

Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos: estudio de caso, Madrid, Cundinamarca

Fast Pyrolysis for Producing Biofuels from Urban Solid Waste: Case Study, Madrid Cundinamarca

Daniela Acosta-Rubio^a, Lizbeth Castro-Camacho^a, Claudio Alberto Moreno-Arias^{a*}

RESUMEN

El presente artículo propone analizar el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos y establece como caso de estudio el municipio de Madrid, Cundinamarca. Los resultados presentados se obtuvieron del proyecto *Diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos (RSU)*, desarrollado por los autores. Para dicho análisis, se tiene en cuenta la disponibilidad de residuos en el municipio, se establecen los diferentes parámetros de operación, y se determinan las etapas del proceso. Posteriormente se desarrollan tanto el balance de materia como el de energía y se sintetiza la información en el diagrama PFD. Finalmente se consideran las metas planteadas en el Protocolo de Kioto (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], s.f. b) y lo establecido por el Departamento Nacional de Planeación Colombia (2016), en su Documento Conpes 3874, definiendo así el proyecto como una economía circular. Con esta información se obtiene una producción anual de aproximadamente 967,3 toneladas de biochar, 4183,5 toneladas de bioaceite y 1287,7 toneladas de biogás, únicamente para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos producidos en el municipio de Madrid. Sin embargo, se requieren elevados costos de inversión, además de profundización en las investigaciones sobre el diseño de la planta y sus parámetros de operación. Esta información puede utilizarse como base para el diseño de futuros procesos de pirólisis. Además, es necesario destacar que la producción de dichos biocombustibles con residuos sólidos brindaría al país impactos positivos económicos, ambientales y sociales.

PALABRAS CLAVE: residuos sólidos urbanos; biomasa lignocelulósica; reactores pirolíticos; biocombustibles; energía sostenible.

ABSTRACT

This article analyzes the energy use of urban solid waste, establishing the municipality of Madrid, Cundinamarca, as a case study. The results were obtained from the project *Design of the pyrolysis process for biofuel production from urban solid waste (USW)* written by the authors. For this analysis, the availability of waste in the municipality is taken into account, the different operating parameters are established, and the process stages are determined. Subsequently both the material and energy balances are developed, and the information is synthesized in the PFD diagram. Finally, the goals established in the Kyoto Protocol and the *Conpes Document* are considered, thus defining the project as a circular economy. With this information, annual production of approximately 967.3 tons of biochar, 4183.5 tons of bio-oil, and 1287.7 tons of biogas are obtained, only for the use of organic solid waste produced in the municipality of Madrid. However, high investment costs are required as well as further research on plant design and operating parameters. This information can be used as a basis for designing future pyrolysis processes. It is also necessary to highlight that producing such biofuels from solid wastes would provide the country with positive economic, environmental, and social impacts.

KEYWORDS: urban solid waste; lignocellulosic biomass; pyrolytic reactors; biofuels; sustainable energy.

^a Fundación Universidad de América, Programa de Ingeniería Química, Bogotá, Colombia. ORCID Acosta-Rubio, D.: 0000-0002-4223-8231; Castro-Camacho, L.: 0000-0002-6834-2256, Moreno-Arias, C. A.: 0000-0001-6103-8238

* Autor de correspondencia: claudio.moreno@profesores.uamerica.edu.co

Introducción

En la actualidad, la excesiva explotación de los recursos naturales y la industrialización han generado que problemas como el calentamiento global, la progresiva extinción de la biodiversidad, el agujero en la capa de ozono, entre otros, influyan notoriamente en el agotamiento de los ecosistemas y causen las diferentes afectaciones sobre la humanidad. Debido al continuo crecimiento de la población, la rápida urbanización y el deseo por mejorar estándares de vida, la tasa de RSU ha aumentado principalmente en los países en desarrollo. Como respuesta a esta situación se ha implementado el concepto *desarrollo sostenible*, a través del cual se plantean la correcta gestión y aprovechamiento de los residuos como nuevas fuentes de empleo y oportunidades nada desdeñables para el desarrollo económico. Por esta razón en la actualidad, la correcta disposición de RSU se contempla necesaria e imprescindible, planteándose en este estudio como una alternativa tanto para el manejo de estos residuos como para su aprovechamiento. Bastidas et al. (2019) afirman que la pirólisis surge como una alternativa sostenible para la disposición de RSU, ya que es un proceso de degradación térmica de la biomasa, dado en ausencia de oxígeno, es decir, en un ambiente completamente inerte. Hernández et al. (2016) plantean en su estudio que este proceso tiene tres etapas: acondicionamiento y alimentación de la materia prima al reactor, transformación de la biomasa, y separación y purificación de los productos.

Con este proceso es posible transformar la biomasa en tres productos diferentes: producto líquido, denominado alquitrán o bioaceite; producto sólido, más conocido como carbón o char, y producto gaseoso utilizable como gas combustible. Son de amplio valor comercial y de múltiples usos en la industria. Sin embargo, es necesario tener precaución con la generación de subproductos indeseados.

En primer lugar, este artículo contempla el diseño del proceso de pirólisis para el aprovechamiento de los residuos orgánicos producidos en Madrid, seguimiento que abarca desde los requerimientos del proceso hasta el diagrama PFD, que presenta tanto las etapas como las condiciones de operación y balances necesarios de materia y energía.

En segundo lugar, se presentan los resultados correspondientes al balance de materia, la descripción teórica de los productos por obtener y el análisis de los beneficios que se obtendrían en caso de concretar dicho proceso. Por último, se analizan los resultados obtenidos de acuerdo con otros estudios.

