Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas

Néstor D. Montiel-Bohórquez y Juan F. Pérez

Grupo de manejo eficiente de la energía (GIMEL), Departamento de ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia; Calle 67 No. 53-108, Medellín, Colombia.
(e-mail: jfernando.perez@udea.edu.co)

Recibido Abr. 13, 2018; Aceptado Jun. 16, 2018; Versión final Jul. 3, 2018, Publicado Feb. 2019

Resumen

Se determinan estrategias termodinámicas para la conversión energética de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en plantas de incineración bajo condiciones sub-estequiométricas. La valoración energética de RSU es una alternativa para mitigar los impactos ambientales que genera su disposición final, siendo la producción de RSU de la ciudad de Medellín (Colombia) de aproximadamente 1800 ton/día. El análisis se lleva a cabo mediante un modelo en equilibrio termoquímico del proceso de gasificación, donde se estudia el efecto del contenido de humedad y la relación equivalente combustible-aire en el proceso termoquímico. El potencial energético de los RSU de la ciudad es de 28 a 44 MW eléctricos. Las estrategias termodinámicas para aprovechar energéticamente los RSU en plantas de incineración bajo condiciones sub-estequiométricas, de modo autotérmico y evitando la fusión de cenizas, establecen que el proceso se debe llevar a cabo con una relación equivalente combustible-aire de gasificación entre 1.5 y 3.3, independiente del contenido de humedad de los RSU.

Palabras clave: valoración energética; residuos sólidos urbanos; equilibrio termoquímico; gasificación

Energy Generation from Municipal Solid Waste. Thermodynamic Strategies to Optimize the Performance of Thermal Power Plants

Abstract

In this study, thermodynamic strategies are determined for the energy conversion of Municipal Solid Wastes (MSW) in incineration plants under sub-stoichiometric conditions. Energy generation from MSW is an alternative to mitigate the environmental impacts derived by their final disposal, being the production rate of MSW in Medellín city (Colombia) of about 1800 ton/day. The analysis is conducted by means of a thermochemical equilibrium model of the gasification process, where the effect of moisture content and fuel-air equivalence ratio on the thermochemical process is studied. The energy potential of MSW from the city is between 28 and 44 MWe. The thermodynamic strategies for energy recovery from MSW in incineration plants at sub-stoichiometric conditions, under auto-thermal regimens and avoiding ash fusion, establish that the process must be carried out with a fuel-air equivalence ratio between 1.5 and 3.3, regardless of the moisture content of the MSW.

Keywords: energy recovery; municipal solid waste; thermo-chemical equilibrium; gasification

INTRODUCCIÓN

La creciente producción de residuos sólidos urbanos (RSU) está directamente relacionada con el aumento de la población en áreas urbanas y con el desarrollo económico. Actualmente más de la mitad de la población mundial se ubica en áreas urbanas (Kumar y Samadder, 2017b) y la tasa de crecimiento de la población en estas zonas se estima en 1,5% (Ouda et al., 2016). Con la mayor demanda de bienes y servicios de la población, para el año 2025 se estima que la producción global de RSU será de 2.200 millones de toneladas al año (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012). Por tanto, es urgente para los países en vía de desarrollo, que no poseen programas de gestión integral de residuos sólidos que los implementen, considerando los RSU como un recurso y no como un problema (Larochelle, Turner, y LaGiglia, 2012). Castel (2012), Seoáñez (2013), y Moreno, Moral, García, Pascual, y Bernal (2016) plantean varias alternativas de valorización de los residuos, tales como el reciclaje, el compostaje, y la biodigestión. Adicionalmente, los RSU pueden ser aprovechados para generación de energía a través de procesos bioquímicos (digestión aeróbica y anaeróbica) y procesos termoquímicos (incineración, gasificación y pirólisis). Los procesos termoquímicos tienen mayor potencial energético y mayor capacidad de reducción del volumen de RSU (Nordi, Palacios-Bereche, Gallego, y Nebra, 2017; Seoáñez, 2013). Se estima que en todo el mundo, aproximadamente 130 millones de toneladas de RSU son procesadas en plantas de Residuo-a-Energía (RAE) cada año, y producen 45 GW-h (Poletto y Da Silva, 2009).

La incineración de RSU es el método más usado entre los procesos termoquímicos, esto se debe a que tiene la capacidad de procesar residuos con composición heterogénea (Castaldi et al., 2017). Sin embargo, este proceso se da a altas temperaturas, lo que favorece la emisión de sustancias con grave impacto en el ambiente y la salud pública, tales como NO_x , SO_x , HCl, CO, MP, PCDDs y PCDFs, donde se destacan las PCDDs y PCDFs por sus propiedades físico-químicas y por ser clasificados como agentes cancerígenos (Castaldi et al., 2017; García, Vaca, y Talero, 2013; Ibarluzea y Basterretxea, 2004; Kumar y Samadder, 2017a). Los incineradores a gran escala más usados para procesar los RSU, suelen ser calderas de parrilla móvil bajo regímenes de combustión directa, las cuales operan con aire primario (superior al estequiométrico), y aire secundario para garantizar la oxidación del material sólido carbonoso, por lo que alcanzan temperaturas en torno a los 1.500 K (Yu, Ma, y Liao, 2010).

