



CONVERSIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, PRODUCTOS DE VALOR AGREGADO Y BIOENERGÍA

CONVERSION OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE FOR THE GENERATION OF BIOFUELS, ADDED-VALUE PRODUCTS AND BIOENERGY

Gutiérrez-Antonio Claudia ^{1*}, De Lira-Flores Julio Armando ¹, Quiroz-Pérez Efraín ², Martínez-Guido Sergio Iván ²

¹ Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n Col. Las Campanas, Querétaro, México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n Col. Las Campanas, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia, correo: claudia.gutierrez@uaq.mx; claugtez@gmail.com

Resumen

Los residuos agroindustriales representan un serio problema de contaminación, debido a los grandes volúmenes en los que son generados. No obstante, los residuos agroindustriales pueden ser revalorizados para generar biocombustibles, productos de valor agregado, así como energía eléctrica y/o calorífica mediante procesos con cero residuos. Lo anterior permitiría resolver el problema de contaminación que representan estos residuos y generar una fuente alternativa de biocombustibles, productos de alto valor agregado, y bioenergía.

Palabras claves: *residuos agroindustriales, biocombustibles, bioenergía, productos de valor agregado, sustentabilidad*

Abstract

Agro-industrial waste represents a serious contamination problem, due to the large volumes in which they are generated. However, agro-industrial waste can be revalued to generate biofuels, value-added products, as well as electrical and / thermal energy through zero-waste processes. This would allow solving the contamination problem that these residues represent and generate an alternative source of biofuels, high added value products, and bioenergy.

Keywords: *agro-industrial waste, biofuels, bioenergy, added-value products, sustainability*

1. Introducción

En la mayoría de las ciudades del mundo se presenta una seria problemática sobre el manejo de los residuos sólidos, los cuales en los últimos años han crecido de manera exponencial; esto debido a diversos factores como el crecimiento demográfico, la concentración masiva en zonas urbanas, así como el desarrollo de los sectores industriales. Según su fuente, los residuos sólidos se clasifican en domésticos, industriales, comerciales, institucionales, servicios municipales, forestales y agroindustriales (Salas Jiménez y Quesada Carvajal, 2006). En particular, los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido, que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillén y Galán-Hernández, 2016); dichos residuos ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero son susceptibles de aprovechamiento para generar otros productos con valor económico, de interés comercial y/o social. Así, se transforma un problema en una oportunidad. Dentro de los residuos agroindustriales se incluyen aquellos producidos en granjas de cría de animales, residuos orgánicos de frutales y de granos, así como aquellos provenientes del cultivo de productos alimenticios (Saval, 2012).

En 2014, la producción mundial de residuos agroindustriales fue de 3,045 billones de toneladas (Saval, 2012), mientras que en México se generaron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos de alimentos como maíz, sorgo, caña de azúcar, trigo, cebada, agave y café (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillén y Galán-Hernández, 2016). Los residuos agroindustriales representan, en la mayoría de los casos, un problema de contaminación debido a los elevados volúmenes en los que son generados; de ahí que su disposición final implique costos adicionales, sin beneficio económico, para el sector que los genera. Por ello se han enfocado los esfuerzos, tanto de investigación como de desarrollo tecnológico, para la propuesta de procesos de aprovechamiento de estos residuos, los cuales pueden ser empleados para generar energía térmica y/o calorífica, biocombustibles, y/o productos de

valor agregado; cabe aclarar que el producto de valor agregado específico que pueda generarse depende principalmente de la composición de los residuos. Además, es importante que los procesos de conversión de dichos residuos empleen tecnologías de alta eficiencia que minimicen el impacto al medio ambiente (Gutiérrez-Antonio y Hernández, 2018). Así, el uso de residuos agroindustriales representa una alternativa para la generación de biocombustibles, productos de valor agregado y bioenergía, así como una solución para el problema de contaminación por los grandes volúmenes en los que éstos son generados. No obstante, la revalorización de estos residuos tiene varias desventajas, entre las cuales se encuentran su alto nivel de humedad, así como su baja densidad física y energética. Una alternativa que permite justamente superar estas desventajas es la obtención de biocombustibles sólidos, los cuales están compuestos por materia orgánica, de origen vegetal o animal. Los biocombustibles sólidos se obtienen mediante procesos físicos, tales como la densificación con la cual se supera la principal desventaja de los residuos agroindustriales como combustibles, que es su baja densidad física y energética; así, el proceso de densificación tiene una gran importancia en el aprovechamiento de estos residuos ya que facilita su almacenamiento, transporte y uso. Existen diferentes tipos de biocombustibles sólidos, tales como las astillas, briquetas, carbón vegetal y los pellets. En particular, los pellets son pequeños cilindros que se obtienen mediante procesos de compactación de la biomasa, la cual incluye a los residuos agroindustriales o forestales; los pellets son los biocombustibles sólidos más populares, ya que poseen mayor poder calorífico que la leña tradicional, encienden más rápido, no emiten olores y su uso evita la tala indiscriminada de árboles (García Bustamante y Masera Cerutti, 2016). Un aspecto interesante de los pellets es que pueden sustituir al carbón mineral en las centrales de generación de energía eléctrica, posibilitando así la generación de energía a partir de una fuente renovable. Adicionalmente, los gases resultantes de la combustión de los pellets poseen menos compuestos contaminantes que aquellos

