

Zulema Juárez Orozco, Juan Fernando García Trejo y Claudia Gutiérrez Antonio



Revalorización de residuos

La transformación de los residuos derivados de un proceso permite generar nuevos productos, los cuales contribuyen a diversificar el portafolio comercial de las empresas, así como sus ingresos. Al mismo tiempo, la revalorización de los residuos coadyuva a resolver el problema de contaminación asociado con sus altos volúmenes de generación.

Introducción

La sociedad actual emplea una gran variedad de productos en sus actividades cotidianas, entre los cuales se incluyen enseres domésticos, alimentos, dispositivos electrónicos, ropa, vehículos y herramientas de diversos tipos. Además, debido al incremento poblacional, la demanda de estos productos continúa en ascenso y, como consecuencia, se requiere una mayor cantidad de materias primas para poder generarlos. Si bien este incremento en el consumo es bueno para los sectores productivos, una de las consecuencias no deseables de esta dinámica de producción es el aumento en la generación de los residuos; esto es, aquellos materiales que quedan después de haber realizado un trabajo u operación (RAE, 2019). Es decir, en el proceso de producción de un bien se van generando residuos o desperdicios, los cuales son materiales que ya no son útiles para el proceso del cual se derivan.

Existen diferentes tipos de residuos, dependiendo de la fuente de la cual se originen. Por ejemplo, los residuos sólidos municipales son aquellos generados en los hogares como resultado de las actividades cotidianas de alimentación, higiene y limpieza. Por otra parte, los residuos industriales se generan en los procesos productivos a gran escala, y pueden ser de diversos tipos. En la industria de la producción de jugos y néctares, las cáscaras y las semillas de las frutas procesadas son consideradas residuos; mientras que, en las empresas productoras de mobiliario, los residuos incluyen restos de madera, pinturas, solventes, textiles, entre otros. Muchos de estos residuos se generan en grandes volúmenes, por lo que, en la mayoría de los casos, representan un problema de contaminación. Usualmente, la disposición de estos residuos genera un costo adicional para las empresas, lo cual merma las utilidades derivadas de la venta del producto principal. No obstante, estos materiales aún podrían emplearse, ya sea de manera directa o mediante

algún tipo de procesamiento, para generar otros productos; a esta propuesta se le conoce como revalorización de residuos.

Los residuos pueden revalorizarse mediante diferentes procesos de transformación, los cuales pueden ser físicos, químicos y biológicos. En todos estos procesos pueden obtenerse diferentes tipos de productos, los cuales pueden incluir combustibles, alimentos para animales, plásticos y compuestos químicos. El aprovechamiento de estos materiales para la generación de nuevos productos posibilita una reducción significativa de los costos asociados con la disposi-

ción de dichos residuos. Esto constituye una estrategia muy interesante para las empresas del sector privado, ya que sus residuos se transforman en fuentes de ingresos, o bien pueden ser aprovechados dentro de algún proceso; así, las empresas se robustecen, diversifican sus portafolios, disminuyen sus residuos y maximizan sus ganancias. Por ello, la revalorización de los residuos es de gran importancia.

En el presente artículo se describirán las etapas necesarias para la revalorización de los residuos, que incluyen la caracterización del residuo y la elección de la estrategia más adecuada para su procesamiento.



Posteriormente, se presentará un análisis preliminar para la revalorización de residuos en la empresa CNH de México.

■ **Caracterización de los residuos**

■ Toda materia prima tiene una composición química asociada que le confiere sus propiedades. En general, una de las formas más comunes para caracterizar a una materia prima se basa en la naturaleza química de los componentes que la integran. En esta clasificación se consideran los siguientes tipos: triglicéridos, azúcares, almidones y lignocelulosa. Los primeros son todos aquellos materiales que constan de triglicéridos y ácidos grasos; por ejemplo, los aceites residuales del procesamiento de alimentos, o bien aquellos que se derivan de su uso, como los lubricantes en las máquinas industriales. Por otra parte, las materias primas también pueden incluir azúcares y almidones; tal es el caso de los residuos de la industria de la confitería. Por último, los materiales lignocelulósicos son aquellos residuos derivados del procesamiento de alimentos, como los bagazos y cáscaras, entre otros.