Diseño del proceso

Requerimientos del proceso de pirólisis

El proceso de aprovechamiento de residuos sólidos no solo requiere del reactor de pirólisis, sino que, previa a la reacción, es necesario realizar una adecuada selección de componentes aptos para el proceso, separándolos de los elementos que puedan causar toxicidad o resultan inadecuados para el sistema (Secretaría de Desarrollo Social, 2001). Dichos componentes pueden ser los residuos clasificados como orgánicos, además de aquellos plásticos y polímeros no reciclables o que no pueden ser reutilizados. Garzón (2019) precisa que es de vital importancia realizar el secado de los desechos, con el fin de eliminar el exceso de humedad presente, y, finalmente, controlar el tamaño de partícula de acuerdo con los requerimientos del reactor pirolítico por utilizar. Además, Klug (2012) afirma que luego de la reacción de pirólisis, es necesario separar y purificar los productos obtenidos, y realizar su acondicionamiento para ser almacenados y comercializados.

Castells (2012) propone que, para el diseño de este proceso, es necesario plantear las diferentes operaciones y procesos unitarios involucrados en cada etapa, desde la alimentación y acondicionamiento de la materia prima hasta la obtención tanto del producto líquido, como sólido y gaseoso. La Figura 1 muestra las etapas planteadas para el proceso de producción de biocombustibles con residuos sólidos urbanos, las cuales incluyen la clasificación inicial de los residuos sólidos urbanos; un posterior acondicionamiento, con etapas de secado, trituración y tamizado; el proceso unitario principal, es decir, la reacción de pirólisis, y las etapas correspondientes a la separación y purificación de los productos para obtener (Steinvorth, 2014). La Figura no incluye las condiciones de operación del proceso, puesto que estas se especificarán más adelante.

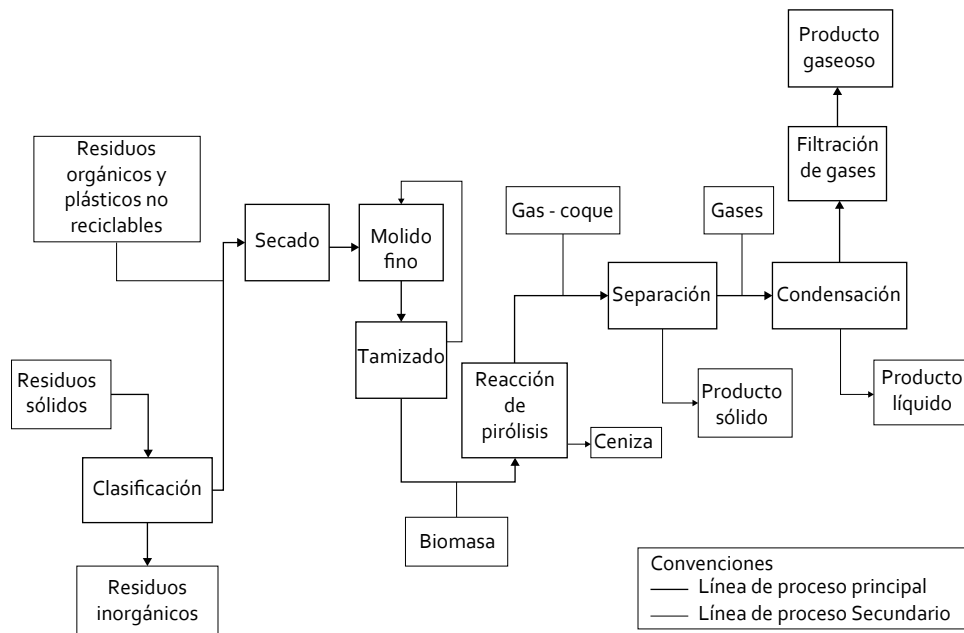


Figura 1. Diagrama de bloques

Nota. El esquema muestra el proceso en donde se contemplan las operaciones y procesos unitarios. Figura de elaboración propia.

Condiciones de operación

Santos et al. (2013) plantean en su estudio que generalmente los procesos de pirólisis se llevan a cabo bajo presión atmosférica, con temperaturas entre los 300 y los 600 °C y un ambiente inerte. Además de esto, argumentan que la pirólisis rápida se caracteriza por realizarse en condiciones que favorecen altos coeficientes de transferencia de calor y tasas de calentamiento de la biomasa, en un reactor con buen control de temperatura, y a alrededor de 500 °C. Por otra parte, Martínez y Bohórquez (2017) afirman que el tiempo de residencia de los productos primarios de la pirólisis en el reactor está entre los 0,5 y los 10 segundos, lo cual permite maximizar el rendimiento del líquido, evitando la fragmentación térmica y catalítica, provocada por los vapores que originan principalmente productos gaseosos no condensables, e impidiendo la recombinación de productos primarios de pirólisis con precursores de carbón. De acuerdo con lo mencionado y teniendo en cuenta las principales variables que afectan el proceso de pirólisis rápida, se establecen las siguientes condiciones de operación:

§ Intervalo de temperatura entre 425 y 550 °C, según lo establecido por Andrade y Corredor (2019) en su estudio.

§ Tamaño de partícula inferior a 2 mm, de acuerdo con estudio realizado por Bridgwater, Meier y Radlein (1999).

§ Tiempo de residencia de gases inferior a 2 segundos.

§ Tasa de calentamiento mayor a 16 667 °K/s, considerando lo establecido por de Wild, Reith y Heeres (2011) en su estudio.