derivados de la combustión del carbón mineral. Dentro de estos gases, el principal es el dióxido de carbono que puede usarse para distintas aplicaciones incluyendo la producción de otros biocombustibles. Otro producto que se genera en la combustión de los pellets es la ceniza, la cual se emplea en diferentes industrias tales como la construcción y la agricultura. No obstante, en el sector energético el uso de las cenizas ha sido poco estudiado, pero es un campo de

investigación con áreas de oportunidad. Algunas de las pocas aplicaciones reportadas hasta ahora incluyen la síntesis de materiales para el aprovechamiento de la energía solar. Dado que dichos materiales son generados a partir de residuos, se espera que posean costos reducidos, así como un bajo impacto ambiental. Así, con base en lo anteriormente expuesto se propone un proceso de aprovechamiento de los residuos agroindustriales, el cual se muestra en la Figura 1.

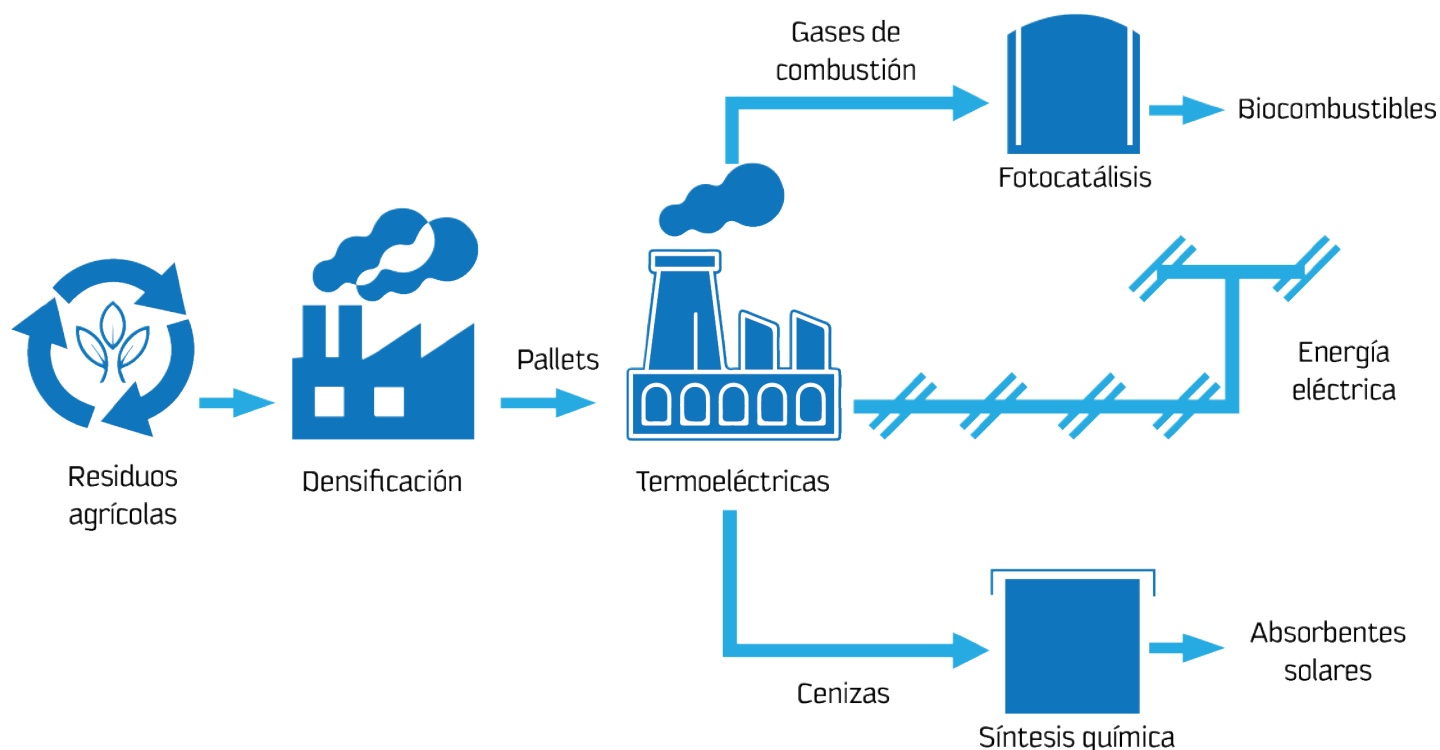


Figura 1. Proceso integral de aprovechamiento de residuos agroindustriales

Primero, los residuos agroindustriales se emplean para producir pellets, los cuales se queman para liberar así su contenido energético. Como resultado de esa combustión, los gases se emplean para generar energía eléctrica y el dióxido de carbono se captura para generar biocombustibles líquidos; mientras que las cenizas se utilizan en la síntesis de materiales para el aprovechamiento de la energía solar. Esta propuesta permitiría proponer un ciclo cerrado del uso de residuos agroindustriales mediante un proceso integral para la producción de pellets, su combustión y

la utilización tanto de los gases de combustión como de las cenizas para aplicaciones en el sector energético.

Por lo tanto, en este artículo se presenta la propuesta de aprovechamiento de residuos agroindustriales que incluye la producción de pellets a partir de residuos agroindustriales, la combustión de los pellets para la generación de energía eléctrica, así como el uso de los gases de combustión y las cenizas para la producción de biocombustibles y el desarrollo de biomateriales para aplicaciones solares, respectivamente.

2. Producción de pellets

Los pellets son biocombustibles sólidos, de forma cilíndrica, con diámetros de 6 - 25 mm y longitudes de 3.15 - 40 mm (ISO, 2014); éstos pueden producirse a partir de residuos agroindustriales mediante un proceso muy sencillo denominado densificación (pelletizado), en el cual se obtiene un producto con una mayor densidad que la materia prima inicial. El proceso de densificación consta de la compactación de la biomasa mediante la aplicación de presión; la biomasa pasa por un círculo metálico con pequeños agujeros, donde se forman los pellets. Así, los pellets, al poseer una mayor densidad, se transportan ocupando un volumen menor, y por lo tanto es más fácil su manipulación y almacenamiento.

