran materias primas promisorias para la producción de combustible renovable de aviación. Adicionalmente, el empleo de dichos residuos permite su revalorización, y, al mismo tiempo, se resuelve el problema de contaminación asociado con su inadecuada disposición y lenta tasa de degradación. Así, se proponen los siguientes procesos para la conversión de los residuos a combustible renovable de aviación.

Los residuos ricos en triglicéridos incluyen el aceite residual de cocina, aceites residuales derivados de la industria, aceites de microalgas cultivadas en aguas residuales, y grasas animales. Estos residuos son de bajo costo (principalmente asociado a su recolección), y se encuentran disponibles todo el año. Para este tipo de residuos se propone el proceso de hidrotratamiento, que debe incluir un pretratamiento para acondicionar y homogenizar la materia prima; el pretratamiento dependerá del residuo en particular. La incorporación del pretratamiento aumentará los costos de procesamiento; por ello, se considera el hidrotratamiento de un solo paso, mediante el cual las reacciones de hidródeoxigenación, hidrocrackeo e hidroisomerización se lleven a cabo en un mismo reactor. Dependiendo de las condiciones a las cuales se lleve el hidrotratamiento de un solo paso podría incorporarse una turbina para disminuir la presión y temperatura del efluente de reacción. Dicho acondicionamiento permitiría generar electricidad, y al mismo tiempo diseñar un tren de destilación con menor consumo de energía e inherentemente más seguro. Finalmente, la purificación de los hidrocarburos renovables se propone realizarla mediante esquemas intensificados de destilación, que posibiliten reducir el consumo de energía, así como los requerimientos de espacio. El proceso de conversión propuesto para triglicéridos de residuo se muestra en la Figura 4.

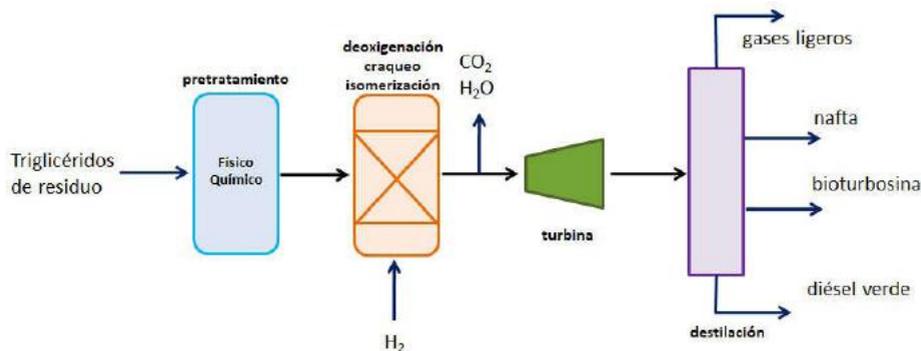


FIGURA 4. PROCESAMIENTO DE TRIGLICÉRIDOS DE RESIDUO PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE RENOVABLE DE AVIACIÓN.

Por otra parte, los residuos ricos en azúcares y almidones incluyen residuos de frutas, de la industria alimenticia y de la confitería, así como alimentos caducados. Para el procesamiento de estos residuos se propone el uso de un tratamiento biológico, que consiste en el cultivo de la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) (Raksasat et al, 2020). En este pretratamiento, la mosca soldado negra se alimenta de los residuos, que pueden incluir excretas, y al reproducirse genera larvas (Singh y Kumari, 2019); dichas larvas contienen aproximadamente 15-39% de grasas (Gold et al, 2018). Por lo que se deberá considerar una etapa de extracción de aceite, el cual posteriormente se alimentará a un proceso de hidrotatamiento de un solo paso. De igual manera, dependiendo de las condiciones del hidrotatamiento podría incorporarse una turbina para disminuir la presión y temperatura del efluente de reacción. Esto permitiría generar electricidad, y al mismo tiempo diseñar un tren de destilación con menor consumo de energía e inherentemente más seguro. Finalmente, la purificación de los hidrocarburos renovables se llevaría a cabo mediante esquemas intensificados de destilación, que posibilitan reducir el consumo de energía, así como los requerimientos de espacio. El proceso de conversión propuesto para azúcares y almidones de residuo se muestra en la Figura 5.

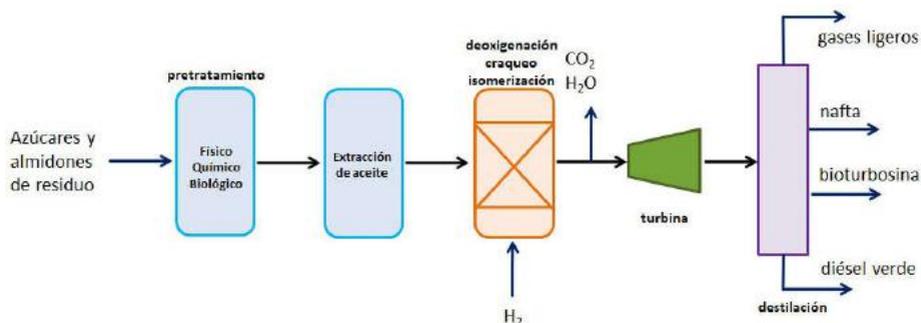


FIGURA 5. PROCESAMIENTO DE AZÚCARES Y ALMIDONES DE RESIDUO PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE RENOVABLE DE AVIACIÓN.

