

Valorización energética de Residuos sólidos urbanos a través de gasificación en reactor de corriente ascendente.

**Einara Blanco Machin¹, Daniel Travieso Pedroso², Javiera Inzunza Dominguez³, Daniel Cuevas Arcos⁴
Sebastián Yáñez Sepúlveda⁵ Adrian Blanco Machin⁶**

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: eblanco@udec.cl

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío Bío, Chile. Email: dtravieso@ubiobio.cl

³Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: jinzunza2017@udec.cl

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: dancuevas@udec.cl

⁵Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: syanez2017@udec.cl

⁶Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista. Brasil Email: adrian.b.machin@unesp.br

Resumen

El aumento de la producción mundial de residuos debido al crecimiento de la población ha llevado a una tasa de eliminación en vertederos del 99% para los residuos sólidos urbanos (RSU) en Chile, superando la media de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) [1] del 44%. Para hacer frente a este problema, se ha desarrollado un enfoque alternativo de valorización energética de residuos que incluye la gasificación de RSU por corriente ascendente. El objetivo del estudio es producir gas combustible ($\geq 2,5$ MJ/Nm³) mediante la gasificación de RSU utilizando aire como agente oxidante. La metodología emplea composiciones conocidas de RSU, representativas de la actual composición de residuos de Chile. Los experimentos exploran varias composiciones de RSU para la recuperación de energía, analizando su impacto en la temperatura, la composición del gas y el valor calorífico inferior (PCI). Los resultados revelan un gas estable derivado de los RSU con un PCI medio que oscila entre 2,2 y 3,37 MJ/Nm³. Comparado con el PCI de los pellets de biomasa, el PCI basado en RSU presenta una reducción del 65% en su contenido energético. El estudio indica que las diferentes composiciones de RSU tienen efectos limitados sobre el poder calorífico del gas producido y la temperatura de proceso.

Palabras clave: RSU, gasificación, valorización energética

Abstract

The increase in global waste production due to population growth has led to a landfill disposal rate of 99% for municipal solid waste (MSW) in Chile, exceeding the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) [1] average of 44%. To address this problem, an alternative waste-to-energy approach has been developed that includes upstream MSW gasification. The objective of the study is to produce fuel gas (≥ 2.5 MJ/Nm³) by gasification of MSW using air as the oxidizing agent. The methodology employs known MSW compositions, representative of the current waste composition in Chile. The experiments explore various MSW compositions for energy recovery, analyzing their impact on temperature, gas composition and lower heating value (LHV). The results reveal a stable MSW-derived gas with an average LHV ranging from 2.2 to 3.37 MJ/Nm³. Compared to the LHV of biomass pellets, MSW-based LHV shows a 65% reduction in energy content. The study indicates that different MSW compositions have limited effects on the calorific value of the gas produced and the process temperature.

Keywords: MSW, gasification, energy recovery

1. Introducción

El aumento de la generación de residuos sólidos urbanos y su incorrecta disposición final, constituyen un problema creciente y sin una solución a corto plazo. En este contexto la búsqueda de alternativas para valorizar energéticamente los residuos sólidos urbanos y disminuir los problemas asociados a su incorrecta disposición final constituye una prioridad a nivel mundial.

En 2024, Chile continúa enfrentando desafíos en su sistema eléctrico nacional debido a la alta dependencia de combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural. Como resultado, es fundamental buscar alternativas para reducir esta dependencia. Los residuos sólidos urbanos (RSU) representan una fuente de energía potencial en Chile, sin embargo, la falta de educación en reciclaje y la experiencia insuficiente en la gestión de RSU han llevado a muchos municipios a exceder los límites legales en su disposición. Para abordar estos desafíos, Chile ha adoptado compromisos internacionales, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que promueven el aprovechamiento de los RSU para la generación de energía [2,3,4]

La gasificación es una técnica que se ha estudiado para el manejo integral de RSU, y se ha analizado el efecto de parámetros de operación y propiedades de las materias primas. [5]