De esta manera, una vez que se conoce la composición de los residuos se puede evaluar el tipo de productos que pueden generarse a partir de ellos; entre éstos se pueden incluir compuestos de alto valor agregado, productos químicos, o bien biocombustibles (véase el artículo “Cadena de suministro para la producción de biocombustibles” en este número). Ejemplos de productos de alto valor agregado son aquellos que pueden emplearse en el sector alimenticio, farmacéutico y biotecnológico; uno de estos compuestos es la cafeína que se extrae del **cascabillo** del café, y que es utilizada en la producción de bebidas energéticas. Por otra parte, entre los productos químicos se encuentran aquellos compuestos que se emplean como solventes, reactivos o precursores para la fabricación de pinturas y plásticos, entre otros. En tanto, los biocombustibles que pueden generarse en estado líquido son el bioetanol, biobutanol, biodiésel, bioturbosina y diésel verde; en estado gaseoso, el gas de síntesis, gas natural y biogás; mientras que los pellets son los biocombustibles sólidos más populares.

Cascabillo →
Cascarilla que envuelve
al grano de café.

La caracterización de los tipos de residuos es el paso más importante en el proceso de revalorización, ya que los productos a generarse dependen de las características de los residuos. Por ejemplo, si el residuo consiste únicamente en material lignocelulósico, y éste posee una alta cantidad de lignina, la mejor alternativa es utilizarlo para generar un biocombustible sólido. Este residuo también podría emplearse para producir bioetanol; sin embargo, el proceso de conversión no sería tan eficiente, dado que la lignina contenida no se convierte en azúcares que puedan fermentarse para generar bioetanol.

Además de evaluar el tipo de componentes presentes en los residuos, también es importante verificar sus cantidades, pues si éstas son muy pequeñas, el proceso de recuperación o extracción puede ser demasiado costoso; es decir, la relación costo-beneficio no es la más adecuada. Por ello, una vez que los residuos han sido caracterizados y sus componentes cuantificados, se pueden elegir los productos con mayor potencial para su producción. A partir de los productos seleccionados, entonces se determinan las tecnologías de procesamiento, las cuales se presentan en la siguiente sección.

■ **Tecnologías de procesamiento**

■ Como se mencionó anteriormente, existen tecnologías físicas, químicas y biológicas para el procesamiento de los residuos, las cuales se describen a continuación.



Tecnologías físicas

Por medio de las tecnologías físicas de procesamiento se modifica el tamaño de la partícula del residuo (mediante trituración o molienda), su contenido de humedad (secado), o bien su densidad (densificación o compactación). A continuación, se presentan ejemplos de nuevos productos que se obtienen de la aplicación de este tipo de tecnologías.

Por ejemplo, los residuos de la industria forestal pueden ser triturados para obtener astillas de madera, las cuales se emplean como combustible en instalaciones térmicas tanto residenciales como industriales. Adicionalmente, mediante esta tecnología también pueden revalorizarse residuos de la industria mobiliaria, así como de transporte de maquinaria industrial.

Por otra parte, los residuos derivados de la cosecha de alimentos usualmente poseen bajas densidades (volúmenes elevados y reducido peso), así como altas cantidades de carbono. Esto último los hace susceptibles de emplearse como combustibles; no obstante, su baja densidad encarece mucho su transporte y complica su manejo. Por ello, la tecnología de densificación es empleada en los residuos agroindustriales para compactarlos en forma de pequeños cilindros de 6-8 mm de diámetro y con longitudes desde 3.15 mm hasta 40 mm (ISO, 2019); estos pequeños cilindros son conocidos como pellets y pueden reemplazar al carbón vegetal en las centrales carboeléctricas para la generación de energía eléctrica (Martínez-Guido y cols., 2019).

Asimismo, el proceso de secado se usa para la revalorización de los residuos. Por ejemplo, el excremento de aves de corral, debido a que posee altas cantidades de proteínas, se utiliza como materia prima para la fabricación de alimento para este tipo de animales. No obstante, este material debe secarse primero para eliminar tanto las bacterias nocivas como el exceso de humedad. Una vez que se reduce el contenido de humedad, este material se mezcla con melaza, para así obtener alimento para aves de corral. Como puede observarse, las tecnologías de procesamiento físico son relativamente sencillas y posibilitan la generación de nuevos productos útiles o comercializables.