Finalmente, los residuos lignocelulósicos incluyen pajas, hojas, tallos, ramas, cascarillas, olotes, bagazos, así como aquellos derivados de actividades forestales y agroindustriales. Para el procesamiento de los residuos lignocelulósicos se propone un pretratamiento para reducir el tamaño, y posiblemente químico para eliminar la humedad, de ser el caso. Posteriormente, los residuos acondicionados serán pirolizados para obtener bio-oil; cabe mencionar que las condiciones de operación de la pirólisis deben optimizarse para maximizar la producción de bio-oil, respecto del biochar y los gases que se originan. Posteriormente, el bio-oil es sometido a un proceso de hidrot ratamiento de un solo paso, donde se llevan a cabo todas las reacciones involucradas utilizando hidrógeno como reactivo adicional. Asimismo, dependiendo de las condiciones del hidrot ratamiento podría incorporarse una turbina para disminuir la presión y temperatura del efluente de reacción. Esto permitiría generar electricidad, y al mismo tiempo diseñar un tren de destilación con menor consumo de energía e inherentemente más seguro. Finalmente, la purificación de los hidrocarburos renovables se llevaría a cabo mediante esquemas intensificados de destilación, que posibilitan reducir el consumo de energía, así como los requerimientos de espacio. El proceso de conversión propuesto para los residuos lignocelulósicos se muestra en la Figura 6.

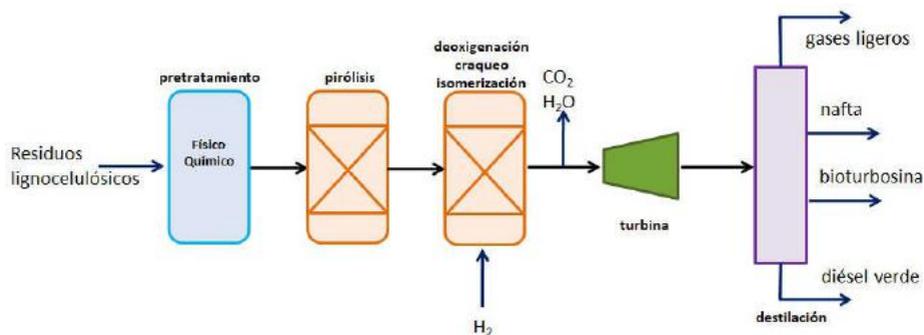


FIGURA 6. PROCESAMIENTO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE RENOVABLE DE AVIACIÓN.

La conversión de residuos lignocelulósicos, de triglicéridos, de azúcares y de almidones posibilita la producción de combustible renovable de aviación, mediante las rutas de procesamiento descritas previamente. Es interesante notar que, si bien los procesos tienen como objetivo producir combustible renovable de aviación, otros biocombustibles son también generados. Dentro de ellos se encuentran los gases ligeros, que pueden emplearse como en el sector doméstico o bien como aditivos en los vehículos que operan con gasolina. Las naftas son hidrocarburos que representan la fracción ligera de las gasolinas, por lo que se pueden emplear en mezclas con la gasolina de origen fósil. Finalmente, también se produce diésel verde, el cual es equivalente al diésel de origen fósil; por lo tanto, podría usarse en mezclas o al 100% en motores diésel. La comercialización de estos otros biocombustibles ayudará a incrementar la viabilidad financiera del combustible renovable de aviación.

Un aspecto importante que debe ser mencionado es que, en México, la mayoría de los residuos se encuentran dispersos a lo largo de todo su territorio. Por lo que es necesario considerar la recolección de los mismos, para evitar que el proyecto sea inviable debido a los altos costos de transporte; asimismo, las emisiones de dióxido de carbono pueden elevarse considerablemente si los residuos deben ser transportados a través de largas distancias para llegar a los centros de procesamiento. De acuerdo con Domínguez-García et al (2017a, 2017b), la satisfacción de la demanda de bioturbosina en México debe considerar el establecimiento de cadenas de suministro regionales; de esta manera, el transporte de biomásas no eleva los costos ni las emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo así a la sustentabilidad de la producción de este biocombustible.