Marrupe (2014) afirma que para alcanzar las condiciones mencionadas es posible basarse en la transferencia de calor, la cual se logra mezclando a fondo las partículas de biomasa con un portador de energía inerte caliente en un lecho fluidizado, o usando un dispositivo de mezcla de tornillo mecánico. En este caso, se plantea el uso de un reactor de lecho burbujeante, teniendo en cuenta lo expuesto por Montoya et al. (2014). Este tipo de reactor posee un lecho de arena de cuarzo, muy utilizada en la industria, y, debido a sus propiedades, genera una buena fluidización y un gran tamaño de burbuja, lo cual beneficia el proceso. Cortázar (2014) menciona además que dicho reactor se caracteriza por permitir una transferencia de calor eficiente, brinda un mezclado homogéneo de los sólidos, que impide cambios bruscos de temperatura, dando un amplio margen

de seguridad, tiene un alto rendimiento en la producción de combustibles y su manejo y operación son sencillos (Durán, 2014).

Balance de materia

De acuerdo con la Contraloría de Cundinamarca (2019), el promedio de generación de residuos sólidos en el periodo 2018-2019 para el municipio de Madrid fue de 1822 ton/mes, los cuales se desechan en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo. Según la alcaldía del municipio, el 62,4 % corresponde a residuos sólidos orgánicos, dato base para el balance de materia del proceso (Alcaldía Municipal de Madrid, 2017). De este modo se obtiene una alimentación al reactor de pirólisis de 1136,93 ton/mes, lo cual equivale a 0,438 kg/s.

En primer lugar, se realiza el balance de materia en el proceso de secado, donde a través de aire se pretende llevar la humedad de los residuos desde un 55 %, de acuerdo con la humedad óptima de los residuos establecida por Alonso et al. (2003), hasta un 5 %. Para el desarrollo del balance de materia en el secador, se tiene en cuenta la ecuación general de balance que se muestra a continuación:

Ecuación 1. *Ecuación general de balance*

$$\text{Salida} - \text{Entrada} + \text{Acumulado} = \text{Generado}$$

El volumen de control se establece como se muestra en la Figura 2, donde las corrientes 1 y 2 corresponden al flujo de biomasa húmeda y seca respectivamente, mientras que las corrientes 3 y 4 pertenecen al flujo de aire.

Con la Ecuación 1 es posible plantear el balance de materia tanto para la biomasa seca (bs) como para el aire seco (as), además del agua (w), asumiendo un sistema ideal en el que no se presenta acumulación de componentes.

$$\dot{m}_{bs,1} = \dot{m}_{bs,2}$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_3 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_{as,3} = \dot{m}_{as,4}$$

$$\dot{m}_{w,1} + \dot{m}_{w,3} = \dot{m}_{w,2} + \dot{m}_{w,4}$$

Con un flujo de alimentación de biomasa de 0,438 kg/s es posible determinar el flujo de agua presente en los residuos sólidos urbanos, y el flujo de lo que corresponde a biomasa seca.

$$\dot{m}_1 = 0,438 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{w,1} = 0,241 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{bs} = 0,197 \text{ kg/s}$$

Teniendo en cuenta la humedad final que se desea obtener, es posible determinar el valor para el flujo de salida de la biomasa \dot{m}_2 , además del flujo correspondiente al agua $\dot{m}_{w,2}$.

$$\dot{m}_2 = 0,207 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{w,2} = 0,0104 \text{ kg/s}$$

Para conocer el flujo de aire, necesario para realizar dicho proceso de secado, se establece como presión de saturación del vapor un valor de 16,59 mmHg, el cual corresponde a la temperatura diaria máxima promedio del municipio de Madrid, 19 °C. Por otra parte, se establece la presión atmosférica promedio como 1019,1 hPa, lo cual corresponde a 764,4 mmHg y una humedad relativa promedio de 71 % (The Weather Channel, 2021). Con esta información

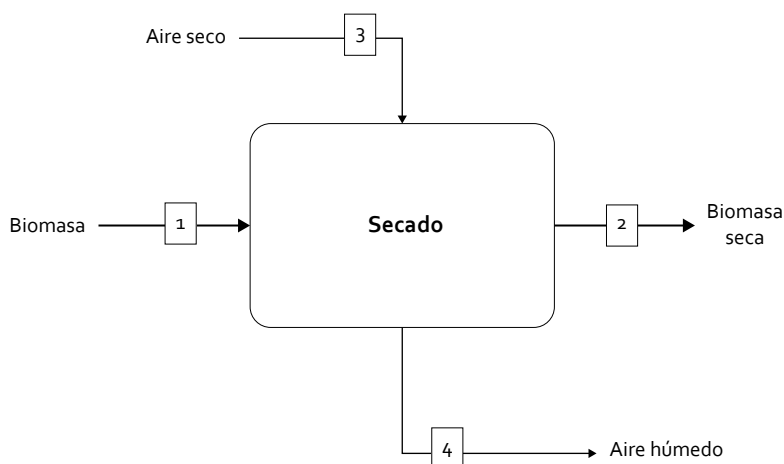


Figura 2. Volumen de control de la operación de secado

Nota. Esquema del proceso de secado con sus respectivas corrientes de aire y biomasa. Figura de elaboración propia.

es posible dar resolución a la Ecuación 2, para obtener una fracción molar de agua en el aire correspondiente a $0,0154 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol a.s.}}$ y su respectiva fracción másica de $0,00957 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg a.s.}}$.

Ecuación 2. *Fracción molar para el agua en el aire*

$$y_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_T}$$

Con la presunción de que el aire de salida del secador se encuentra saturado, al ser este el punto límite del proceso de secado con aire como elemento de arrastre, con una humedad relativa del 100 %, y una temperatura de 19 °C, se resuelve nuevamente la Ecuación 2, de la que se obtiene una fracción molar para el agua en el aire de salida de $0,0217 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol a.s.}}$ y su respectiva fracción másica de $0,0135 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol a.s.}}$. Con esto y la ecuación general de balance, se obtiene un resultado para de 25,1 kg/s y para de 25,3 kg/s.

