

# **Análisis experimental del efecto del flujo de aire en el poder calorífico del gas de síntesis producto de la gasificación de RSU y biomasa en un reactor ascendente modificado**

**Sebastián Yáñez-Sepúlveda<sup>1</sup>, Einar Blanco-Machin<sup>2</sup>, Daniel Travieso-Pedroso<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. [syanez2017@udec.cl](mailto:syanez2017@udec.cl)

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. [eblanco@udec.cl](mailto:eblanco@udec.cl)

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile. [dtravieso@ubiobio.cl](mailto:dtravieso@ubiobio.cl)

## **Resumen**

La generación y mala gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) genera graves impactos medio ambientales, sociales y económicos. La gasificación posee beneficios ambientales con respecto a la disposición en rellenos sanitarios, sin embargo, la falta de estudios experimentales que avalen la efectividad de este método de valorización energética es una limitante a la hora de invertir. En esta investigación se evalúa experimentalmente el poder calorífico inferior (PCI) del gas de síntesis producto de la gasificación de RSU utilizando un reactor ascendente modificado de pequeña escala, con el objetivo de establecer la viabilidad de la gasificación de RSU en Chile. Los resultados experimentales obtienen un PCI promedio de 4,27 (MJ/m<sup>3</sup>) acorde a la literatura, de lo cual se concluye que la gasificación de los RSU de la región es viable, mientras que algunas modificaciones del proceso aún pueden incrementar la eficiencia.

**Palabras clave:** Residuos sólidos urbanos; gas de síntesis; reactor ascendente modificado.

## **Abstract**

The generation and bad management of municipal solid waste (MSW) generates serious environmental, social, and economic impacts. MSW gasification has environmental benefits respecting to the disposal in landfills, however, the lack of experimental studies is a limitation when it's time to invest. In this research we experimentally evaluate the lower heating value (LHV) of the syngas resulting from the gasification of MSW in a modified updraft reactor at small scale to establish the viability of region's MSW valorization through gasification, making energy recovery possible. The experimental results obtain a LHV of 4.25 (MJ/m<sup>3</sup>) according to literature. Then, it is concluded that the proposed valorization method is viable with the composition of the MSW of the region, while some modifications of the process can still increase efficiency.

**Keywords:** Municipal solid waste; syngas; modified updraft reactor.

## **1. Introducción**

El ser humano, en su interacción con el ambiente, siempre se ha visto enfrentado al problema del manejo de sus residuos, siendo la generación de estos una acción que se desarrolla día a día. En nuestro país, Chile, la generación de residuos alcanzó los 19,6 millones de toneladas generadas en 2021, con un 96,7% de estos correspondientes a residuos no peligrosos y de estos, un 46,1% correspondiente a

residuos sólidos municipales [1]. En este contexto, la región del Biobío es la tercera región del país con mayor disposición de residuos sólidos urbanos (RSU), destinando un 85,7% a rellenos sanitarios [1], aquí es donde se comienza a vivir una crisis por la situación que presentan sus 2 principales rellenos sanitarios de la región. Hidronor Zona Sur, cerró a sus operaciones el 30 de abril de 2023, sin embargo, presentó un proyecto para ampliar el volumen de recepción para dar solución a la disposición de RSU en la región,

considerando que recibía los residuos de Talcahuano y Hualpén. Dicho proyecto fue rechazado por la Comisión Regional Evaluadora de Medio Ambiente. Por otro lado, el relleno sanitario Cemarc S.A. posee una vida útil de 2 años más. Otra opción implicaría analizar el depositar la basura en otra región del país o la aparición de algún basural, vertedero o creación de otro relleno sanitario.

La mala gestión de los residuos genera impactos medio ambientales como el daño de los suelos, la contaminación de las aguas y se produce la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), donde los rellenos sanitarios, vertederos y basurales generan emisiones producto de degradación anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos. Para el año 2018, el 7,2% de las emisiones de GEI totales fue producto de los residuos, implicando un aumento del 7,6 % con respecto al año 2016 y a un 354,7% comparado con 1990 [2]. En el ámbito social, puede generar daños en la salud humana tanto psicológicos como en la propagación de enfermedades por la proliferación de vectores desde vertederos y basurales. Por último, se generan impactos económicos, por ejemplo, se puede sufrir una devaluación de las propiedades de hasta un 70% al ser “colindante a un basural” [2].