Yang, Sharifi, y Swithenbank (2007) plantean modificar el régimen de operación de los sistemas tradicionales basados en combustión a condiciones sub-estequiométricas, reduciendo el aire primario entre un 50% y 60%. Este modo de operación reduce el material particulado y los metales pesados evaporados en la corriente de gases, se obtienen menores temperaturas en el lecho y por tanto menor formación de NO_x , MP, SO_x , PCDDs y PCDFs, y disminuye la tendencia a fusión de las cenizas (Castaldi et al., 2017). Estos aspectos reducen los costos de operación y mantenimiento de las plantas. Sin embargo, las menores temperaturas reducirán la conversión de carbón en el proceso, aumentando el contenido de carbón en la ceniza (Yang et al., 2007). No obstante, la conversión de carbón puede alcanzar valores superiores al 99% ajustando los parámetros de la caldera, tales como tiempo de residencia del material incinerado bajo condiciones sub-estequiométricas (Yang et al., 2007).

El proceso de gasificación, conocido como oxidación parcial de sólidos carbonosos, transformará los RSU en una mezcla de especies gaseosas formada principalmente por CO, CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , y N_2 . El gas será oxidado con el aire secundario buscando aumentar la eficiencia de combustión global, y reduciendo los impactos ambientales negativos, asociados a la formación de emisiones contaminantes, por lo que se considera un proceso más sostenible que la incineración (Arena, 2012; Castaldi et al., 2017; Luz et al., 2015). En las calderas de parrilla móvil la transformación termoquímica del sólido se desarrolla de modo similar al lecho fijo, donde los principales sub-procesos son el secado, la devolatilización, la oxidación y la reducción (Yang et al., 2007; Yu et al., 2010).

El proceso de gasificación de los RSU ha sido estudiado en varios trabajos. El principal objetivo ha sido evaluar el potencial de esta tecnología como alternativa para el manejo integral de los RSU, analizando el efecto de parámetros de operación y propiedades de las materias primas en el proceso. El alto contenido de material orgánico en los RSU (~60%) le proporciona un alto contenido de humedad, por ello resulta de gran interés analizar el efecto de la humedad en la gasificación. Con el mayor contenido de humedad de los RSU, disminuye la temperatura del proceso, el poder calorífico del gas de gasificación y la eficiencia de segunda ley. Esto se debe al mayor consumo energético requerido para evaporar el agua, ya que la menor temperatura de proceso inhibe la producción de gases combustibles (Bhavanam y Sastry, 2013; Thakare y Nandi, 2015). A medida que la temperatura del proceso de gasificación aumenta, las reacciones de gasificación se favorecen y con ello aumentan las concentraciones de H_2 y CO, derivando un incremento en la eficiencia del proceso (Bhavanam y Sastry, 2013; Mendoza, Bula, Gómez, y Corredor, 2012).

Medellín es la segunda ciudad con mayor población de Colombia y el segundo centro económico más importante del país. En el año 2017 la población de Medellín se estimó en 2'519.157 habitantes y la generación promedio de RSU fue aproximadamente 1.838 toneladas/día, con una generación per cápita de 0,73 kg/hab/día; las proyecciones indican que para el año 2025 la producción de RSU en Medellín será 2.350 toneladas/día (Secretaría de Gestión y Control Territorial y Secretaria de medio Ambiente, 2015). El 64 % de los RSU generados en Medellín provienen del sector residencial, mientras que el aporte de los sectores industrial, comercial, institucional, público y hospitalario se distribuyen en 11,2%, 13,4%, 5,8%, 2,8% y 2,8% respectivamente (Area Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006). La cobertura de recolección de RSU en Medellín es del 100%, y el principal método de disposición es el relleno sanitario (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012). La Secretaría de medio ambiente en 2015, reportó que en Medellín entre 2016 y 2027, se plantean metas de aprovechamiento del 2%, 8% y 10% a corto, mediano y largo plazo respectivamente, mientras que el porcentaje restante está destinado a disposición final en el relleno sanitario "La Pradera" ubicado a 50 km de Medellín (Secretaría de Gestión y Control Territorial y Secretaria de medio Ambiente de Medellín, 2015).

En este trabajo se determinan estrategias termodinámicas de proceso para la etapa de conversión de RSU (generados en la ciudad de Medellín) a gas bajo condiciones sub-estequiométricas, para su aprovechamiento a escala industrial en incineradores de parrilla móvil. Mediante un modelo en equilibrio termoquímico del proceso de gasificación en lecho fijo, se definen los contenidos de humedad y dosados relativos (relación equivalente combustible/aire-primario) del proceso de gasificación que favorezcan las condiciones auto-térmicas, de modo que la temperatura del proceso mantenga activa la reacción global de gasificación y se evite la fusión de la ceniza en el lecho del incinerador.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presenta la metodología seguida para llevar a cabo el estudio de la valoración energética de los RSU de la ciudad de Medellín-Colombia. De acuerdo a esto, se describe la composición química de los RSU generados en la ciudad; se analiza la tecnología de aprovechamiento energético de los RSU bajo condiciones sub-estequiométricas; se describe el modelo termo-químico utilizado para simular el proceso de gasificación de los RSU; se presenta el plan de simulación en función de los parámetros de entrada para el análisis, los cuales son contenido de humedad (CH) de los RSU y la relación equivalente combustible/aire (dosado relativo, F_{rg}); y se presenta el potencial energético de los RSU producidos en la ciudad de Medellín, calculado con base en la caracterización de los RSU y su tasa de generación.