De esta manera es posible concluir que se requieren 25,1 kg/s de aire seco para secar 0,438 kg/s de biomasa, y obtener 0,207 kg/s de biomasa seca. Cabe destacar que puede ser más conveniente realizar el proceso de secado a una temperatura mayor, lo cual implicaría un flujo menor de aire seco requerido. De acuerdo con el estudio realizado por Cortázar (2014), es posible realizar el secado a temperaturas entre 100 y 200 °C, y reducir el contenido de humedad hasta alrededor de un 5 %. Sin embargo, esto hace necesario determinar el consumo energético de dicho calentamiento. Por otra parte, es posible secar previamente el aire utilizando un adsorbente, lo cual sería más económico.

Luego del secado, la biomasa es objeto de un proceso de trituración y tamizado de acuerdo con lo establecido en la Figura 1. Sin embargo, para efectos teóricos y facilidad en los cálculos, se asume una eficiencia ideal tanto en el triturador como en el tamiz de finos, por esta razón se toma como alimentación del reactor pirolítico un flujo másico de 0,207 kg/s.

Para el desarrollo del balance de materia en el reactor, se tiene en cuenta la ecuación general de balance, donde la entrada es equivalente a la salida, por lo tanto, se emplea la Ecuación 3.

Ecuación 3. *Ecuación general de balance para el reactor*

$$\text{Entrada} = \text{Salida} = \dot{m}_{\text{char}} + \dot{m}_{\text{bio-oil}} + \dot{m}_{\text{gas}}$$

Con el fin de determinar el flujo de cada uno de los productos para obtener, se utiliza la Ecuación 4, estableciendo los rendimientos para la pirólisis rápida, con un 65 % para el líquido, 15 % para el sólido y 20 % para el gas.

Ecuación 4. *Ecuación de rendimiento*

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\dot{m}_{\text{producto}}}{\dot{m}_{\text{RSU}}} * 100$$

obtienen así

$$\dot{m}_{\text{char}} = 0,15 * 0,207 \text{ kg/s} = 0,0311 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{bio-oil}} = 0,65 * 0,207 \text{ kg/s} = 0,1345 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = 0,20 * 0,207 \text{ kg/s} = 0,0414 \text{ kg/s}$$

La corriente de producto del reactor de pirólisis consiste en una mezcla entre gases condensables, gases no condensables y coque. Mediante diversos procesos de separación es posible obtener cada uno de los productos en corrientes separadas, tal como se muestra en la Figura 1.

Balance de energía

Para el desarrollo del balance de energía del proceso, en primer lugar, es necesario conocer la capacidad calorífica de los residuos sólidos urbanos. Para este caso, se establece un valor de 1678,68 J/kgK, teniendo en cuenta la composición de C, H, O, N y S presente en los residuos sólidos orgánicos planteada por Cortázar (2014) y su calor específico como elemento. Este valor se asume constante a lo largo del proceso.

El reactor de lecho burbujeante se caracteriza por contener en su interior un lecho de arena de cuarzo en la mayoría de los casos, el cual se calienta a través de la combustión de un gas en el fondo. Para completar la reacción de pirólisis es necesario llevar el reactor a un intervalo de temperatura de entre 425 y 550 °C, de acuerdo con lo establecido. Para efectos teóricos y dar resolución a las ecuaciones, se establece una temperatura de 487,5 °C, como promedio del intervalo.

Ecuación 5. *Requerimiento energético del reactor*

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{sensible} + \dot{Q}_{reacción} + \dot{Q}_{latente} + \dot{Q}_{Perdidas}$$

Andrade y Corredor (2019) plantean que, debido a que la pirólisis es un proceso en el que inicialmente la materia orgánica se reduce a moléculas más simples y a elevadas temperaturas, algunos productos primarios se reducen a productos secundarios y se volatilizan; por lo tanto, es posible concluir que en este proceso ocurre una serie de reacciones tanto exotérmicas como endotérmicas. Por esta razón, en el reactor de pirólisis, el calor de reacción se libera de las reacciones exotérmicas y simultáneamente se consume en la vaporización de los productos, por lo que el calor neto del proceso de pirólisis corresponde únicamente al calor sensible.

Según esto, con unas pérdidas de calor del 5 % y la configuración del reactor, se obtiene un resultado del intercambio energético entre el reactor y los residuos orgánicos equivalente a 162,8 kJ/s.

Para el funcionamiento del reactor se establece utilizar parte del biogás producido como gas de servicio. Ante esto, según lo establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011), se sabe que el poder calorífico del biogás es en promedio de 21,1 MJ/m³ y, de acuerdo con el balance de materia, se obtienen 0,056 m³/s de biogás. Con esta información, es posible concluir que se requiere un 13,86 % del biogás producido para el funcionamiento del reactor de pirólisis.

Por otra parte, de acuerdo con lo planteado por Jaramillo (2007), para el condensador se analiza un intercambiador de calor de doble tubo, el cual opera en contraflujo, con el fin de asegurar que la mayor cantidad de gases condensables pase a estado líquido. Se tiene en cuenta que al intercambiador de calor ingresa la corriente gaseosa proveniente del reactor de pirólisis, esta contiene tanto los gases condensables como los no condensables. Además, es necesario destacar que este intercambiador de calor contempla no solamente el calor sensible correspondiente al enfriamiento del material volátil, sino que también incluye el calor latente referente al cambio de fase que se produce en la condensación del bioaceite. Sin embargo, y de acuerdo con lo mencionado por Andrade y Corredor (2019), las propiedades

del material volátil cambian a lo largo del equipo, aumentando la complejidad del balance de energía, razón por la cual no se considerará el calor latente para este caso. Se establecen 200 °C como temperatura de salida del bioaceite, teniendo en cuenta el *Manual de productos* de refinación presentado por la Refinadora Costarricense de Petróleo, Recope (2011), que plantea que el intervalo de ebullición para la mayoría de compuestos relacionados con hidrocarburos oscila entre los 250 y los 350 °C.