2. Metodología

Fue desarrollado un estudio experimental considerando las dificultades asociadas a la heterogeneidad de los RSU y los problemas ambientales causados por las emisiones contaminantes del proceso. Fue usado un reactor de corriente ascendente que adopta como base para su diseño y construcción, el operado por (Pedroso et al. 2013) [8], con una modificación de la entrada de agente oxidante y combustible. Se añadió una segunda entrada de agente oxidante en la zona de oxidación que conlleva un aumento del rendimiento del equipo, y se utilizó un tornillo sinfín sin núcleo para la alimentación para evitar problemas de atascos en la misma [6-8]. El estudio evalúa la viabilidad de la gasificación de RSU para su valorización energética y los efectos de su composición sobre la temperatura del proceso, la composición del gas de producción y el LHV del gas de producción.

El diseño experimental considerado fue de un solo factor y cuatro niveles. Los niveles evaluados para la variable independiente del diseño experimental fueron las composiciones de RSU, variando los contenidos porcentuales de materia orgánica, cartón, plástico, textiles, residuos de madera y caucho

2.1. Descripción de la bancada

El estudio evalúa la viabilidad de la gasificación de RSU para su valorización energética y los efectos de su composición sobre la temperatura del proceso, la composición del gas productor y el PCI del gas. El diseño experimental considerado fue de un solo factor y cuatro niveles. Los niveles evaluados para la variable independiente del diseño experimental fueron las composiciones de RSU, variando los contenidos porcentuales de materia orgánica, cartón, plástico, textiles, residuos de madera y caucho. El estudio evalúa cuatro composiciones de RSU variación de la composición típica chilena de RSU, y una composición de RSU sin materia orgánica. Se agregaron tres réplicas para la cuarta composición, totalizando siete corridas experimentales.

Las pruebas se realizaron con residuos como cartón, plásticos, materia orgánica y pellets. Inicialmente, las pruebas se realizaron con tubos de ensayo de cartón y plástico, que tienen una composición de 77% de cartón y 23% de plástico (LDPE). Posteriormente, se realizaron experimentos con materia orgánica, consistente en cáscara de tomate, patata, huevo, sandía, judías, nueces, limones, hojas de maíz y hueso de melocotón. Tanto las probetas de materia orgánica como las de cartón-plástico tienen un diámetro de 60 mm y una longitud de 100 mm. El pellet asegura el arranque y la parada del reactor; por lo tanto, este combustible se coloca encima de la parrilla y en la parte superior del reactor. Este método se aplica a todas las pruebas, independientemente de los residuos que se vayan a analizar [9].

La Figura 1 muestra un esquema del reactor ensayado. El sistema posee una entrada del gasificante secundario a través de 4 tubos ($\dot{M}_{a,2}$). Es importante señalar que tanto la entrada primaria como la secundaria son alimentadas simultáneamente por aire, el cual es impulsado por un soplador (\dot{M}_a). Válvulas manuales de aguja en cada circuito de alimentación de aire regulan el caudal de agente gasificante.

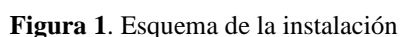


Tabla 1. Características de los instrumentos utilizados.

Instrument	Range	Accuracies
Thermocouple	Max. 1050°C	1°C
Flowmeters	0 – 100 lpm	0.1 lpm
Scale	0 – 100 kg	1 g
CO	0 – 100%	0,01 %
CO_2	0 – 100%	0,01 %
CH_4	0 – 100%	0,01 %
H_2	0 – 100%	0,01 %
C_nH_m	0 – 10%	0,01 %
O_2	0 – 25%	0,01 %

Para el análisis de los datos, el PCI del gas generado se calcula según la ecuación (1) con los cuatro componentes más energéticos: monóxido de carbono, hidrógeno molecular, metano y alquitranes.