Caracterización de los RSU

En la Tabla 1 (columna: % *global*) se presenta la composición de los RSU generados en Medellín, la cual fue tomada del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá (Universidad de Antioquia, 2006). La mayor fracción de los RSU corresponde a la materia orgánica (57,75%), seguida por el plástico (10,96%) y el papel (9,56%). Para la valoración energética se definió no incluir las fracciones de metal y vidrio, ya que estos materiales durante el proceso se comportan como inertes (Poletto y Da Silva, 2009); mientras que los residuos peligrosos fueron descartados ya que representan un alto riesgo para el ambiente y la salud. En el caso de la fracción denominada "otros", no se considera por la ausencia de información sobre su composición específica, lo que imposibilita estimar sus propiedades. Por tanto, las fracciones que se consideran para el proceso de aprovechamiento energético RAE fueron Materia Orgánica, Papel, Cartón, Plástico, Tetra pak, Textiles y Cuero; las cuales representan el 86,76% del total de los RSU generados en Medellín. Las nuevas proporciones que representan cada componente en el conjunto de RSU para generar energía fueron recalculadas y se presenta en la Tabla 1 (columna: % *adecuados RAE*).

En la Tabla 2 se presenta el análisis último en base seca de los RSU generados en Medellín, considerados adecuados para su aprovechamiento energético. Debido a la ausencia de información sobre la composición elemental de los RSU generados en Medellín, el análisis último, contenido de ceniza y humedad fueron estimados a partir de datos reportados en literatura científica (Ahmed y Gupta, 2009; Balcazar, Dias, y Balestieri, 2013; Haydary, Susa, y Dudáš, 2013; Rodrigues, Marcilio, Trierweiler, Godinho, y Pereira, 2010), en función de las fracciones másicas. El poder calorífico inferior en base seca fue estimado usando la correlación presentada por Shi, Mahinpey, Aqsha, y Silberman (2016), para RSU con un $R^2=0,938$. El contenido de humedad promedio de los RSU es del 48,51%.

Tecnología de Aprovechamiento

En la Fig. 1 se presenta un esquema simplificado de la sección de una caldera de parrilla móvil usada para procesar RSU, donde se identifican algunos elementos del reactor operando bajo condiciones de gasificación. Los RSU son depositados en la zona de alimentación del reactor, donde el alimentador se encarga de transportarlos hasta el lecho del reactor dónde están las entradas de aire primario sub-estequiométrico. Aquí

los RSU se someten al proceso de gasificación (secado, pirólisis, oxidación y reducción) y se genera el gas de gasificación (GG), quedando como subproducto el carbón y ceniza. El GG asciende hasta encontrarse con el aire secundario y es oxidado por este, la energía liberada durante la oxidación del GG con el aire secundario se usa para producir el vapor de agua que posteriormente se expandirá en las turbinas para generar trabajo mecánico y consecutivamente electricidad. Finalmente, los gases calientes son conducidos hacia los sistemas de enfriamiento y control de emisiones (Yang et al., 2007; Yu et al., 2010).

Tabla 1: Composición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados en Medellín y residuos adecuados para Residuo-a-Energía (RAE) (Datos de RSU tomados de Universidad de Antioquia, 2006).

Componente	% global de RSU	% adecuados RAE
Materia Orgánica	57,75	66,57
Papel	9,56	11,02
Cartón	2,11	2,43
Plástico	10,96	12,64
Vidrio	2,57	-
Metales	1,27	-
Tetra pak	2,91	3,35
Textiles	3,13	3,60
Cuero	0,33	0,38
Peligrosos	5,85	-
Otros	3,55	-
Total	100	100

Tabla 2: Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) adecuados para Residuo-a-Energía (RAE).

Análisis último en base seca	Masa (%)
C	49,24
H	6,51
O	36,09
N	1,99
S	0,31
Ceniza	5,86
Formula de sustitución	$C_{1}H_{1,5708}O_{0,5502}N_{0,0346}S_{0,0024}$
Relación RSU/aire estequiométrica	0,1492
Entalpía de formación [kJ/kmol]	$- 1.373,6 \times 10^2$
PCI _{base seca} [kJ/kg]	19.460

Descripción del modelo de equilibrio termo-químico

El modelo de gasificación combina el equilibrio químico y térmico de la reacción global del proceso de gasificación de combustibles carbonosos en lecho fijo, dicha reacción se presenta en las ecuaciones (1.1 y 1.2) (Pérez, Melgar, y Horrillo, 2016). El modelo predice la composición final del GG, así como la temperatura de reacción ($T_{proceso}$, K). Con la composición del GG es posible determinar un conjunto de parámetros termodinámicos, tales como eficiencia del proceso de gasificación en frío (CGE, %), Poder Calorífico Inferior del gas de gasificación (PCI_{GG}, MJ/m³N) y la eficiencia de segunda ley (eficiencia exergética, ExE, %). El modelo se presenta de modo detallado en Pérez et al. (2016); Ramos y Pérez (2017). Por medio de la fórmula de sustitución ($C_nH_mO_pN_qS_r$), es posible determinar el peso molecular de la biomasa, la cantidad molar de agua por mol de biomasa, la relación estequiométrica combustible/aire y la entalpía de formación de la biomasa (Pérez et al., 2016). La predicción de los productos de la reacción y la composición de GG está basada en el equilibrio químico entre las diferentes especies. Además se consideran las siguientes hipótesis: a) en un reactor de lecho fijo el contenido de alquitranes en el gas final puede ser despreciado (Mendiburu et al., 2014; Vaezi et al., 2012), b) el tiempo de residencia de los RSU en el reactor es suficiente para asumir que el contenido de carbón de los residuos es gasificado (Yang et al., 2007).