Los residuos agroindustriales usados en la generación de pellets deben poseer un contenido de humedad máximo de 15% (ISO, 2014); si el residuo original posee una humedad mayor se puede emplear un secador solar para reducir la humedad de manera económica y con mínimo impacto al ambiente. Una vez que los residuos poseen el contenido apropiado de humedad se reduce su tamaño mediante un molino, esto con el objetivo de facilitar su densificación, la cual se realiza en una máquina peletizadora. Los pellets obtenidos se dejan enfriar a temperatura ambiente, para su posterior empaclado. Algunos residuos

agroindustriales que se han usado para producir pellets incluyen paja de arroz, cascarilla de arroz (Figura 2), paja de trigo y paja de frijol, entre otros. Una característica muy importante de los pellets es su poder calorífico; es decir, la energía que se libera en su combustión por cada kilogramo de pellets. De acuerdo con la norma ISO 17225-6 (ISO, 2014) el poder calorífico que deben poseer los pellets elaborados a partir de residuos agroindustriales debe ser mínimo de 14.5 MJ/kg. Como referencia, los pellets de madera poseen un poder calorífico de 18 MJ/kg, y el carbón mineral de 21 MJ/kg. El menor poder calorífico de los pellets elaborados con residuos implicaría que una mayor cantidad de ellos se necesitarían para poder liberar la misma cantidad de energía que el carbón mineral. No obstante, los pellets producidos a partir de residuos resuelven el problema de contaminación por la acumulación de residuos, y sus gases de combustión no poseen contaminantes en comparación con aquellos provenientes de la combustión del carbón mineral; lo anterior representa importantes impactos positivos al medio ambiente. Además, los pellets son un combustible renovable, a diferencia del carbón mineral.

3. Generación de energía eléctrica renovable

Una vez que los pellets han sido producidos, éstos liberan su energía contenida mediante un proceso de combustión. La combustión es una reacción química en la que un combustible (pellet) junto con oxígeno (proveniente del aire) libera su energía contenida mientras se producen cenizas y gases de combustión (principalmente dióxido de carbono y vapor de agua). La energía liberada en la combustión de los pellets puede ser utilizada para la generación de electricidad en una central termoeléctrica, cuyo proceso simplificado se presenta en la Figura 3.