Se evaluó la gasificación de cuatro muestras de RSU con diferentes composiciones, cuya principal diferencia radica en el contenido de materia orgánica en el combustible gasificado. Sin fracción de materia orgánica para la primera y segunda composición evaluadas, 14 % para la tercera y 21 % para la cuarta. El estudio también evalúa la variación de la fracción de residuos de madera y caucho de los RSU gasificados. La cuarta composición evaluada del cuarto al séptimo experimento mostró un mejor rendimiento de gasificación. Figura 2

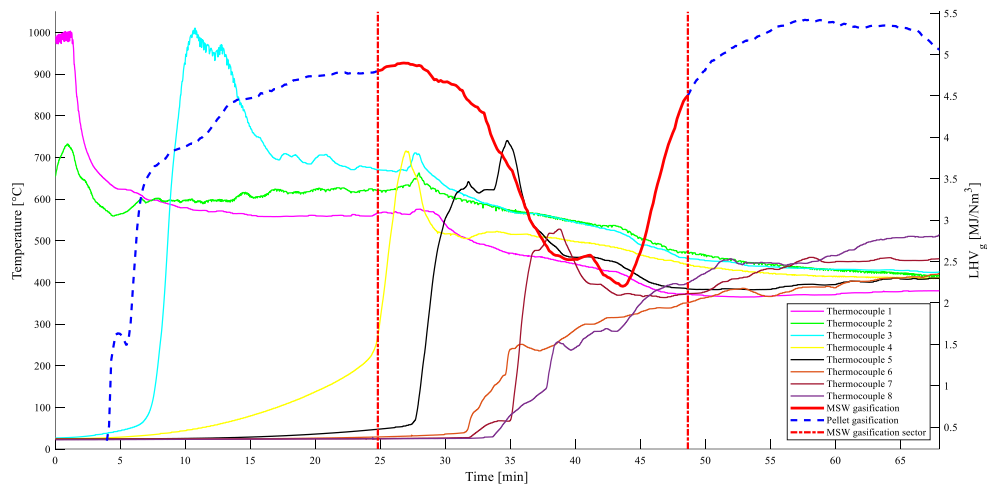


Figura 2. Perfiles de temperatura para el cuarto experimento

La Figura 3 presenta los resultados de PCI y temperaturas en la zona de reducción para las 7 experiencias

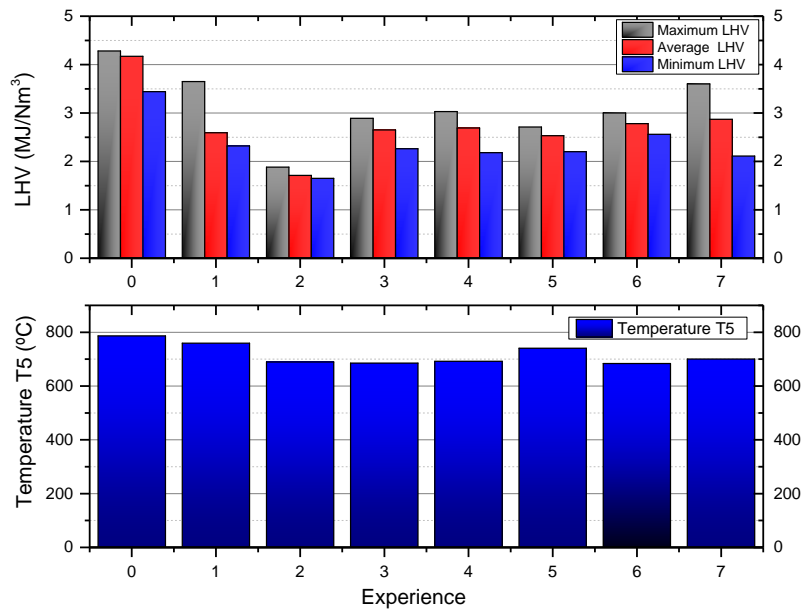


Figura 3. PCI y temperatura máxima del para todos los experimentos.

Los resultados para la segunda composición difieren de los obtenidos para las otras composiciones; debido a ello, esta composición no se consideró viable para su gasificación en el montaje experimental bajo las condiciones de operación evaluadas, ni se incluyó en el análisis estadístico. Con la excepción del PCI del gas obtenido para la segunda composición, el valor medio observado para el gas de producción obtenido de la gasificación de las otras tres composiciones evaluadas presentó una baja variación entre ellas y fue similar al valor obtenido por (Raj et al. 2023) [10], y (Jiang et al. 2023) [11] para la gasificación de residuos en lecho fijo con corriente descendente. Para las composiciones 1, 3 y 4, la media aritmética de los valores medios de este parámetro alcanzó el 65% del PCI obtenido para el gas productor de la gasificación de pellets de madera (Experimento 0), con una DE de $\pm 0,12$ MJ/Nm³.