Fig. 1: Sección caldera de parrilla móvil de planta Residuos-a-Energía (Adaptada de Yang et al., 2007)

De este modo, la formación de material carbonoso como un sub-producto es despreciada (Vaezi et al., 2012), esta eficiencia de conversión de carbón de RSU en incineradores (>99%) operando en gasificación también es reportada por Yang et al. (2007). Para la solución del sistema, dos reacciones en equilibrio son incorporadas. En la zona de reducción del gasificador, el hidrógeno es reducido con el material carbonoso para producir metano (ver ecuación 2). La constante de equilibrio (k_1) relaciona las cantidades molares de las especies involucradas. La segunda reacción auxiliar es la reacción agua-gas (*water-gas shift*), la cual describe el equilibrio entre el H_2 y CO en presencia de agua (ecuación 3). El GG es modelado como un gas ideal, y el reactor opera a presión atmosférica.

$$\therefore x = \frac{1}{F_{rg} \cdot F_{st,bms}} \quad (1.2)$$

El cálculo de la eficiencia exergética (ExE) es definido como la relación entre la exergía que sale del gasificador (Exergía del GG) y la exergía que entra al reactor (exergía de la biomasa, humedad y aire), ver ecuación 4.1, la exergía está compuesta por dos términos: exergía química y física (ecuación 4.2) (Jarungthammachote y Dutta, 2007). La exergía del GG es presentada en las ecuaciones (5) y (6), donde n_i es el número de moles de cada especie gaseosa del GG, y E_i^0 es la exergía estándar de cada especie gaseosa del GG (Kotas, 2012); T_0 es la temperatura del estado de referencia (298 K). De acuerdo a Kotas (2012), la exergía de la biomasa puede ser determinada por medio de su análisis último, contenido de humedad (fracción másica) y el PCI en base seca. Por lo tanto, la exergía de la biomasa húmeda es calculada por medio de las ecuaciones (7) y (8).

$$ExE = \frac{Ex_{salida}}{Ex_{entrada}} \Rightarrow \therefore Ex_{salida} = Ex_{GG}, \therefore Ex_{entrada} = Ex_{bms} + Ex_{H_2O} + Ex_{aire} \quad (4.1)$$

$$\therefore Ex_i = Ex_{quím,i} + Ex_{fís,i} \quad (4.2)$$

$$\therefore Ex_{GG} = Ex_{quím,GG} + Ex_{fís,GG} \quad (5)$$

$$Ex_{GG} = \sum n_i \cdot E_i^0 + \sum n_i \cdot \int_{T_0}^{T_k} C_{p,i} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT \quad (6)$$

$$Ex_{bms} = (PCI_{bms, base\ seca} + 2442 \cdot h) \lambda_{base\ seca} + 9417 \cdot S \quad (7)$$

$$\lambda_{base\ seca} = \frac{1,0438 + 0,1882 \left(\frac{H}{C} \right) - 0,2509 \left(1 + 0,7256 \left(\frac{H}{C} \right) \right) + 0,0383 \left(\frac{N}{C} \right)}{1 - 0,3035 \left(\frac{O}{C} \right)} \quad (8)$$

En este trabajo, el proceso de gasificación simulado considera aire como agente gasificante, debido al hecho de que la mayoría de las plantas RAE usa aire como agente oxidante (Yang et al., 2007; Yu et al., 2010). De esta forma, el modelo considera que los reactivos ingresan a condiciones ambiente, lo que significa que la exergía física del aire es cero ($Ex_{f, air} = 0$). Por lo tanto, la exergía del agente oxidante es calculada por medio de las ecuaciones (9.1 y 9.2).

$$Ex_{aire} = n_{aire} \sum E_i^0 \quad (9.1)$$

$$\therefore Ex_{aire} = n_{aire} (E_{O_2}^0 + 3,76 \cdot E_{N_2}^0) \quad (9.2)$$

Este modelo matemático que simula la conversión de sólidos carbonoso a gas ha sido validado con datos de plantas industriales de gasificación usando diferentes tipos de combustible sólido, cubriendo análisis últimos con relaciones molares: $0,22 < O/C < 0,69$ y $0,83 < H/C < 1,37$, donde la precisión del modelo está representada por un error relativo en torno al 8,5% (Pérez et al., 2016; Ramos y Pérez, 2017). Por tal razón, en este trabajo se acepta la validez del modelo matemático, y se usa como herramienta computacional para determinar las estrategias termodinámicas de gasificación de RSU en plantas de valoración energética basadas en incineración.

Plan de simulación

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto del contenido de humedad de los RSU y la relación equivalente combustible/aire en el proceso de gasificación. El rango para el contenido de humedad fue definido entre 0% y 50% (Ahmed y Gupta, 2009; Balcazar et al., 2013; Haydary et al., 2013; Rodrigues et al., 2010), mientras que el valor de la relación equivalente combustible/aire se varió entre 1,0 y 4,0 (combustión estequiométrica hasta sub-estequiométrica). En función de estos dos parámetros se determinarán las estrategias termodinámicas del proceso de gasificación, es decir, se definen los intervalos de la relación equivalente combustible/aire para cada contenido de humedad de los RSU, de modo que se alcancen valores de temperatura de reacción que garanticen condiciones auto-térmicas para el proceso termoquímico, y a la vez eviten temperaturas que superen la temperatura de fusión de las cenizas. En este trabajo, se considera 900 K como valor mínimo de temperatura para condiciones auto-térmicas (Ramos y Pérez, 2017), mientras que la temperatura máxima para evitar la fusión de cenizas es 1.300 K (Arena, 2012). En el hogar de una planta de incineración de RSU operando bajo regímenes de gasificación, es posible alcanzar eficiencias de conversión de carbón mayores al 99%, ajustando la velocidad de la parrilla móvil, de modo que aumente el tiempo de residencia del sólido en el hogar, por tanto, en este trabajo se asume una eficiencia de conversión de carbón del 100% (Yang et al., 2007).

