

Noemí Hernández Neri, Claudia Gutiérrez Antonio y Juan Fernando García Trejo

Diseño de biocombustibles sólidos para un desarrollo sustentable

El uso de herramientas de simulación de procesos para la producción de biocombustibles sólidos permite analizar diferentes condiciones de procesamiento y seleccionar aquellas con alto rendimiento, costos de operación reducidos y un bajo impacto ambiental. México tiene un gran potencial en este ámbito para explorar alternativas de obtención de biocombustibles sólidos a partir de la biomasa.

Biocombustibles sólidos

Dada la tasa de crecimiento de la población mundial, cada vez con un mayor nivel de vida, se necesitará más y más energía para abastecer a los hogares, industrias y medios de transporte. En los últimos años, la **bioenergía** ha recibido un gran interés debido a que puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes fósiles de energía sin provocar un incremento en las emisiones de dióxido de carbono; además, permite la conversión de la biomasa, en especial de los desechos orgánicos rurales y urbanos, para su aprovechamiento energético (Islas y Martínez, 2010). En este sentido, la mitigación del problema del cambio climático es posible si la bioenergía participa significativamente en el suministro de energía en el mediano y largo plazo.

Los biocombustibles son un tipo de bioenergía (Islas y Martínez, 2010), definidos como combustibles producidos mediante la transformación de la biomasa y que pueden obtenerse en estado sólido, líquido y gaseoso. En la actualidad, representan una fuente potencial de energía renovable que gradualmente ayudará a eliminar la dependencia energética de las fuentes fósiles. Asimismo, conforme lo permitan los procesos productivos y las políticas gubernamentales, podrán abaratar el precio de la energía en todo el mundo.

En particular, el estudio de los biocombustibles sólidos es importante debido a que pueden utilizarse para generar energía eléctrica o calorífica, así como para producir otros biocombustibles. Los biocombustibles sólidos son aquellos carburantes compuestos por biomasa sometida a un proceso de conversión

Bioenergía

Energía renovable producida a partir de la biomasa, la cual incluye material orgánico, como los árboles, las plantas y los materiales de desecho.



como el astillado, la trituración y la compactación, para mejorar sus propiedades físicas y químicas; por ejemplo, es posible aumentar su poder calorífico por unidad de masa, lo cual representa una característica destacable para su comercialización.

México tiene un alto potencial para la producción de biocombustibles sólidos; sin embargo, las acciones para promover el uso de tecnologías modernas en el sistema energético nacional son hasta ahora insuficientes, debido a que actualmente no hay políticas o programas específicos que fomenten el uso de los biocombustibles sólidos en los sectores industrial y comercial (García y Masera, 2016). Aunado a lo anterior, también es importante superar los desafíos en la producción de los biocombustibles sólidos, tales como la optimización de métodos y procesos para reducir los costos, así como minimizar el impacto ambiental.

Los objetivos anteriormente mencionados pueden alcanzarse mediante el uso de tecnologías como la simulación de procesos, la cual es una herramienta de vital importancia para impulsar el desarrollo sostenible en México. La simulación, según Shannon (1975), es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este modelo, ya sea para comprender el comportamiento del sistema o para evaluar varias estrategias que mejoren su funcionamiento; es decir, la simulación imita el comportamiento de un sistema por medio de un modelo que representa la realidad.

En particular, en el ámbito de la producción, la simulación de procesos permite predecir el comportamiento de un proceso de transformación, lo cual posibilita resolver problemas del mundo real de una manera segura y eficiente. Así, el modelo propuesto proporciona la información necesaria para realizar un análisis que se puede verificar, comunicar y comprender fácilmente. Otra ventaja importante de la simulación de procesos es que reduce la necesidad de mano de obra, el tiempo invertido para realizar una investigación experimental, así como los materiales o recursos a utilizar, con lo cual disminuye el impacto ambiental en el proceso.

En todas las industrias y disciplinas, la simulación de procesos proporciona soluciones valiosas porque

facilita una visión clara de los sistemas complejos. A menudo, las simulaciones se utilizan cuando resulta imposible o poco práctico hacer experimentos en un sistema real, ya que las simulaciones se consideran de bajo riesgo. Esto ha ganado importancia en los últimos años porque se pueden utilizar para estudiar y comparar diseños alternativos, para solucionar problemas existentes, o bien para analizar el comportamiento de un nuevo sistema incluso antes de que se complete el prototipo, lo cual reduce costos y plazos de entrega. Con la simulación, se puede mejorar el diseño de futuras plantas de procesamiento, o bien aumentar el rendimiento de las ya existentes.

Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo es explorar el uso de la simulación de procesos para la obtención de biocombustibles sólidos. En primer lugar, se brindará información acerca de los simuladores y sus tipos, con especial énfasis en los simuladores de procesos; también se presentarán los diferentes simuladores de procesos disponibles en el mercado, incluido el *software* Aspen Plus, el cual se considera el más confiable por sus capacidades para hacer un análisis completo de los procesos de producción de biocombustibles sólidos. Posteriormente, se darán algunos ejemplos de los trabajos que se han reportado en torno al modelado de la producción de biocombustibles sólidos en *pellets* y, por último, se expondrán las perspectivas del uso de esta herramienta en México.

■ ■ ■ Simuladores de procesos

■ Un simulador es una herramienta que permite imitar situaciones reales mediante la elaboración de un modelo, el cual se emplea para analizar los efectos de realizar modificaciones de algunas condiciones, con el fin de construir conocimiento a partir de la experiencia. Es decir, los simuladores de procesos permiten responder a la pregunta “¿qué pasa si...?”. Por ejemplo, en los simuladores de manejo de un automóvil, que se emplean en algunos estados de México para obtener la licencia de conducir, se replican situaciones reales, como el paso de peatones, el funcionamiento de los semáforos e incluso condiciones de lluvia, con el objetivo de valorar las habilidades

de la persona que conduce el auto, así como su conocimiento y respeto de los reglamentos de tránsito vigentes, para determinar si procede o no la emisión de una licencia de manejo.

Existen dos tipos de simuladores: unos utilizados como instrumento de ocio y entretenimiento, por lo general, en videojuegos, y otros que se emplean en el ámbito profesional para la capacitación y el desarrollo de proyectos en diversas ramas del conocimiento. En el segundo tipo están los simuladores en materia educativa, usados por estudiantes que desean adquirir destrezas para enfrentarse a problemas matemáticos, físicos, entre otros; también se encuentran los simuladores clínicos, que permiten la evaluación de pacientes virtuales; además, existen los simuladores de negocios, que son un importante instrumento para la toma de decisiones y el desarrollo de actividades gerenciales en las diferentes actividades de una empresa. Algunos otros usos de los simuladores incluyen el análisis del impacto ambiental por diversas fuentes, el diseño de sistemas de comunicaciones y de transporte, la mejora de los sistemas de manufactura o procesos de producción, entre otros. En particular, en el sector industrial, la simulación de procesos es una herramienta que se ha popularizado y vuelto indispensable, ya que permite analizar los procesos de producción que se encuentran en fase de evaluación inicial (para decidir si se construyen o no), en fase de operación (para conocer su funcionamiento), o bien en fase de mejora (para evaluar el beneficio de realizar modificaciones en el proceso).

Los simuladores de procesos son un conjunto de programas tecnológicos que permiten el modelado de un proceso de producción. Para ello, debe defi-

nirse un proceso de producción como una serie de transformaciones que se realizan a una materia prima para obtener un producto. Esas operaciones se realizan en diferentes equipos, en los cuales se llevan a cabo procesos de acondicionamiento (calentar, enfriar, aumentar la presión o disminuirla), de conversión (reacciones químicas), así como de separación (para obtener con alta pureza los productos de interés). Por ello, los simuladores de procesos constan de distintos módulos para cada uno de los equipos y los tipos de procesamiento que deben realizarse a las materias primas; así, se incluyen bancos de datos que contienen información de las propiedades físicas y químicas de los compuestos, modelos de dichas propiedades, cálculos de equipos y análisis de costos, por lo que permiten simular una amplia variedad de procesos. Debido a que los simuladores son herramientas confiables, muchas veces se prefieren para así evitar la realización de experimentos y optimizar los recursos necesarios. Entre los simuladores más usados en la industria, la investigación y la enseñanza, se encuentran: HYSYS, Chemcad, Pro II, Super-Pro Designer y Aspen Plus. Este último, además de las bases de datos, incluye módulos o programas para representar el procesamiento de las materias primas (véase la Figura 1).

■ Procesos de producción de biocombustibles sólidos

■ Existen diferentes tipos de biocombustibles sólidos, tales como las astillas, briquetas, pacas y *pellets*. En el presente trabajo nos enfocamos en los *pellets*, pequeños cilindros que resultan de la densificación de la biomasa, la cual no es uniforme. Por ello, la