Ecuación 6. *Flujo de calor*

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p (T_{out} - T_{in})$$

Al utilizar la Ecuación 6 tanto para el cálculo del flujo de calor en el condensador, como para el cálculo del flujo de agua de enfriamiento necesaria en el proceso, se obtienen resultados de 80,7kW y 0,271 kg/s, respectivamente. Cabe destacar que se estableció una temperatura de salida del agua de 90 °C, de acuerdo con el estudio de Westerhof et al. (2011) y se tuvo en cuenta la temperatura ambiente máxima promedio del municipio de Madrid, 19 °C.

Diagrama de proceso PFD

En la Figura 3 se muestra el proceso general de pirólisis para los residuos sólidos urbanos, el cual empieza con la clasificación de estos, con el fin de obtener únicamente los residuos orgánicos. Posteriormente, se realiza el acondicionamiento de la biomasa a través del secado, la trituración y el tamizado, para finalmente ingresar al reactor pirolítico de lecho burbujeante. Para la trituración se emplean trituradores municipales, también conocidos como molinos trituradores de basura, los cuales son de eje horizontal o vertical y pueden tener martillos raspadores. Es importante utilizar un molino de trituración adecuado, buscando obtener un material homogéneo del mismo tamaño y con una forma similar, que facilite así el trabajo del reactor pirolítico y aumente la eficiencia del proceso. Para el tamizado se establece un tamiz de finos, cuyo diámetro de partícula promedio sea aproximadamente igual a 2mm, de acuerdo con lo establecido en las condiciones de operación; se retienen así los residuos sólidos gruesos no sedimentables para trasladarlos nuevamente al proceso de trituración (Interempresas, 2017).

En la reacción pirolítica se generan los tres productos de interés; sin embargo, es necesario realizar diferentes procesos de separación, los cuales se inician por el separador de ciclón, donde se obtiene

el producto sólido y considerado uno de los medios menos costosos de recolección de polvo. Posteriormente se realiza un proceso de condensación, donde se obtiene el producto líquido a través de un

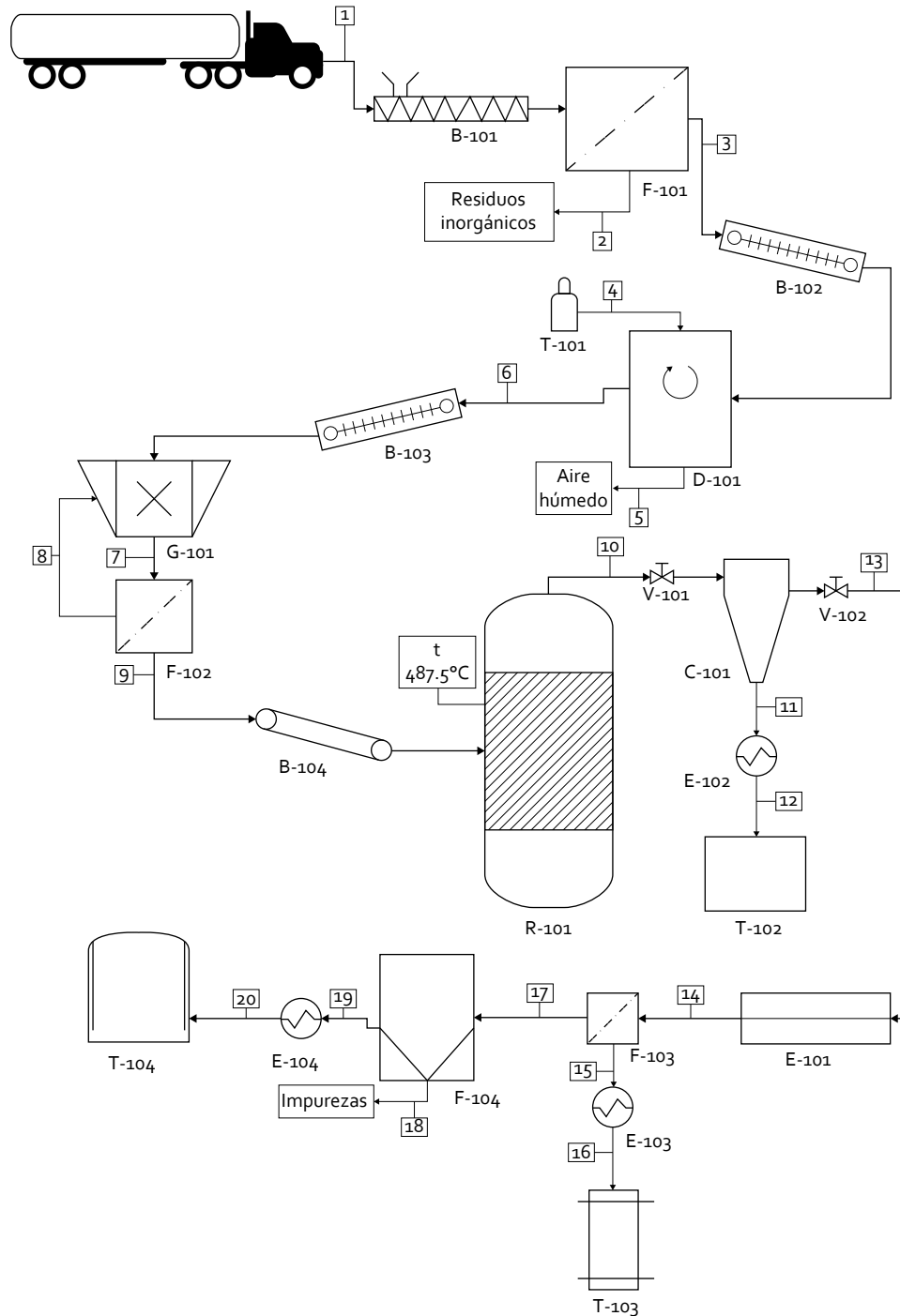


Figura 3. Diagrama PFD para el proceso de producción de biocombustibles con residuos sólidos urbanos
 Nota. Esquema del proceso para la pirólisis de residuos sólidos urbanos, partiendo de la recepción de los mismos, hasta el almacenamiento de los productos finales. Figura de elaboración propia.