Potencial Eléctrico Primario

Para la ciudad de Medellín-Colombia, la tasa de producción de RSU estimada para el año 2017 fue de 1.838 ton/día, lo que equivale a un flujo másico de 21,27 kg/s (Secretaría de Gestión y Control Territorial y Secretaría de medio Ambiente, 2015). La fracción de los RSU que se considera aprovechable energéticamente corresponde al 86,74% del total de RSU generados (ver sección *Caracterización de los RSU*). Además, se estimó que el contenido de humedad de la fracción aprovechable es de 48,5% y el poder calorífico inferior de los RSU en base seca es 19,46 MJ/kg. La eficiencia global de las plantas de generación eléctrica basadas en incineración y turbinas de vapor es de 15% a 24% aproximadamente (Arena, 2012). Con esta información, se estima que a partir de los RSU generados en la ciudad de Medellín, se tiene un potencial energético-eléctrico que varía entre 27,7 MWe y 44,4 MWe, esta potencia podría suministrar la electricidad a 53.353 y 85.519 hogares, respectivamente, con un consumo promedio de energía per cápita de 1,137 MWh/año (Unidad de Planeación Minero-energética, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los siguientes resultados: i) Efecto del contenido de humedad y dosado relativo de gasificación en la eficiencia energética del proceso de gasificación en frío (CGE, relación entre la energía

del GG y la energía contenida en los RSU, ver Fig. 2a); la eficiencia exergética (ExE, relación entre la exergía que sale del gasificador asociada al GG y la exergía que ingresa con los RSU, humedad y aire, ver Fig. 2b); poder calorífico del GG (PCI_{GG} , es densidad energética del gas de gasificación, ver Fig. 2c); y la temperatura del proceso de incineración de RSU bajo condiciones sub-estequiométricas ($T_{proceso}$, temperatura de la reacción, ver Fig. 2d); y ii) Los límites admisibles para el contenido de humedad y la dosado relativo de gasificación para mantener un proceso de aprovechamiento energético técnicamente viable (estrategias termodinámicas), asegurando condiciones autotérmicas ($T > 900$ K), y evitando temperaturas de fusión de ceniza ($T < 1.300$ K).

Proceso de incineración de RSU bajo condiciones sub-estequiométricas

En general, un incremento en el contenido de humedad de los RSU tiene un efecto negativo sobre el proceso, ver Fig. 2. Al aumentar el contenido de humedad (CH) de los RSU entre 0% y 50% se obtuvieron menores valores para el poder calorífico del GG (Fig. 2c), y por tanto, para la eficiencia del proceso de gasificación en frío (Fig. 2a), la cual relaciona la energía del gas de gasificación con la energía que ingresa al gasificador contenida en los RSU. Esto se debe a que un mayor contenido de humedad inhibe las reacciones de formación de CO , H_2 y CH_4 (Mendoza et al., 2012). En el caso de la temperatura del proceso, se observa que esta disminuye con el CH (Fig. 2d), esto se debe a que una mayor cantidad de energía es requerida para evaporar el agua contenida en los RSU. La eficiencia exergética también disminuye con el incremento de la humedad de los RSU debido a la menor concentración de CO , H_2 y CH_4 en el gas de gasificación, compuestos con mayor exergía química que las especies gaseosas N_2 , H_2O y CO_2 . Estos resultados del análisis del contenido de húmeda de los RSU coinciden con los presentados por Jarungthammachote y Dutta (2007).

Fig. 2: Resultados del estudio del efecto del contenido de humedad (CH) y dosado relativo de gasificación (F_{rg}) en el proceso de gasificación de RSU. a) Eficiencia de gasificación en frío (CGE, %), b) Eficiencia exergética (ExE, %), c) Poder calorífico del gas de gasificación (PCI_{GG} , MJ/m^3N), d) Temperatura de proceso ($T_{proceso}$, K).

Al aumentar el dosado relativo de gasificación (F_{rg}) entre 1 y 4, se presentó un incremento en el poder calorífico del gas de gasificación y en la eficiencia del proceso de gasificación frío (Fig. 2 a y c), ya que un mayor dosado relativo indica que la cantidad de aire en el proceso es menor, por lo que disminuye la dilución de los gases combustibles (H_2 , CO , y CH_4) con el N_2 del aire, y además, la menor cantidad de oxígeno disponible favorece la formación de CO en lugar del CO_2 . Con el mayor dosado relativo, el proceso se aleja de las condiciones de

combustión, lo que promueve la formación de gases combustibles (CO , H_2 y CH_4), y deriva una menor temperatura de proceso debido a que se libera una menor cantidad de energía en la oxidación, por la menor cantidad de agente gasificante en el proceso (Fig. 2d). La mayor concentración de gases combustibles favorece el aumento de la eficiencia exergética (Fig. 2b), este comportamiento está relacionado con la mayor exergía química de los gases combustibles (Mendoza et al., 2012). De igual modo, se destaca que el aumento en la exergía química es mayor que la disminución de la exergía física del gas debido a la menor temperatura del proceso, por lo que la exergía total del gas producido aumenta con el incremento del dosado relativo entre 1,0 y 4,0. Esto permite concluir que el proceso de gasificación de los RSU es más eficiente que la combustión (Fig. 2b). En la Tabla 3, se presenta la concentración volumétrica creciente de los gases combustibles (CO y H_2) en función del menor CH de los RSU y del mayor F_{rg} , cuya tendencia marca los resultados descritos en la Fig. 2, los cuales caracterizan termodinámicamente la oxidación sub-estequiométrica de los RSU.