La tasa nacional de valorización (incluido el reciclaje) de residuos no peligrosos de los últimos años se ha mantenido entre 20% y 22,6% [1]. Sin embargo, durante 2019, de un total aproximado de 7,86 millones de toneladas de RSU, solo 69.507 toneladas fueron parte de un proceso de valorización (0,9% del total) [3]. Ante esto, es evidente la necesidad de aplicar nuevas estrategias para la valorización de RSU. Para implementar un modelo de economía circular en Chile, se han diseñado diversas líneas de trabajo, entre ellas ley 20.920 o Ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor), que establece obligaciones a los generadores de residuos y a las municipalidades para el manejo de los RSU [4]. Esta legislación prioriza el tratamiento de los residuos en 5 etapas, comenzando con la prevención a la hora de generar los residuos. Le sigue el reciclaje, proceso que no está libre de limitaciones, como puede ser con algunos plásticos cuya composición química y, en algunos casos, los aditivos tóxicos que contiene dificultan su reutilización. Otro factor limitante es la educación de la ciudadanía en cuanto al reciclaje, un proceso que requiere de concientización. Posterior al reciclaje corresponde la etapa de valorización energética y finalmente la eliminación de los residuos.

Ante esta problemática, los procesos de tratamiento de RSU del tipo “Waste to Energy (WTE)” poseen beneficios como el cuidado de tierras verdes, por la menor superficie requerida para el tratamiento de los residuos, el reciclaje en la misma planta y además la

reducción de emisiones de GEI de aproximadamente 1 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de basura quemada en lugar depositada en rellenos sanitarios [5]. Se ha demostrado que este tipo de procesos tienen un buen impacto ambiental reduciendo las emisiones de contaminantes gaseosos por debajo de estándares internacionales [6]. En esta metodología, la gasificación posee ventajas por ser un proceso termoquímico con un producto gaseoso intermedio, cuyas principales componentes energéticas son el CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. La gasificación consta de 4 etapas superpuestas: secado, pirólisis, oxidación y la gasificación con múltiples reacciones químicas. Esto, sumado a la influencia del agente oxidante y la composición de los residuos dificulta la estimación del gas resultante final, siendo estrictamente necesario los datos experimentales [7]. Evaluaciones en Brasil de las emisiones tras la combustión del gas de síntesis de RSU demuestran ser inferiores a los valores establecidos por la legislación brasileña [8]. Además, la gasificación de RSU puede requerir de un combustible auxiliar, aquí, el uso de combustibles a base de biomasa ha demostrado mejoras en rendimiento, costo e impacto ambiental [9].

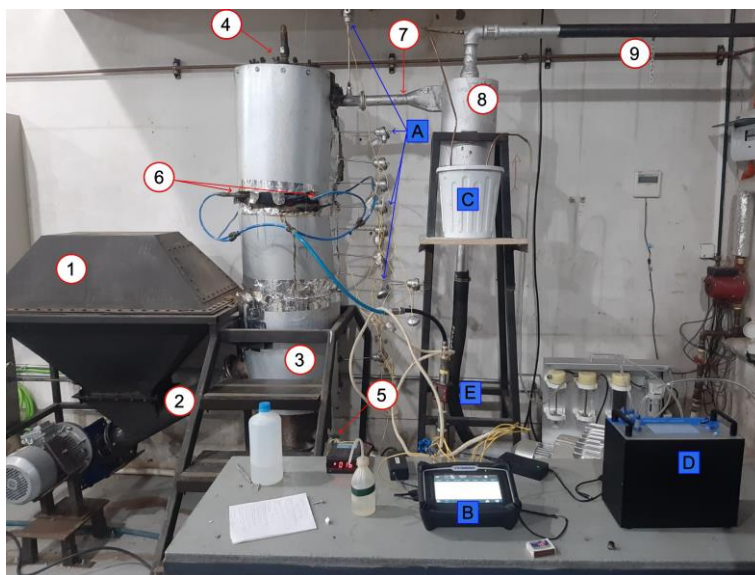
Pese a los beneficios ambientales estimados, la falta de estudios experimentales es una limitante a la hora de estudiar la inversión en un proyecto a gran escala en Chile. Por ello, el objetivo de este proyecto es evaluar experimentalmente el poder calorífico inferior (PCI) del gas de síntesis producto de la gasificación de RSU en función del efecto del flujo de aire, para comprobar la viabilidad de gasificar los RSU de la región, lo que aportaría una ruta hacia una economía circular nacional y facilitaría una estrategia óptima para los gestores de residuos que actúan bajo la ley REP. La hipótesis en la que se sustenta la investigación es que la gasificación en un reactor de corriente ascendente modificado será técnicamente factible si, previamente se aplica a los residuos un secado, trituración, compactación y homogenización de estos, obteniendo un gas diluido por el nitrógeno con un PCI entre los 4-7 MJ/m<sup>3</sup> acorde a lo estudiado en la literatura [7].