intercambiador de calor de doble tubo con agua de enfriamiento, cuya operación es en contraflujo según lo planteado por Jaramillo (2007). Se permite así una mayor eficiencia en el proceso, asegurando que la mayor cantidad de gases condensables pasen a estado líquido. Andrade y Corredor (2019) aseguran que es posible utilizar una serie de hasta tres intercambiadores de calor en serie para esta operación.

Finalmente, para eliminar impurezas se realiza filtración del producto gaseoso; sin embargo, generar un producto con más de 97 % de metano necesita una purificación más exhaustiva, que elimine componentes como CO_2 , H_2S , vapor de agua, nitrógeno y oxígeno. Cabe destacar que las operaciones unitarias de tamizado y filtración de gases se consideran ideales, por lo tanto, no generan desperdicios ni merma.

Resultados

Resultados balance de materia

La Tabla 1 muestra los resultados para el balance de materia correspondiente para cada una de las corrientes presentes en el diagrama de proceso PFD (Figura 3). Debido a la complejidad de la composición de algunas corrientes, se desconoce su valor de densidad y, por consiguiente, su flujo volumétrico, razón por la cual se marcan como *.

Descripción de los productos

Urien (2013) afirma que el producto sólido, también conocido como biocarbón, carbón vegetal o biochar, está compuesto principalmente por carbón, sales, metales y cenizas, y Campoverde (2016) menciona que es el material carbonoso el que logra reordenarse y establecerse como sólido luego de sufrir

Tabla 1. Resultados balance de materia

Corriente	Flujo másico (kg/s)	Flujo volumétrico (m^3/s)	Densidad (kg/m^3)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Presión (bar)
1	0,703	*	*	19	1,05
2	0,265	*	*	19	1,05
3	0,438	*	*	19	1,05
4	25,1	21,09	1,19	19	1,05
5	25,3	2,76	9,18	19	1,05
6	0,207	*	*	19	1,05
7	0,207	*	*	19	1,05
8	0	*	*	19	1,05
9	0,207	*	*	19	1,05
10	0,207	*	*	487,5	1,05
11	0,031	$7,21\text{e}^{-5}$	430	487,5	1,05
12	0,031	$7,21\text{e}^{-5}$	430	19	1,05
13	0,176	*	*	487,5	1,05
14	0,176	*	*	200	1,05
15	0,135	$1,41\text{e}^{-4}$	960	200	1,05
16	0,135	$1,41\text{e}^{-4}$	960	19	1,05
17	0,041	0,037	1,10	200	1,05
18	0	*	*	200	1,05
19	0,041	0,037	1,10	200	1,05
20	0,041	0,037	1,10	19	1,05
Agua enfriamiento	0,271	$2,71\text{e}^{-4}$	1000	19	1,05

Nota. Se muestra el balance de materia para el diagrama de proceso presentado en la figura 15. Debido a la complejidad de la composición de algunas corrientes, se desconoce su valor de densidad y, por consiguiente, su flujo volumétrico, razón por la cual son marcados como *. Tabla de elaboración propia.

varias reacciones termoquímicas. Con este producto se pueden obtener otros subproductos como el carbón activo, de acuerdo con lo indicado por Cortázar (2014); además, puede ser utilizado como biocombustible y materia prima para la elaboración de diferentes compuestos químicos.

Campoverde (2016) afirma también que el producto líquido, también llamado bioaceite, líquido pirolítico o aceite biocombustible, se obtiene como consecuencia de la condensación de los gases condensables, y es una mezcla que contiene agua, una alta cantidad de oxígeno y variedad de moléculas de elevado peso molecular. Este *bio-oil* se caracteriza por ser un líquido de color café oscuro que varía a negro, según el contenido de partículas submicro-métricas de carbón presentes; además, es más denso que el agua y posee un fuerte olor a humo. Tiene un poder calorífico similar al de la madera y cerca del 50 % del poder calorífico de un petróleo combustible en términos volumétricos. Cortázar (2014) asevera que el uso más común del *bio-oil* es combinado con combustibles fósiles para ser usado como combustible de transporte; sin embargo, es imperante mejorar sus características fisicoquímicas. Para ello se recurre a la catálisis, bien mediante hidrogenación o mediante el uso de zeolitas.

Por último, Urien (2013) asegura que el producto gaseoso del proceso de pirólisis hace referencia a los gases incondensables del proceso, los cuales están conformados por hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, hidrocarburos desde C4 hasta C7, amoníaco, oxígeno, monóxido y dióxido de carbono, entre otros. Cortázar (2014) menciona que los posibles usos de este gas son similares a los producidos en la gasificación, tales como la producción de electricidad, para la elaboración de diferentes compuestos químicos o la producción de calor.