Tabla 3: Concentración volumétrica de las especies combustibles del gas de gasificación (CO y H_2) en función del contenido de humedad (CH) de los RSU y de la relación equivalente combustible/aire-primario (F_{rg}).

CO (%vol.)											
$F_{rg} \backslash \text{CH (g/g)}$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,5
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,50	11,96	11,49	10,99	10,44	9,86	9,23	8,54	7,79	6,97	6,06	5,06
2,00	18,07	17,14	16,14	15,07	13,90	12,65	11,27	9,78	8,15	6,41	4,61
2,50	21,30	19,81	18,21	16,51	14,70	12,78	10,77	8,69	6,60	4,58	2,77
3,00	22,67	20,60	18,44	16,21	13,91	11,58	9,23	6,94	4,78	2,89	1,41
3,50	23,27	20,71	18,10	15,46	12,81	10,19	7,66	5,32	3,27	1,67	0,63
4,00	23,66	20,65	17,63	14,62	11,67	8,84	6,23	3,93	2,11	0,87	0,23
H ₂ (%vol.)											
$F_{rg} \backslash \text{CH (g/g)}$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	4,22	4,46	4,71	4,98	5,27	5,57	5,91	6,26	6,65	7,06	7,48
2,00	10,45	10,87	11,31	11,77	12,24	12,72	13,18	13,58	13,84	13,83	13,35
2,5	15,95	16,38	16,76	17,08	17,31	17,39	17,28	16,91	16,18	14,95	13,06
3,00	17,86	18,15	18,36	18,45	18,39	18,14	17,61	16,73	15,37	13,38	10,62
3,5	17,15	17,55	17,82	17,94	17,84	17,46	16,72	15,49	13,64	11,06	7,77
4,00	15,64	16,24	16,67	16,89	16,82	16,38	15,44	13,90	11,61	8,59	5,12

Estrategias termodinámicas del proceso de gasificación de RSU

En esta sección se establecen las estrategias termodinámicas determinando los contenidos de humedad y la relación combustible-aire admisibles de los RSU que mantengan el proceso de aprovechamiento energético técnicamente viable. Se analiza el proceso de gasificación de RSU bajo régimen auto-térmico, temperaturas que no superen la fusión de las cenizas de los RSU, identificando el poder calorífico del GG, y los rendimientos de energía y exergía que se alcanzan en estas zonas para los RSU (ver Fig. 2a, b, y c), con el fin de incrementar la eficiencia global del proceso. Se debe garantizar que la temperatura del proceso se mantenga en niveles donde no se presente fusión de cenizas (menor a 1.300 K) y el proceso sea auto-térmico (mayor a 900 K). En la Fig. 3 se identifican tres zonas de temperatura de proceso (proceso no auto-térmico, proceso auto-térmico sin fusión de cenizas, y proceso con fusión de cenizas) en función de los valores del contenido de humedad (CH) y del dosado relativo de gasificación analizados (F_{rg}).

La Fig. 3 muestra que al variar el CH entre 0% y 50% es posible obtener temperaturas entre 900 K y 1.300 K, siempre y cuando se ajuste el dosado relativo de gasificación al valor adecuado entre 1 y 4 (franja amarilla). Es decir, los valores de dosado entre 1,0 y 1,4 son inviables, ya que la temperatura es mayor a 1.300 K para todos los valores de humedad entre 0% y 50% (franja roja). Para dosados relativos entre 3,4 y 4,0 la temperatura es menor a 900 K para todos los valores de humedad entre 0% y 50% (franja azul). Por lo tanto, en función del contenido de humedad se definen los valores del dosado relativo admisibles para el proceso, así: para $\text{CH}=0\%$, el dosado varía $2,2 < F_{rg} < 3,4$, y para $\text{CH}=50\%$ el dosado puede tomar valores de $1,5 < F_{rg} < 2,2$. El dosado relativo disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad de los RSU (franja amarilla), de modo que las reacciones exotérmicas liberen mayor cantidad de energía, por mayor oxidante presente en la reacción global, y de este modo se evapore el agua de los RSU y se mantenga el proceso auto-térmico. En

estas condiciones, según las Fig. 2a, b, y c, el máximo valor para la eficiencia del proceso de gasificación en frío es de 87,06% para 0% de contenido de humedad, y de 73,78% para el contenido de humedad del 50%. De forma similar el poder calorífico del gas de gasificación y la eficiencia exergética presentan rangos de 2,01 MJ/m³N – 5,6 MJ/m³N y de 68,42% - 91,28%, respectivamente.

Fig. 3: Zonas de temperatura de proceso (T_{proceso} , K) en función del contenido de humedad (CH) y dosado relativo de gasificación (F_{rg}): zona no auto-térmica ($T_{\text{proceso}} < 900$ K), zona auto-térmica sin fusión de cenizas ($900 \text{ K} < T_{\text{proceso}} < 1300$ K), y zona de fusión de cenizas ($T_{\text{proceso}} > 1300$ K).