CONCLUSIONES

El combustible renovable de aviación es una alternativa para la recuperación sostenible del sector de la aviación. Este biocombustible puede producirse a partir de una amplia gama de biomásas mediante distintos procesos de producción. En México, para impulsar la producción de la bioturbosina en escala industrial es importante considerar las materias primas disponibles, así como modificaciones a las tecnologías que posibiliten que su producción sea viable desde el punto de vista financiero, ambiental y técnico. En este contexto, se propone la conversión de biomásas residuales, ricas en triglicéridos, azúcares, almidones, así como lignocelulosa. Los procesos propuestos permiten la mayor eficiencia energética, así como una elevada selectividad para la producción de bioturbosina. Es importante destacar que también se generan gases ligeros, naftas y diésel verde, los cuales pueden ser comercializados. Un aspecto de vital importancia es la implementación de cadenas de suministro regionales, que permitan que la bioturbosina obtenida sea sustentable y competitiva económicamente con su contraparte fósil. De esta manera, se podrá impulsar el establecimiento de la industria del combustible renovable de aviación, lo cual contribuirá a la recuperación sostenible del país.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero brindado por CONACyT, a través del proyecto 239765, así como de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro para el desarrollo del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- IATA, International Air Transport Association, 2021a, Industry Statistics— Fact Sheet, April 2021. Disponible en: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/industry-statistics/>. Última consulta 19.06.2021.
- IATA, International Air Transport Association, 2009, The IATA Technology RoadmapReport, June 2009. Disponible en: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:106699&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>. Última consulta 19.06.2021.

- Peng Jiang, Yee Van Fan, Jiří Jaromír Klemeš, Impacts of COVID-19 on energy demand and consumption: Challenges, lessons and emerging opportunities, *Applied Energy*, Volume 285, 2021, 116441, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116441>.
- Dwi Hantoko, Xiaodong Li, Agamuthu Pariatamby, Kunio Yoshikawa, Mika Horttanainen, Mi Yan, Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic, *Journal of Environmental Management*, Volume 286, 2021, 112140, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112140>.
- ASTM, 2020, ASTM D7566-20c, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, Disponible en: www.astm.org. Última consulta 19.06.2021.
- IATA, International Air Transport Association, 2021b, 2020 Worst year in history for air travel demand, February 2021. Disponible en: <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2021-02-03-02/>. Última consulta 19.06.2021.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2020, Agricultura. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>. Última consulta 19.06.2021.
- DOF, Diario Oficial de la Federación, 2009, Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LPDB.pdf. Última consulta 19.06.2021.
- CEDRSSA, Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2019, El Sector Agropecuario en el PIB (segundo trimestre de 2019). Disponible en: http://www.cedrssa.gob.mx/post_el_n_sector_agropecuario_en_el_pib-n_-segundo_trimestre_de_2019_.htm. Última consulta 19.06.2021.
- Claudia Gutiérrez-Antonio, Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo, Fernando Israel Gómez-Castro, Salvador Hernández, Production Processes of Renewable Aviation Fuel - Present Technologies and Future Trends, ISBN: 9780128197196, 2021, Elsevier.
- Claudia Gutiérrez-Antonio, Fernando Israel Gómez-Castro, Julio Armando de Lira-Flores, Salvador Hernández, A review on the production processes of renewable jet fuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 79, 2017, Pages 709- 729, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108>.

- Nildia Mejías-Brizuela, Eber Orozco-Guillén, Néstor Galáan-Hernández, Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible en México, *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, Vol. 2(6), 2016, Pages 27-41.
- Ratchaprapa Raksasat, Jun Wei Lim, Worapon Kiatkittipong, Kunlanan Kiatkittipong, Yeek Chia Ho, Man Kee Lam, Carolina Font-Palma, Hayyiratul Fatimah Mohd Zaid, Chin Kui Cheng, A review of organic waste enrichment for inducing palatability of black soldier fly larvae: Wastes to valuable resources, *Environmental Pollution*, Volume 267, 2020, 115488, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115488>.
- Anshika Singh, Kanchan Kumari, An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using Black Soldier Fly larvae: A review, *Journal of Environmental Management*, Volume 251, 2019, 109569, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109569>.
- Moritz Gold, Jeffery K. Tomberlin, Stefan Diener, Christian Zurbrügg, Alexander Mathys, Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review, *Waste Management*, Volume 82, 2018, Pages 302-318, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>.
- Saul Domínguez-García, Claudia Gutiérrez-Antonio, Julio Armando De Lira-Flores, José María Ponce-Ortega, Mahmoud M. El-Halwagi, Strategic Planning for the Supply Chain of Aviation Biofuel with Consideration of Hydrogen Production, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(46), 2017a, Pages 13812- 13830, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02632>.
- Saúl Domínguez-García, Claudia Gutiérrez-Antonio, Julio Armando De Lira-Flores, José María Ponce-Ortega, Optimal planning for the supply chain of biofuels for aviation in Mexico, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 2017b, Pages: 1387-1402, <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1337-x>.