Análisis de los beneficios

Jaramillo y Zapata (2008) afirman que los desechos son un tema que debe ser tratado con cuidado, aún más los RSU, los cuales debido a sus diversas características químicas generan problemas de salubridad y deterioro del medioambiente. Estos efectos son provocados principalmente por contaminación atmosférica, contaminación edáfica, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, afectación por

olores y proliferación de plagas y aparición de focos infecciosos. Además de esto, Jaramillo y Zapata (2008) detallan que la mayoría de los problemas por olores se generan debido al proceso de descomposición de los residuos, lo que produce así malos olores a las poblaciones cercanas. Asimismo, para verter los residuos en los diferentes rellenos sanitarios, se hace necesario utilizar diferentes tipos de maquinaria para procesos de trituración, cernido, transporte y ventilación, lo cual en la mayoría de los casos genera ruidos fuertes y molestos, y afecta así tanto a los trabajadores como a la población de los alrededores (Noguera y Olivero, 2010).

El desarrollo de este proyecto podría mitigar los problemas mencionados, además de brindar beneficios tales como conservación de recursos, recuperación de áreas, disminución de niveles de contaminación, consciencia ambiental, aumento en la vida útil de rellenos sanitarios, mejora de la calidad de vida de las comunidades aledañas a los rellenos, entre otros.

Además, el proyecto contribuye al compromiso del país en el cumplimiento del Protocolo de Kioto, que pretende disminuir la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂, CH₄, N₂O, HFC, TFC y SF₆ a través de la disminución de los residuos y la producción y el uso de combustibles amigables con el ambiente.

Por otra parte, con el desarrollo de este proyecto se puede encaminar un sistema de economía circular, teniendo en cuenta lo establecido en la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos – Conpes 3874 de 2016 (Departamento Nacional de Planeación Colombia, 2016), la cual está enfocada en la gestión de los residuos no peligrosos, y busca aportar al desarrollo sostenible y a la adaptación y mitigación del cambio climático, planteando los fundamentos para avanzar hacia la economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos. Con esta se quiere lograr que el valor de los productos y materiales se mantenga durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, que los residuos y el uso de recursos se reduzcan al mínimo, y que los recursos se conserven dentro de la economía cuando un producto alcanza el final de su vida útil, con el fin de volverlo a utilizar repetidamente y seguir creando valor.

Discusión

Con base en la revisión bibliográfica y los análisis realizados, se puede afirmar que el uso de los RSU como materia prima para la producción de biocombustibles a través de la pirólisis aprovecha dichos residuos de manera sostenible. Sin embargo, actividades como el reciclaje y la reutilización de múltiples elementos desechados sigue siendo vital e imprescindible. De acuerdo con el estudio de Cortázar (2014), los RSU contienen energía que se puede utilizar para la posterior generación de energía eléctrica. Obtener electricidad de residuos municipales ayudaría a reducir los gases de efecto invernadero, debido a que producen menos gases que los emitidos por la electricidad basada en el petróleo y sus derivados. Con respecto a los biocombustibles, al ser producidos con residuos orgánicos y tecnologías avanzadas, permiten ser más ecológicos y desarrollados que los derivados del petróleo. Además, son más fáciles de mezclar con los biocombustibles, lo que ayuda a reducir los niveles de CO₂ (González y Kafarov, 2009).

El proceso de producción de biocombustibles con RSU producidos en el municipio de Madrid permite obtener un aproximado de 80,61 toneladas de biochar, 348,62 toneladas de bioaceite y 107,31 toneladas de biogás al mes. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que dichos valores pueden variar de acuerdo con el tiempo de descomposición de los residuos, su composición, la fracción orgánica que presenten y las condiciones a las que se sometan. Igualmente, de acuerdo con el análisis de diversos estudios es posible afirmar que al utilizar la pirólisis rápida como método térmico de descomposición, el rendimiento será mayor para el producto líquido y menor para el producto sólido (Ledesma, 2017).

Por otra parte, para el aprovechamiento de residuos orgánicos es importante realizar una adecuada selección y acondicionamiento, con el fin de evitar que ingresen al reactor componentes que causen toxicidad o provoquen daños en los equipos. Sumado a esto, materiales como metales y vidrio generan un elevado consumo de energía en el reactor y se transforman en cenizas, por lo tanto, no son aprovechables para el proceso. Asimismo, la pirólisis rápida incluye el secado de la materia prima, importante porque el contenido de agua debe ser mínimo en el

aceite líquido producido. Finalmente, es importante utilizar un molino de trituración adecuado, con el fin de obtener un material homogéneo y del mismo tamaño, que facilite así el trabajo del reactor pirolítico y aumente la eficiencia del proceso (Klug, 2012).

En un país como Colombia, los RSU pueden ser considerados materia prima inagotable, puesto que, de acuerdo con lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ([MADS], s.f. a), en el país se producen aproximadamente 27 500 toneladas de desechos al día. Además, esta fuente está enteramente disponible para obtener biocombustibles y aprovechar su potencial energético, entre otras características con diferentes aplicaciones. También presenta oportunidades de economía circular al dar un uso a materiales que son considerados residuos, en beneficio de los recursos y contra el impacto ambiental actual.

Conclusiones

Los componentes aprovechables presentes en los residuos sólidos orgánicos son principalmente la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, los cuales a partir de una descomposición térmica pueden ser fácilmente transformados en biocombustibles.

El proceso de aprovechamiento de RSU a través de la pirólisis cuenta con diferentes etapas que van desde el acondicionamiento de la materia prima, pasan por la reacción de pirólisis, y finalizan en la separación y purificación de los productos; procesos con los que se obtienen 967,3 toneladas de biochar, 4183,5 toneladas de bioaceite y 1287,7 toneladas de biogás anualmente, aprovechadas de los residuos producidos en el municipio de Madrid, Cundinamarca.

Los productos obtenidos a través de pirólisis de RSU pueden ser considerados biocombustibles de segunda generación, los cuales tienen múltiples usos que van desde la generación de electricidad y energía hasta su uso como materia prima en diversos compuestos químicos y combustibles.