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que el contenido de humedad genera un efecto adverso sobre el proceso de conversión RSU a gas, ya que el poder calorífico del gas, las eficiencias energética y exergética, y la temperatura del proceso disminuyen con el contenido de agua en los RSU. Esto se debe a que se requiere una mayor cantidad de energía para evaporar dicha humedad. En el caso del dosado relativo de gasificación, se puede concluir que al aumentar este parámetro, aumentan el poder calorífico del gas de gasificación y las eficiencias, mientras que la temperatura disminuye, ya que se tiene menor disponibilidad de oxígeno para el proceso, por lo que se libera menor cantidad de energía, y se oxida parcialmente el combustible, favoreciendo la formación de CO, H₂ y CH₄.

Las estrategias termodinámicas para aprovechar energéticamente los RSU en plantas de incineración bajo condiciones sub-estequiométricas, de modo que el proceso sea auto-térmico y se evite la fusión de cenizas, establecen que el proceso se debe llevar a cabo con el dosado relativo de gasificación así: $2,2 < F_{rg} < 3,4$ para CH=0%, y $1,5 < F_{rg} < 2,2$ para CH=50%. Con un dosado relativo de gasificación menor a 1,5, la temperatura del proceso es mayor a la temperatura de fusión de las cenizas para todos los valores de humedad, mientras que las condiciones auto-térmicas están fuertemente afectadas por la humedad de los RSU.

En la zona auto-térmica sin fusión de cenizas ($900 \text{ K} < T_{\text{proceso}} < 1300 \text{ K}$), el intervalo de variación de los parámetros que caracterizan el proceso de gasificación se describe como sigue: el poder calorífico varía entre 2.0 MJ/m³N y 6.35 MJ/m³N, la eficiencia del proceso de gasificación en frío está entre 43% y 87.6%, y la eficiencia exergética alcanza rendimientos entre 68.42 y 91.6%. Los valores máximos de los intervalos se alcanzan con menores contenidos de humedad de los RSU y mayor relación equivalente combustible/aire-primario (F_{rg}).

NOMENCLATURA

- a = moles de CO por moles de RSU
- b = moles de CO₂ por moles de RSU
- C = fracción másica de carbono.
- c = moles de H₂ por moles de RSU
- CH = contenido de humedad de los RSU (g/g)
- CGE = eficiencia energética del proceso de gasificación en frío (%)
- C_p = calor específico (a presión constante) (kJ/kg)

d = moles de CH_4 por moles de RSU
 E = energía (kJ)
 E^0 = Exergía estándar (kJ/kmol)
 Ex = exergía
 ExE = Eficiencia exergética (%)
 e = moles de H_2O por moles de RSU
 f = moles de N_2 por moles de RSU
 F_{rg} = dosado relativo de gasificación de RSU
 F_{st} = dosado estequiométrico de RSU
 g = moles de O_2 por moles de RSU
 $G_{T,i}^0$ = Energía libre de Gibbs (kJ/kmol)
 H = fracción másica de hidrógeno
 h_f^0 = entalpía de formación
 K = constante de equilibrio
 l = moles de SO_2 por moles de RSU
 PCI = poder calorífico inferior (kJ/kg)
 M = peso molecular (kg/kmol)
 N = fracción másica de nitrógeno
 n_i = moles de componente i en el gas producido
 n_T = moles totales del gas producido
 O = fracción másica de oxígeno
 S = fracción másica de azufre
 T = temperatura (K)
 w = fracción molar de H_2O en los RSU
 x = cantidad molar real de aire
 λ = Relación entre exergía química y poder calorífico de los RSU (-)

Abreviaciones

RSU = residuos sólidos urbanos
 CH = contenido de humedad de los RSU

Subíndices

m = átomos de hidrógeno en la fórmula de sustitución
 p = átomos de oxígeno en la fórmula de sustitución
 q = átomos de nitrógeno en la fórmula de sustitución
 r = átomos de azufre en la fórmula de sustitución
 GG = gas de gasificación
 quim = química
 fis = física
 bms = biomasa

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia por el apoyo financiero al proyecto "Sostenibilidad 2018-2019" del Grupo de manejo eficiente de la energía (GIMEL).

REFERENCIAS

- Ahmed, I. y A.K. Gupta, Evolution of syngas from cardboard gasification, doi: 10.1016/j.energy.2008.11.018, Applied Energy, 86(9), 1732–1740 (2009)
- Arena, U., Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.025, Waste Management, 32(4), 625–639, (2012)
- Balcazar, J.G., R.A. Dias y J.A. Balestieri, Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.003, Energy, 55, 728–741 (2013)
- Bhavanam, A. y R.C. Sastry, Modelling of solid waste gasification process for synthesis gas production, ISSN: 0975-1084, J. of Scientific and Industrial Research, 72, 611-616 (2013)
- Castaldi, M., J. van Deventer y otros 8 autores, Progress and Prospects in the Field of Biomass and Waste to Energy and Added-Value Materials, doi: 10.1007/s12649-017-0049-0, Waste and Biomass Valorization, 8(6), 1875–1884 (2017)
- Castell, X.E., Biomasa y Bioenergía, Fundación Universitaria Iberoamericana, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España (2012)
- García, C.A., M.L. Vaca y G.F. Talero, Aprovechamiento de biomasa peletizada en el sector ladrillero en Bogotá-Colombia: análisis energético y ambiental, doi: 10.4067/S0718-07642013000300013, Inf. Tecnológica, 24(3), 115-120 (2013)
- Haydary, J., D. Susa y J. Dudáš, Pyrolysis of aseptic packages (tetrapak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition, doi: 10.1016/j.wasman.2013.01.031, Waste Management, 33(5), 1136–1141 (2013)
- Hoornweg, D. y P. Bhada-Tata, What a waste: a global review of solid waste management, Urban development series knowledge, Washintong DC (2012)