3. Conclusiones

El estudio evalúa la viabilidad de la gasificación de RSU para su valorización energética y los efectos de su composición sobre la temperatura del proceso, la composición del gas de producción y el PCI del gas de producción. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de la gasificación de RSU, con la composición evaluada, en el montaje experimental presentado. La modificación de la composición de los RSU no afecta significativamente al PCI del gas de producción ni a la temperatura del proceso. La temperatura media del proceso de gasificación de RSU es 213 °C inferior a la observada para la gasificación de pellets de madera, coincidiendo con la temperatura reportada para este proceso en diferentes tecnologías de reactores.

La baja densidad aparente de los RSU influye directamente en el tiempo de residencia del combustible dentro del reactor, lo que significa que el frente térmico avanza rápidamente a través del reactor, el gas es difícil de manejar y la estabilización del PCI es breve. Además, hay que añadir que los RSU son un combustible heterogéneo, lo que puede hacer que fluya más aire a través del material en algunos sectores donde la caída de presión es menor. Esto implica que las fases de gasificación no son evidentes ya que en un sector podría estar ocurriendo la combustión del elemento y la pirólisis en otro sector.

4. Agradecimientos

Agradecemos a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile que financió este estudio a través de los proyectos FONDECYT 11180828 y Proyecto FAPESP-CONICYT 2018/08419-4.

5. Referencias

- [1]. Comisión Nacional de Energía, Precio Medio de Mercado Sistema Eléctrico Nacional (PMM SEN), 2022.
- [2]. Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía, Balance nacional de energía, (n.d.). <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/> (accessed December 21, 2022).
- [3]. SINIA, Capítulo 10: Residuos., Sistema Nacional de Información Ambiental, Ministerio Del Medio Ambiente. (2021).
- [4]. CONAMA. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana. 2024. INFORME FINAL. ESTUDIO CARACTERIZACION DE RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARIOS EN LA REGION METROPOLITANA.
- [5] Lee, Duu-Jong. 2022. "Gasification of Municipal Solid Waste (MSW) as a Cleaner Final Disposal Route: A Mini-Review." *Bioresource Technology* 344: 126217. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852421015595>.
- [6] Basu, Prabir. 2010. "Gasification Theory and Modeling of Gasifiers." In *Biomass Gasification Design Handbook*, Elsevier, 117–65. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123749888000052>.
- [7] Chen, David Meng-Chuen et al. 2020. "The World's Growing Municipal Solid Waste: Trends and Impacts." *Environmental Research Letters* 15(7): 074021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8659>.
- [8] Pedroso, Daniel Travieso, Einara Blanco Machín, Jose Luz Silveira, and Yasuyuki Nemoto. 2013. "Experimental Study of Bottom Feed Updraft Gasifier." *Renewable Energy* 57: 311–16. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148113000955>.
- [9] Javiera Inzunza Domínguez, Einara Blanco Machín, Daniel Travieso Pedroso, Enrique Wagemman Herrera, Cristian Cuevas Barraza, Advanced thermoconversion technology for municipal solid waste energetic valorization, *Renewable Energy*, Volume 228, 2024, 120604, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120604>.
- [10] Raj, Reetu, Jeewan Vachan Tirkey, Deepak Kumar Singh, and Priyaranjan Jena. 2023. "Co-Gasification of Waste Triple Feed-Material Blends Using Downdraft Gasifier Integrated with Dual Fuel Diesel Engine: An RSM-Based Comparative Parametric Optimization." *Journal of the Energy Institute* 109: 101271. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1743967123001009>.
- [11] Jiang, Wei et al. 2023. "Co-Gasification of Rural Solid Waste and Biomass in Rural Areas: Simulation and Plant-Scale Process." *Environmental Research* 235: 116684. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935123014883>.