Figura 2. Pellets de cascarilla de arroz

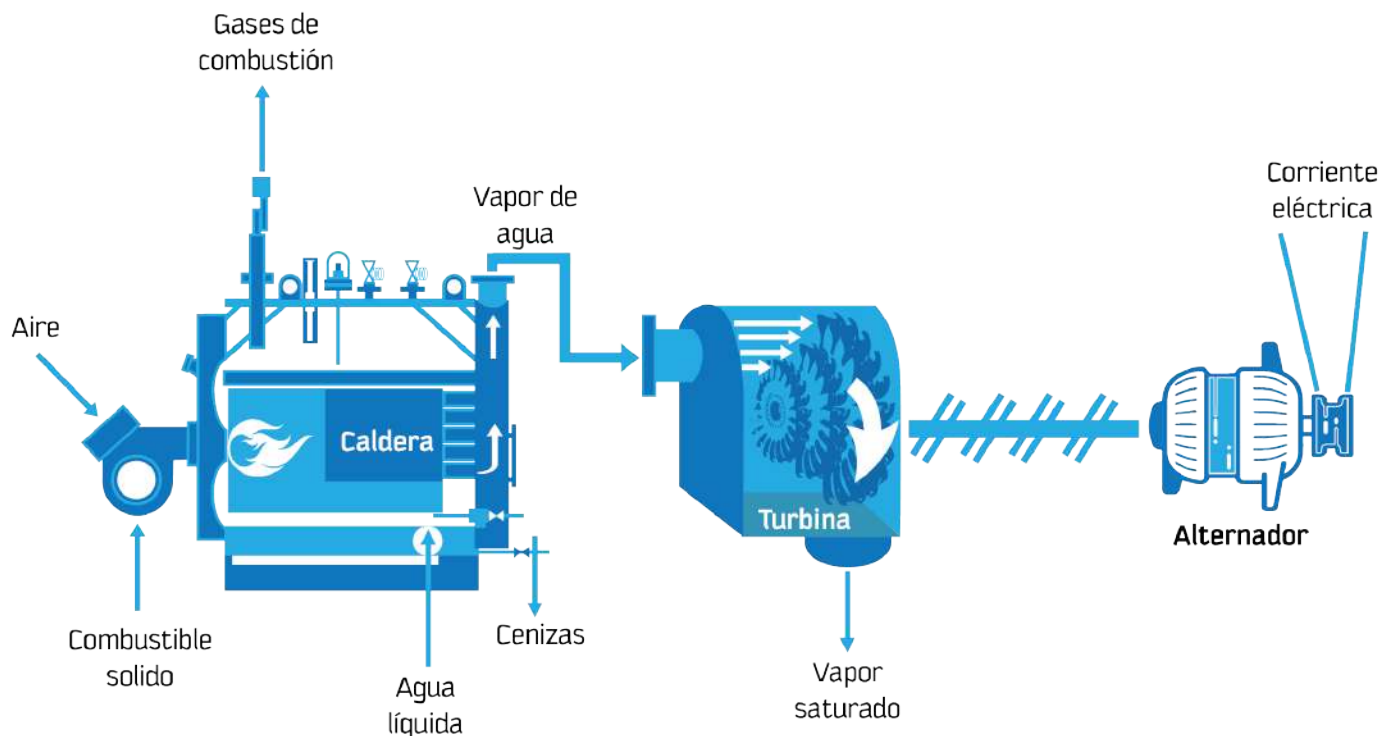


Figura 3. Proceso simplificado de una central termoeléctrica para la producción de energía.

En la Figura 3 puede observarse que el combustible se alimenta a una caldera, donde es quemado. La energía que se libera por la combustión se transfiere hacia el agua que circula a través de la caldera, la cual absorbe la energía para cambiar de la fase líquida a la fase vapor. El vapor de agua generado se hace pasar por una turbina y se genera energía mecánica, que es transformada a su vez en energía eléctrica mediante un alternador.

La mayoría de las centrales termoeléctricas emplean carbón como combustible; sin embargo, los pellets podrían emplearse como sustituto del carbón mineral. Recientemente se reportó un estudio en el que se analizaba el uso de pellets de residuos agroindustriales para la generación de energía eléctrica en las centrales termoeléctricas de México [Martínez-Guido, Ríos Badrán, Gutiérrez-Antonio y Ponce-Ortega, 2019]. Los resultados del estudio indican que es posible satisfacer el 50% de la demanda nacional mediante del uso de pellets de residuos agroindustriales en las centrales termoeléctricas. Un aspecto interesante es que al satisfacer este

porcentaje de la demanda se logra disminuir en 25% las emisiones de dióxido de carbono. Este estudio es el único realizado en México hasta ahora, y sin duda, es necesaria más investigación al respecto; no obstante, es un resultado alentador para continuar impulsando el establecimiento de la industria de los biocombustibles sólidos en México.