Tecnologías químicas

Otra manera de modificar la composición de los residuos es mediante reacciones químicas. Entre las más comúnmente utilizadas se encuentran la combustión, la pirólisis y la gasificación.

La combustión es un proceso en el cual una materia prima libera su energía contenida; como productos se generan dióxido de carbono y agua. La energía liberada en este proceso se puede emplear para calefacción, generación de vapor, o bien generación de energía eléctrica; la aplicación específica depende de la cantidad de energía contenida en dicho residuo. Por ejemplo, la combustión de pellets combustibles (obtenidos con la tecnología de densificación) permite generar energía térmica para aplicaciones de secado de granos, o bien energía eléctrica cuando éstos son utilizados como reemplazo del carbón vegetal.

Por otra parte, la pirólisis es un proceso mediante el cual un material se convierte, a altas temperaturas y en presencia de una reducida cantidad de oxígeno, en tres productos: *bio-oil*, *bio-char* y gases. El *bio-oil* es una mezcla de ácidos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas y aromáticos; usualmente tiene un poder calorífico bajo, por lo que es empleado como materia prima para generar combustibles. Por otra parte, el *bio-char*, también conocido como carbón vegetal, puede utilizarse para generar otros combustibles, o bien para reducir la acidez de los suelos. Por último, los gases consisten principalmente de monóxido de carbono, hidrógeno, metano y dióxido de carbono. De estos gases pueden separarse el hidrógeno y el metano, los cuales se pueden usar como combustibles para la generación de energía eléctrica o calorífica. Prácticamente todos los residuos de cultivos agroindustriales, así como forestales, pueden procesarse para generar estos productos mediante pirólisis.

En tanto, la gasificación es un proceso en el cual los materiales se calientan a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno. Como resultado, todos los materiales sólidos pasan a la fase gaseosa y generan un producto que se conoce como gas de síntesis, formado por monóxido de carbono e hidrógeno, el cual puede utilizarse para producir otros combustibles, o bien puede quemarse para la generación de energía eléctrica o calorífica. De igual manera, la tecnolo-

gía de gasificación permite procesar prácticamente todos los residuos de cultivos agroindustriales, así como forestales, para generar gas de síntesis.

Tecnologías biológicas

Por otra parte, los residuos pueden utilizarse como alimento para el crecimiento de microorganismos y organismos. En el caso de los microorganismos, derivado de su digestión, se generan productos valiosos, mientras que los organismos son sacrificados para extraer los compuestos que son utilizados para fabricar productos de diversa índole. Por ejemplo, los residuos agroindustriales pueden ser convertidos en alcoholes mediante la tecnología de fermentación; dichos alcoholes incluyen bioetanol y biobutanol. Los alcoholes generados pueden utilizarse como aditivos para gasolina, o bien como materias primas para la generación de plásticos y otros productos químicos.

Ahora bien, los residuos orgánicos, como aquellos provenientes de restaurantes, cafeterías o industrias procesadoras de alimentos, pueden usarse como materia prima para el crecimiento de organismos como la mosca soldado negra. Este insecto se alimenta, crece, se reproduce y genera larvas; estas últimas son sacrificadas para extraer su aceite, el cual puede usarse para producir combustibles. El resto de la biomasa se puede emplear para producir harinas para la alimentación de peces.

■ **Caso de aplicación: análisis preliminar para la revalorización de residuos en CNH**

■ CNH de México es una empresa dedicada a la producción de maquinaria agrícola. Como resultado de su proceso de producción se generan diferentes tipos de residuos; uno de ellos se constituye por la madera proveniente del empaqueo de la maquinaria agrícola, así como motores y transmisiones. Estos residuos de madera ya no son de utilidad en el proceso de empaqueo; no obstante, tienen un alto potencial para ser reutilizados. En la Figura 1 se presentan los residuos de madera que se generan en dicho proceso productivo.