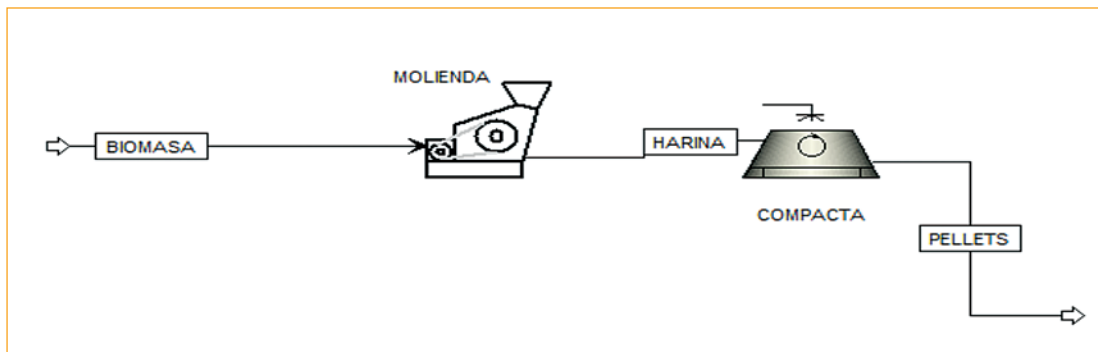


Figura 1. Diagrama de flujo para un proceso de pelletizado a partir de biomasa en el software Aspen Plus.

norma ISO 17725 (ISO, 2014) busca establecer especificaciones y clases para la comercialización de los biocombustibles sólidos que se originen de actividades de silvicultura, agricultura, horticultura y acuicultura; el objetivo es estandarizar las propiedades de calidad, como el poder calorífico, el cual depende del contenido de humedad de la biomasa, por lo que es importante determinar las condiciones ideales para realizar la compactación.

El proceso de producción de los *pellets* incluye operaciones de secado, trituración, densificación (o pelletizado) y clasificación por tamaño (véase la Figura 2). Es muy importante analizar el efecto que cada una de estas operaciones provoca sobre el rendimiento del proceso, el poder calorífico de los *pellets* y el consumo de energía. Las variables que pueden manipularse incluyen: la humedad de la biomasa antes de la densificación, el tamaño de las partículas resultantes de la trituración, así como la presión y temperatura de la compactación. La búsqueda de las variables ideales para la obtención de los *pellets* conlleva muchos experimentos, gastos en reactivos, empleo extenso de tiempo para el análisis, o bien riesgos potenciales en cada etapa; por ello, la simulación de procesos facilita el objetivo.

■ **Simulación de procesos de producción de biocombustibles sólidos**

■ En general, la simulación de un proceso de producción de biocombustibles sólidos requiere de información sobre el tamaño de las partículas de la biomasa, el contenido de humedad, así como la composición de las materias primas. Como se mencionó, estas variables influyen en el poder calorífico, por lo que es importante modelar correctamente el procesamiento de la biomasa. El uso de simuladores como Aspen Plus permite evaluar el efecto del tamaño de la partícula, por ejemplo, en el poder calorífico del *pellet*, así como en el consumo de energía del proceso. Esta información es valiosa para determinar si algún cambio afectará o no de manera significativa la calidad del producto, o bien el consumo de energía. Así, se puede analizar el costo-beneficio de manera previa a la implementación. Por ello, se reportan



Figura 2. Proceso de pelletizado.

muchos estudios en los que se emplea la simulación de procesos para analizar la producción de biocombustibles sólidos.

Por ejemplo, en Portugal, se propuso un modelo de simulación del proceso de combustión de biomasa que incluye la separación de sólidos y el secado del tallo de arroz, la cual fue la biomasa empleada en el estudio (Patrocínio, 2017); el modelo propuesto permitirá simular la operación en una planta de *pellets* para diferentes fuentes de biomasa y condiciones de operación. Otro estudio, en Canadá, evaluó técnica y económicamente la producción de *pellets* basados en residuos forestales, paja de trigo y pasto de hierba, para estimar los costos de producción de *pellets* y el tamaño óptimo de la planta de producción. En este caso, el modelo del proceso desarrollado en Aspen Plus fue útil para predecir el consumo de energía en

cada operación de la producción de *pellets*, lo que permitió generar estrategias para lograr el máximo aprovechamiento energético durante su procesamiento (Shahrukh, 2015). Por otra parte, en Argentina, se presentó un modelo de simulación para evaluar el rendimiento en términos económicos y de producción en una planta pelletizadora a partir de madera; con este modelo se analizaron algunos procesos, como molienda en húmedo, secado de materia prima, pelletizado, enfriado y empaclado. Este tipo de estudios permite evaluar la factibilidad económica, así como el rendimiento teórico, de la optimización del proceso de producción (Aqueri y cols., 2013).