4. Uso de los residuos de la combustión de los pellets

Después del aprovechamiento de los biocombustibles sólidos mediante su combustión es importante señalar que además de la energía liberada se generan dos subproductos: los gases de combustión y las cenizas. A continuación, se presentará información de los usos reportados para estos subproductos en el sector de energía.

Los gases de combustión usualmente incluyen diferentes compuestos, principalmente dióxido de carbono, así como agua, monóxido de carbono, y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno. De estos

gases de combustión, uno que resulta de gran interés es el dióxido de carbono. El dióxido de carbono ha tenido un gran auge en el sector alimenticio, ya que puede emplearse como solvente para la extracción de cafeína, aceites y algunos otros compuestos. De manera particular en el sector energético, el dióxido de carbono puede utilizarse para producir biocombustibles; esto es

posible mediante la fotocatalisis, que es una reacción química en la que el dióxido de carbono en presencia de agua y energía solar se transforma en alcoholes o bien en hidrógeno. Los alcoholes producidos pueden a su vez ser transformados mediante diferentes procesos químicos en hidrocarburos renovables como biogasolina, diésel verde o bioturbosina, Figura 4.

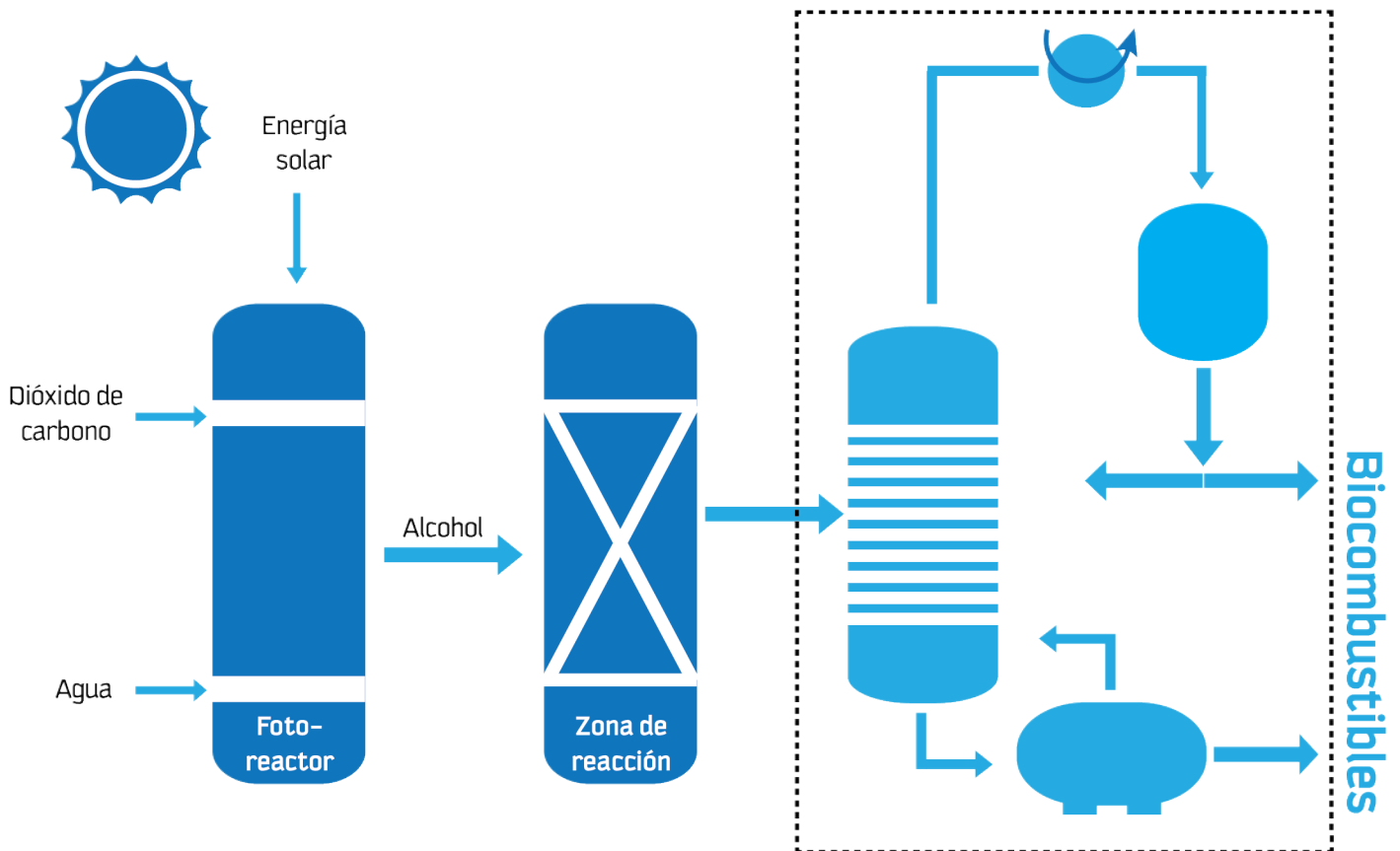


Figura 4. Proceso de conversión del dióxido de carbono en biocombustibles.