Con el objetivo de analizar de manera preliminar el potencial de uso de estos residuos, se buscó infor-

mación relacionada con su composición química. De acuerdo con lo reportado en la literatura, este tipo de madera contiene altas cantidades de lignina, cerca de 30% (Bernabé-Santiago y cols., 2013). Debido a lo anterior, es un material idóneo para la producción de pellets combustibles. Cuando este tipo de biomasa se densifica, se incrementa tanto su presión como su temperatura. Como resultado de esto último, la lignina se funde y actúa como un agente aglomerante; esto le da robustez y dureza al pellet combustible.

La producción de los pellets incluye las etapas de triturado, acondicionamiento y densificación (o pelletizado). En la producción de los pellets, el tamaño de la partícula es importante, ya que si es muy grande o muy pequeño el pellet no tiene mucha resistencia mecánica. Asimismo, el grado de humedad también es relevante, ya que si se encuentra muy seco se incendia al compactarse, y si está muy húmedo no se compacta de manera adecuada. Otra variable por considerar es la presión de compactación, la cual usualmente no puede ser modificada en las pelletizadoras comerciales. Con base en los reportes de la literatura, los pellets de madera poseen un poder



Figura 1. Residuos de madera del proceso productivo.

calorífico en el orden de los 18 MJ/kg, lo cual se encuentra por debajo del poder calorífico del carbón mineral (21 MJ/kg) y el carbón vegetal (29 MJ/kg); no obstante, el poder calorífico resultante es bastante competitivo para generar energía térmica.

Con base en esta información se estima que por cada 1 000 kg de residuos de madera se podrían generar 800 kg de pellets combustibles, considerando una eficiencia de conversión de 80%, que es bastante conservadora. El uso de estos pellets permitiría dejar de adquirir 685 kg por año de carbón mineral, 497 kg por año de carbón vegetal, o bien 335 kg por año de diésel de origen fósil. En este último caso, calculando que el precio por litro de diésel es de \$21.42 (CRE, 2019), esto representaría un ahorro anual de \$7,175.7 pesos.

Es claro que el uso de los residuos de madera contribuirá de manera significativa a resolver el problema de la generación de residuos en la empresa CNH, además de que le permitirá generar energía a partir de sus propios residuos, con lo cual disminuirían los costos asociados a la compra de combustibles fósiles. Considerando estos resultados, debe hacerse un análisis detallado con el objetivo de evaluar las condiciones óptimas para realizar el peletizado de dichos residuos, así como una evaluación de los pellets combustibles resultantes en comparación con los valores establecidos por la norma. De igual manera, se debe cuantificar la energía necesaria en el proceso de obtención de los pellets, con el fin de evaluar cuánta energía es posible obtener de los pellets combustibles, en comparación con la energía necesaria para producirlos.

Conclusiones

La revalorización de residuos es una estrategia promisoriosa para reducir los costos de operación de las empresas, diversificar su portafolio de productos y, al mismo tiempo, aprovechar de manera integral sus insumos. Es importante realizar los análisis preliminares con base en la literatura científica reportada, ya que esto posibilitará proponer alternativas para el aprovechamiento integral de los residuos. Si el análisis preliminar es favorable, debe llevarse a cabo la

caracterización de los residuos, así como la selección de productos y tecnologías de procesamiento.

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), mediante el proyecto 299418, para la realización de este trabajo.

Zulema Juárez Orozco

CNH de México.

zulema.juarez@cnhmexico.com.mx

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.

juanfernando77@gmail.com

Claudia Gutiérrez-Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.

claudia.gutierrez@uaq.mx

Referencias específicas

- Bernabé-Santiago, R., L. E. A. Ávila-Calderón y J. G. Rutiaga-Quñones (2013), “Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán”, *Madera Bosques*, 19(2): 21-35.
- CRE (2019), *Precios de gasolinas y diésel reportados por los permisionarios*, México, Comisión Reguladora de Energía. Disponible en: <<http://www.cre.gob.mx/ConsultaPrecios/GasolinasyDiesel/GasolinasyDiesel.html>>, consultado el 1 de marzo de 2021.
- ISO (2019), “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 1 de marzo de 2021.
- Martínez-Guido, S. I., I. M. Ríos-Badrán, C. Gutiérrez-Antonio y J. M. Ponce-Ortega (2019), “Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants”, *Renewable Energy*, 130: 622-632.
- RAE (2019), “Residuos”, *Diccionario de la lengua española*, en línea.