En cambio, en México, el tema de la simulación de procesos para la obtención de biocombustibles sólidos no se ha desarrollado completamente. No obstante, el uso de esta herramienta es muy importan-





te para afrontar los principales desafíos que surgen al diseñar o mejorar los procesos de producción de biocombustibles sólidos. Aunado a ello, nuestro país produce una gran cantidad de biomasa, por lo que el impulso e integración de la cadena de aprovechamiento de este tipo de residuos es de vital importancia para el desarrollo sostenible. Los residuos agrícolas primarios, secundarios y agropecuarios tienen el potencial energético más elevado (IEA, 2015), y las estimaciones sugieren que esto aumentará en los próximos años (Rios y Kaltschmitt, 2013). Con base en los recursos potenciales de bioenergía de las actividades agrícolas en México, se estima que se produjeron 75.7 millones de toneladas de biomasa seca de 20 cultivos diferentes (Guo y cols., 2015); las principales fuentes de residuos de cultivos fueron el rastrojo de sorgo, residuos de maíz (rastrojo y mazorcas de maíz), paja de trigo, bagazo de caña de azúcar, bagazo de agave, pulpa de café y residuos de cítricos (obtenidos de fábricas de zumos y conservas de frutas). También otros residuos tienen el potencial de ser utilizados como materia prima para la producción de *pellets*, tales como aquellos de la poda de aguacate, mango, nueces, manzana, melocotón, uva, guayaba y ciruela.

Por lo anteriormente expuesto, la pelletización es un proceso que potencialmente permite aprovechar los residuos que hoy no se usan en la industria agrícola y forestal en México. No obstante, el proceso tiene asociados retos importantes, como la reducción de los costos de instalación de los equipos de producción, el transporte a plantas procesadoras, la disminución de la volatilidad del mercado de los *pellets* mediante el aseguramiento anticipado de la materia prima para estabilizar el suministro de los biocombustibles sólidos, la generación de confianza entre los consumidores, así como la mejora de la eficiencia energética de las tecnologías de producción y uso de estos biocombustibles sólidos (Sjoding y cols., 2013). Por lo tanto, es necesario implementar tecnologías más eficientes, desarrollar nuevas opciones tecnológicas y evaluar métodos alternativos que aseguren la producción y el uso sustentable de los *pellets*; en este sentido, la simulación de procesos permite hacer frente a los retos anteriormente mencionados.

Conclusiones

Los biocombustibles son uno de los tipos de bioenergía con mayor demanda y cuyo proceso puede ser diseñado o mejorado mediante el uso de herramientas de simulación que permiten realizar análisis de sensibilidad para diferentes variables del proceso, explorar soluciones alternativas y seleccionar aquellas con menores costos de materiales y de energía, para asegurar un buen rendimiento del proceso y la adecuada calidad del producto.

Agradecemos el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para el proyecto 279753. Asimismo, Noemí Hernández Neri recibió una beca de Conacyt para sus estudios de posgrado.

Noemí Hernández Neri

Universidad Autónoma de Querétaro.
noemi_hne@hotmail.com

Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.
claugtez@gmail.com

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.
juanfernando77@gmail.com



Lecturas recomendadas

- Aqueri, G., O. Horacio y P. L. Laneri (2013), *Planta de elaboración de pellets maderera: simulación y análisis proceso productivo* (tesis de doctorado), Universidad Argentina de la Empresa, Buenos Aires. Disponible en: <<https://repositorio.uade.edu.ar/xmlui/handle/123456789/3970>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- García Bustamante, C. A. y O. Maser Cerutti (2016), *Estado del arte de la bioenergía en México*, Guadalajara, Imagia Comunicación.
- Guo, M., W. Song y J. Buhain (2015), "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:712-725.
- IEA (2015), "Sustainable international bioenergy trade: securing supply and demand", *IEA Bioenergy Task 40 on Sustainable International Bioenergy Trade*. Disponible en: <<https://www.bioenergytrade.org/wp-content/uploads/sites/17/2013/09/iea-task-40-country-report-2014-us.pdf>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Islas Sampeiro, J. y A. Martínez Jiménez (2010), "Bioenergía", *Ciencia*, 61(2):30-39.
- ISO (2014), "ISO 17225-6:2014. Solid biofuels – Fuel specifications and classes. Part 6: Graded non-woody pellets", *International Organization for Standardization*. Disponible en: <<https://www.iso.org/standard/59461.html>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Patrocínio, F. (2017), *Aspen simulation of biomass conversion processes*, Lisboa, Instituto Superior Técnico. Disponible en: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258394/Resumo_Alargado_67971.pdf>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Rios, M. y M. Kaltschmitt (2013), "Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution", *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3):239-254.
- Shahrukh, S. M. (2015), *Energy Return on Investment and Techno-economics of Pellet Production from Steam Pretreated Biomass* (tesis de maestría), University of Alberta, Edmonton. Disponible en: <<https://era.library.ualberta.ca/items/1c380fbc-bf17-4189-bd37-baca6a9eddef>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Shannon, R. E. (1975), *System Simulation - The Art and Science*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- Sjoding D., E. Kanoa y P. Jensen (2013), *Developing a wood pellet/densified biomass industry in Washington State: opportunities and challenges*, Olympia, Washington State University Energy Program. Disponible en: <<https://www.msuxextension.org/forestry/WB2E/Pellets/Densified%20Biomass%20Report.pdf>>, consultado el 16 de diciembre de 2016.