El proceso de aprovechamiento del dióxido de carbono mediante fotocatalisis ha recibido mucha atención por parte de la comunidad científica, debido a la posibilidad de crear un ciclo neutro de carbono en el sector del transporte principalmente. Si bien la tecnología es promisoría, su principal limitante hoy en día son los bajos rendimientos que este proceso tiene en condiciones ambientales. Uno de los trabajos más interesantes en esta área es el reportado por Tsai, Chen, Liu, Asakura y Chan (2011); en ese trabajo se presenta la conversión del dióxido de carbono en metanol a una temperatura de 25 °C y 2.90 atm para obtener 0.010 gramos de metanol por cada gramo de catalizador, en

un período de dos horas. El catalizador es un compuesto químico que ayuda a acelerar una reacción química, y en el caso del trabajo de Tsai, Chen, Liu, Asakura y Chan (2011) se utiliza óxido de níquel dopado con tantalato de indio. Por ello, la investigación se ha enfocado en el desarrollo de catalizadores que permitan obtener mayores cantidades de los productos de interés. Por otra parte, el principal uso que se le ha dado a las cenizas que resultan de la combustión está en la agricultura y en la construcción. Por ejemplo, las cenizas se pueden emplear en la fabricación de bloques para la construcción, o bien como aditivo para la fabricación de cemento. De manera particular en el

sector energético, las cenizas de combustión se pueden emplear para la síntesis de recubrimientos absorbentes de radiación solar.

Un recubrimiento absorbente de radiación solar, como su nombre lo indica, tiene como principal objetivo mejorar funciones como las características ópticas, mecánicas, eléctricas y/o de resistencia de las superficies donde éstos son depositados para absorber la mayor cantidad de energía solar posible (Kennedy, 2002). La mayoría de los recubrimientos solares se elaboran a partir de óxidos de metales como el cobre, cobalto, níquel, entre otros. Por ello, el uso de cenizas derivadas de la combustión de biomasa para la síntesis de recubrimientos absorbentes solares es un campo de investigación interesante; adicionalmente, su potencial aplicación en tecnologías solares térmicas permitiría generar recubrimientos de muy bajo costo y con reducido impacto ambiental. Hasta la fecha sólo se ha realizado un estudio en el que se reporta el uso de hollín de resina de pino como materia prima para la síntesis de un recubrimiento absorbente solar (Servín, Peña, Sobral y González, 2017). En ese estudio se determinó que la capacidad para absorber energía solar de este material es competitiva en comparación con la pintura de imprimación (primer Paint), es decir, la pintura base que se aplica previo a un pintado posterior.

5. Análisis de costos

El proceso de aprovechamiento integral de los residuos considera la conversión de los residuos a pellets, y la subsecuente transformación del dióxido de carbono a biocombustibles, así como de las cenizas en absorbentes solares. A continuación, se presenta información sobre los costos de los procesos previamente mencionados.

En un estudio reciente presentado por Tauro, García, Skutsch y Masera (2018) se han estimado los costos de producción de pellets obtenidos a partir de diferentes residuos agroindustriales aprovechables en México; las biomásas consideradas son residuos forestales, aserrín, residuos de cosecha de caña de azúcar, cáscaras de cítricos y residuos de poda de árboles frutales; información sobre estos pellets se presentará a continuación. Los pellets producidos a partir de aserrín tienen el costo de producción más bajo (aproximadamente 4.9 dólares/GJ). Las razones ligadas a este bajo costo son la baja humedad