- Ibarluzea, J. y M. Basterretxea, Incineración de residuos urbanos y salud pública, 1ª Ed., Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Ciudad de Donostia-San Sebastian (2004)
- Jarungthammachote, S. y A. Dutta, Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier, doi: 10.1016/j.energy.2007.01.010, Energy, 32(9), 1660–1669 (2007)
- Kotas, T.J., The Exergy method of thermal plant analysis, Reimpresión, Exergon Publishing Company UK Ltd, U.K. (2012)
- Kumar, A. y S.R. Samadder, A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste, doi: 10.1016/j.wasman.2017.08.046, Waste Management, 69, 407–422 (2017a)
- Kumar, A. y S.R. Samadder, An empirical model for prediction of household solid waste generation rate-A case study of Dhanbad, India, doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.034, Waste Management, 68(9), 3–15 (2017b)
- Larochelle, L., M. Turner y M. LaGiglia, Evaluation of NAMA opportunities in Colombia's solid waste sector, Center for clean air policy, Colombia (2012)
- Luz, F.C., M.H. Rocha y otros 5 autores, Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil, doi: 10.1016/j.enconman.2015.06.074, Energy Conversion and Management, 103, 321–337 (2015)
- Mendiburu, A.Z., J.J. Roberts, J.A. Carvalho y J.L. Silveira, Thermodynamic analysis and comparison of downdraft gasifiers integrated with gas turbine, spark and compression ignition engines for distributed power generation, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.027, Applied Thermal Engineering, 66(1–2), 290–297, 027 (2014)
- Mendoza, J.M., A.J. Bula, R.D. Gómez y L.A. Corredor, Análisis exergético de la gasificación de biomasa, doi:10.4067/S0718-07642012000500009, Inf. Tecnológica, 23(5), 85–96 (2012)
- Moreno, J., R. Moral, J.I. García-Morales, J.A. Pascual y M.P. Bernal, De Residuo a Recurso, El Camino hacia la Sostenibilidad, 1ª Ed., Volumen 2: Procesos de Biotransformación de la Materia Orgánica, Parte 4: Ingeniería y Aspectos Técnicos De La Digestión Anaeróbica, 143–397, Mundi-Prensa, Madrid, España (2016)
- Nordi, G.H., R. Palacios-Bereche, A.G. Gallego y S.A. Nebra, Electricity production from municipal solid waste in Brazil, doi: 10.1177/0734242X17705721, Waste Management & Research, 35(7), 709–720 (2017)
- Ouda, O.K., S.A. Raza y otros 4 autores, Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.005, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 328–340 (2016)
- Pérez, J.F., A. Melgar y A. Horrillo, Thermodynamic methodology to support the selection of feedstocks for decentralised downdraft gasification power plants, doi: 10.1080/14786451.2016.1162792, International Journal of Sustainable Energy, 36(10), 1010–1028 (2017)
- Poletto, J.A. y C.L. Da Silva, Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con generación de energía, doi: 10.1612/inf.tecnol.4062it.08, Inf. Tecnológica, 20(2), 105–112 (2009)
- Ramos, S. y J.F. Pérez, Effect of torrefied wood biomass under an oxidizing environment in a downdraft gasification process, doi: 10.15376/biores.12.3.6040-6061, BioResources, 12(3), 6040–6061 (2017)
- Rodrigues, R., N.R. Marcilio y otros 3 autores, Co-gasification of footwear leather waste and high ash coal: a thermodynamic analysis. The 27th Annual International Pittsburgh Coal Conference, 1–7, Pittsburgh, USA (2010)
- Shi, H., N. Mahinpey, A. Aqsha y R. Silberman, Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste, doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.036, Waste Management, 48, 34–47 (2016)
- Seoáñez M., Tratado de la Biomasa, 1ª Ed., 257–271, McGraw-Hill/Interamericana de España, S.L., Madrid, España (2013)
- Thakare, S. y S. Nandi, Study on Potential of Gasification Technology for Municipal Solid Waste (MSW) in Pune City, doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.218, Energy Procedia, 90, 509–517 (2015)
- Unidad de Planeación Minero-energética (UPME), Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia, Ministerio de Minas y Energía, Colombia (2017)
- Universidad de Antioquia, Formulación del plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá, Area Metropolitana del Valle de Aburra, Colombia (2006)
- Universidad de Medellín, Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS, Municipio de Medellín 2016 – 2027, Secretaría de control y gestión territorial, Colombia (2015)
- Vaezi, M., M. Passandideh-Fardb, M. Moghimanb y M. Charmchic, On a methodology for selecting biomass materials for gasification purposes, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.01.026, Fuel Processing Technology, 98, 74–81 (2012)
- Yang, Y.B., V.N. Sharifi y J. Swithenbank, Converting moving-grate incineration from combustion to gasification - Numerical simulation of the burning characteristics, doi: 10.1016/j.wasman.2006.03.014, Waste Management, 27(5), 645–655 (2007)
- Yu, Z., X. Ma y Y. Liao, Mathematical modeling of combustion in a grate-fired boiler burning straw and effect of operating conditions under air- and oxygen-enriched atmospheres, doi:10.1016/j.renene.2009.10.006, Renewable Energy, 35(5), 895–903 (2010)