Es necesario realizar el proceso de manera experimental, con el fin de conocer con precisión valores como el calor específico de los residuos sólidos orgánicos, y así determinar con exactitud los requerimientos energéticos del proceso.

La información presentada en este artículo puede basar el desarrollo de plantas pirolíticas tanto en el municipio de Madrid como en otros sectores del país, y contribuir al desarrollo sostenible, brindando beneficios ambientales y sociales.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Madrid Colombia, 2017. Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio de Madrid dando cumplimiento a la Resolución 0754 de 2014. Madrid, Colombia.
- Alonso, C., Martínez, E., Morena J. (Coord.), 2003. Manual para la gestión de los residuos urbanos. Ecoiuris, Madrid.
- Andrade, A., Corredor, A., 2019. Análisis energético del esquema tecnológico del proceso de pirólisis rápida para la producción de bioaceites a partir de neumáticos de desecho. Trabajo de grado. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, DC.
- Bastidas, D., Miño, N., Rosero, M., 2019. Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Bridgwater, T., Meier, D., Radlein, D., 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Org. Geochem.* 30(12), 1479-1493. DOI: 10.1016/S0146-6380(99)00120-5
- Campoverde, X., 2016. Obtención y valoración de combustible líquido por medio de pirólisis, a partir de residuos domésticos. Trabajo de grado. Carrera de Ingeniería en Biotecnología de los Recursos Naturales, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Castells, X., 2012. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos, Madrid.
- Departamento Nacional de Planeación Colombia, 2016. Conpes 3874, Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Bogotá, DC.
- Contraloría de Cundinamarca Colombia, 2019. Gestión integral de los residuos sólidos en el departamento de Cundinamarca. Bogotá, DC.
- Cortázar, M., 2014. Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, Biscay, España.
- de Wild, P., Reith, H., Heeres, E., 2011. Biomass pyrolysis for chemicals. *Biofuels* 2(2), 185-208. DOI: 10.4155/bfs.10.88
- Durán, M., 2014. Reactores de lecho fluidizado y lecho burbujeante en la gasificación de biomasa residual. *Rev. Fuentes Reventón Energ.* 12(2), 35-43.
- Garzón, D., 2019. Aprovechamiento de los residuos orgánicos del relleno de Doña Juana para obtención de energía. Trabajo de grado. Facultad de Educación Permanente y Avanzada, Fundación Universidad de América, Bogotá, DC.
- Gonzalez, A., Kafarov, V., 2009. Producción de biocombustibles de tercera generación: Extracción de aceite de microalgas para la producción de biodiesel. En: IV Simposio de Química Aplicada (SIQUIA). Quindío, Colombia.
- Hernández-Berriel, M., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., Buenrostro-Delgado, O., 2016. Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32, 11-22. DOI: 10.20937/rica.2016.32.05.02
- Interempresas, s.f. Tamiz de finos: adecuado para los procesos de depuración de agua residual y la extracción de sólidos en procesos industriales. *Web Corporativa DAGA*, disponible en: <https://cutt.ly/Imfzxhc>; consultado: junio de 2021.
- Interempresas, 2017. Los molinos trituradores en el proceso de reciclaje de plásticos. *Web Corporativa del 18 de noviembre*, disponible en: <https://cutt.ly/hnvszPt>; consultado: junio de 2021.
- Jaramillo, G., Zapata, L., 2008. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Jaramillo, O., 2007. Intercambiadores de calor. Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en: <https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>; consultado: junio de 2021.
- Klug, M., 2012. Pirólisis, un proceso para *derretir* la biomasa. *Rev. Quím. PUCP* 26(1-2), 37-40.
- Ledesma, I., 2017. Diseño de una planta piloto de pirólisis rápida de la fracción orgánica de rechazo de RSU. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Martínez, A., Bohórquez, L., 2017. Evaluación de la eficiencia de biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en matriz acuosa. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Marrupe, D., 2014. Diseño de un reactor de lecho fluidizado para la transformación termoquímica de biomasa u otros combustibles. Trabajo de grado. Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), s.f. (a) Gestión integral de residuos de aparatos electrónicos (RAEE). Disponible en: <https://>

- www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/residuos-de-aparato-electricos-y-electronicos-raee/; consultado: junio de 2021.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). s.f. (b) Proyectos Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL-POA). Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/proyectos-mecanismo-de-desarrollo-limpio/>; consultado: junio de 2021.
- Montoya, J., Chejne, F., Castillo, E., Acero, J., Gómez, C., Sarmiento, J., Valdés, C., Garzón, L., Osorio, J., Tirado, D., Blanco, L., Moreno, N., Marrugo, G., Ospina, E., 2014. Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Noguera, K., Olivero, J., 2010. Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34(132), 347-356.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011. Manual de biogás. Santiago.
- Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), 2011. Manual de productos. San José.
- Santos, F., Colodette, J., Queiroz, J., 2013. Bioenergia e biorrefinaria cana de açúcar e espécies florestais. Independiente, Viçosa, Brasil.
- Secretaría de Desarrollo Social México, 2001. Manual técnico - administrativo para el servicio de limpia municipal. México, DF.
- Steinvorth, A., 2014. Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. *Éxito Empresarial* (253), 1-4.
- The Weather Channel, 2021. Pronóstico del tiempo y condiciones meteorológicas para Madrid, Cundinamarca. Disponible en: <https://cutt.ly/nmfz0G9>; consultado: Julio de 2021.
- Urien, A., 2013. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual Tesis de maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Westerhof, R., Brilman, D., García-Pérez, M., Wang, Z., Oudenhoven, S., van Swaaij, W., Kersten, S., 2011. Fractional condensation of biomass pyrolysis vapors. *Energy Fuels* 25(4), 1817-1829. DOI: 10.1021/ef2000322