del residuo, que evita la inclusión de una etapa de secado, y el tamaño de partícula de la materia prima, que deja de lado la necesidad de incluir una reducción de tamaño extra. Por otro lado, los pellets producidos a partir de residuos de cosecha de caña de azúcar presentan el costo más alto (10.1 dólares/GJ); esto se debe a los altos costos que demandan el transporte y almacenamiento de este tipo de residuos. De acuerdo a los autores, estos costos podrían reducirse si se establecen acuerdos a largo plazo con los productores, con el fin de obtener precios de compra más competitivos y la entrega a tiempo de los residuos a las plantas de procesamiento. Otra de las alternativas propuestas para reducir los costos de producción consiste en optimizar el transporte de las materias primas desde el campo hacia las plantas de producción. Con respecto a los pellets obtenidos a partir de residuos de poda, uno de sus principales atractivos es que son relativamente baratos de producir; además, hasta ahora los residuos de poda tienen pocos usos alternativos, más allá de su empleo como leña para el sector residencial. Por otro lado, los pellets obtenidos a partir de cáscaras de cítricos tienen un mayor costo de producción; sin embargo, al igual que los residuos de poda, las cáscaras de cítricos no tienen usos alternativos por el momento, por lo que este tipo de pellets pueden ser de interés para las agroindustrias enfocadas en el procesamiento de frutas. En el mismo estudio se menciona que el costo de compra estimado para los pellets de aserrín es de 6.1 dólares/GJ, mientras que el costo de los pellets de residuos de caña de azúcar es de 12.8 dólares/GJ. A pesar de que estos costos son más altos que los de otros biocombustibles sólidos utilizados en México (aserrín y astillas de madera, cáscaras de cítricos, fardos de residuos de la caña de azúcar, etc.), en términos generales los pellets se vuelven más competitivos económicamente en aquellos casos donde la distancia recorrida hasta el usuario final es mayor. En este sentido, por ejemplo, los pellets supondrían un costo menor que el aserrín y las astillas de madera cuando la distancia recorrida sea mayor que 400 y 480 km, respectivamente. En el caso de los pellets de residuos de caña de azúcar, éstos son más rentables cuando las distancias recorridas son significativamente mayores que estos valores. De acuerdo a los autores del estudio, el transporte ferroviario puede ser más atractivo para la producción de pellets a gran escala ya que, a pesar

de que en este caso se requiere una mayor inversión en infraestructura, el costo en dólares/ton/km es más bajo que en el transporte con camiones de carga.

Finalmente, es importante mencionar que en México el impuesto a los combustibles fósiles se establece de acuerdo a su contenido de carbono, siendo este valor en 2018 de 0.03 dólares/GJ para el coque de petróleo y 0.11 dólares/GJ para el carbón. Tomando como referencia estos valores, los pellets de aserrín difícilmente podrían competir con este tipo de combustibles fósiles. En este sentido, una de las alternativas propuestas por los autores del estudio consiste en proporcionar incentivos por cada tonelada de CO₂ no emitida; con base en ello, se esperaría que los pellets de aserrín sean una opción económicamente más atractiva que el coque de petróleo y el carbón con un incentivo de alrededor de 30 y 50 dólares, respectivamente.

Una vez que los pellets han sido producidos, éstos son quemados y como producto de la combustión se generan gases de combustión y cenizas.

Respecto de los gases de combustión, el principal que es el dióxido de carbono puede convertirse en biocombustibles. Hasta el momento no se cuenta con catalizadores con rendimientos elevados. Una vez se cuente con catalizadores adecuados, la rentabilidad del proceso de dióxido de carbono a combustibles dependerá directamente del diseño del reactor fotocatalítico; si bien el costo de estos reactores pudiera no ser muy elevado, el grado de conversión que se logre permitirá determinar una estimación de los costos de adquisición y operación de los equipos de acondicionamiento y de separación. Por esta razón, aún no se cuentan con estudios formales de los costos de estos procesos en una escala mayor a la experimental. Sin embargo, recientemente se ha publicado un análisis económico del proceso de producción de metanol a partir de dióxido de carbono en un foto-reactor catalítico, realizando la separación con membranas [Chakraborty, Nayak, Pal, Kumar, Banerjee, Mondal, Kumar, Pal y Ruj, 2020]. En dicho estudio se determinó que obtener una producción anual de 20 toneladas de metanol conlleva una inversión de capital 41,500 dólares y costos de operación de 13,125 dólares. Estos valores se obtuvieron a través de modelos matemáticos, sin considerar costos asociados al mantenimiento (preventivo y correctivo) ni pérdidas de producción por paros de emergencia, entre

otros.

Finalmente, la conversión de cenizas de combustión a absorbentes solares no se ha reportado en la literatura. Sin embargo, un estudio reciente menciona que el costo de producción de un litro de recubrimiento absorbente a partir de biomasa residual es de 1 dólar [López-Sosa, González-Avilés, Hernández-Ramírez, Medina-Flores, López-Luke, Bravo-Sánchez, y Zárate-Medina 2020]. El principal contribuyente al costo de producción es el consumo de energía eléctrica.

Conclusiones

En el presente artículo se propuso un proceso integral para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales. En este proceso, los residuos agroindustriales son utilizados para la producción de pellets, que son un tipo de biocombustible sólido. Posteriormente, los pellets son quemados para generar energía eléctrica; adicionalmente se generan gases de combustión y cenizas. Los gases de combustión pueden ser empleados para la producción de biocombustibles mediante procesos de fotocatalisis. Asimismo, las cenizas pueden utilizarse para la síntesis de recubrimientos solares absorbentes.

Este tipo de procesos resulta de vital importancia para el aprovechamiento integral de los residuos agroindustriales, ya que permite la generación de productos de valor agregado que se reincorporen al mercado. De igual manera, contribuye a la síntesis de procesos con cero residuos. A pesar de que se tienen algunos resultados alentadores en los procesos descritos es necesario continuar con la investigación para incrementar rendimientos, disminuir el consumo de energía y así dar rentabilidad a los procesos de generación de bioenergía y bioproductos con cero residuos.

Resumen curricular

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Profesor-Investigador de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, e Investigadora Nivel 2 del Sistema Nacional de Investigadores. Sus intereses de investigación versan sobre procesos sustentables para la producción de biocombustibles.

Dr. Julio Armando de Lira Flores

Doctor en Ciencias en Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico de Celaya. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Química de la UAQ y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. Su investigación se enfoca en temas de Seguridad y optimización de Procesos.

Efraín Quiroz Pérez

Profesor-Investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro y posee el Nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadores. Sus áreas de interés incluyen el modelado, simulación y análisis de procesos mediante técnicas de Dinámica Computacional de Fluidos.

Sergio Iván Martínez Guido

Investigador Postdoctoral de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, e Investigador Nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadores. Sus intereses de investigación radican en modelado y optimización matemática de cadenas de suministro.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por CONACYT, mediante el proyecto 279753. Sergio Iván Martínez Guido agradece el financiamiento para el programa Postdoctoral PRODEP otorgado por la Secretaría de Educación Pública, mediante el proyecto PRODEP-UAQ/332/19.

Referencias bibliográficas

Chakraborty, S., Nayak, J., Pal, P., Kumar, R., Banerjee, S., Mondal, P., Kumar, P., Pal, M., y Ruj, B. Catalytic conversion of CO₂ to biofuel (methanol) and downstream separation in membrane-integrated photoreactor system under suitable conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 675-690, 2020.

García Bustamante C.A., Masera Cerutti O. Estado del arte de la bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía del CONACYT. Imagia Comunicación S. de R.L. de C.V., ISBN: 978-607-8389-11-7, 2016.

Gutiérrez-Antonio C., Hernández S. Process Intensification

applied to waste-to-energy production. Waste-to-Energy. Nova Science Publishers. Chapter 4, ISBN 978-1-53614-432-1, 44-56, 2018.

ISO. Solid Biofuels. Fuel specifications and Classes, Part. 6: Graded non-woody pellets (ISO 17225-6), 2014.

Kennedy C.E. Review of Mid-to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials. Technical Report NREL/TP-520-31267, July, 1-53, 2002.

López-Sosa, L. B., González-Avilés, M., Hernández-Ramírez, L. M., Medina-Flores, A., López-Luke, T., Bravo-Sánchez, M., y Zárate-Medina, J. Ecological solar absorber coating: A proposal for the use of residual biomass and recycled materials for energy conversion. *Solar Energy*, 202, 238-248, 2020.

Martínez-Guido S.I., Ríos Badrán I.M., Gutiérrez-Antonio C., Ponce-Ortega J.M. Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy*, 130, 622-632, 2019.

Mejías-Brizuela N., Orozco-Guillen E., Galán-Hernández N. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41, 2016.

Salas Jiménez J.C., Quesada Carvajal H. Impacto ambiental del manejo de desechos sólidos ordinarios en una comunidad rural. *Tecnología en Marcha*, 19(3), 9-16, 2006.

Saval S. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-46, 2012.

Servín H., Peña M., Sobral H., González M. Thermal and optical analysis of selective absorber coatings based on soot for applications in solar cookers. *Journal of Physics: Conference Series*, 792(1), 1-6, 2017.

Tsai C.W., Chen H.M., Liu R.S., Asakura K., Chan T.S. NiO Core-Shell Structure-Modified Nitrogen-Doped InTaO₄ for Solar-Driven Highly Efficient CO₂ Reduction to Methanol. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(20), 10180-10186, 2011.

Tauro R., García C.A., Skutsch M., Masera O. The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 380-389, 2018.