## 2. Metodología

### 2.1. Gasificación de RSU

#### 2.1.1. Banco de Ensayos

El sistema está compuesto por un reactor de corriente ascendente modificado [10], diseñado y construido en el laboratorio de máquinas y herramientas e instalado en el laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción [11]. En la Figura 1 se muestra el esquema del gasificador, este posee una tolva (1) de 190 litros para almacenar combustible. El combustible



**Figura 1.** Reactor de gasificación ascendente modificado, laboratorio Termofluidos Universidad de Concepción.

es impulsado mediante un tornillo sin fin (2) hasta la parrilla (3). El reactor es cargado con combustible, se destapa (4) y se realiza un encendido manual con alcohol. El agente gasificante corresponde a aire, se tiene una entrada principal de aire (5) al inferior y una entrada secundaria por sobre la parrilla (6). El gas de síntesis se dirige por el tubo de salida (7) pasando por un ciclón (8) para extraer las partículas más pesadas y alquitrán. El gas generado sale (9) y es quemado con un quemador de gas natural. Para los residuos se tienen dos depósitos, uno es el cenicero, al inferior del reactor y un tambor bajo el ciclón.

### 2.1.2. Sistema de medición

El sistema de medición utilizado se encuentra instalado en el reactor, se puede observar en la Figura 1, donde el reactor cuenta con 7 termocuplas (A), además hay 1 ubicada en la salida de los gases desde el reactor hacia el ciclón y otra bajo la parrilla. Estas se conectan a un sistema de adquisición de datos, el cual registra el perfil de temperaturas durante los ensayos (B). Para medir la composición del gas, una fracción del gas se desvía a la salida del ciclón, es enfriado con agua en un recipiente (C) para luego pasar al analizador portátil de syngas TY-6330P (D), donde se analiza la composición del gas de síntesis. Para medir el flujo de aire que se envía al reactor, en la entrada primaria se instala una válvula de mariposa de ½" y junto a la válvula se instala un flujómetro que entrega el caudal suministrado en litros por minuto (E), en la entrada secundaria se instala una válvula de bola ½". Cada componente del combustible es pesado antes de cada ensayo utilizando una balanza con exactitud de 1 gramo para conocer la composición másica del combustible a gasificar.

### 2.1.3. Tratamiento residuos

Debido a dificultades en el sistema de alimentación, los ensayos fueron realizados utilizando únicamente la carga del reactor lleno con un volumen aproximado de 27 litros. Se hace necesario reducir el volumen de los residuos para maximizar la masa de combustible a gasificar en cada ensayo. Por temas de salubridad e higiene, los residuos eran reunidos de forma manual y tratados de forma separada. Para ello, se consideró la composición de los RSU de la región del Biobío presentada por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo [12] y la Comisión Nacional del medio Ambiente [13], [14]. Se desestima el vidrio por ser el residuo con mayor valorización por medio del reciclaje, de forma similar se considera el PET y PEAD como los plásticos con alto porcentaje de reciclaje en Chile. Para el caso del metal y los desechos de construcción, su composición y comportamiento no lo hacen viable para el proceso. De esta forma, la composición de los residuos a gasificar es presentada en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición de los RSU a gasificar.

Componente	Composición en masa
Materia Orgánica	65,40 %
Cartón	16,04 %
PEBD	4,60 %
Polipropileno	1,024 %
Poliestireno	1,58 %
Textiles	2,4 %
Madera	4,44 %
Goma	4,44 %

Fuente: elaboración propia.

El tratamiento consta de un proceso de cercenado, mezclado y compactación. Debido a su alto contenido de humedad, la materia orgánica requiere de un proceso de secado previo, este se llevó a cabo en un horno de secado de muestras modelo LA-0881 de la Figura 2. Para la compactación se hace uso de una prensa hidráulica, comprimiendo los residuos hasta 4,7 MPa para fabricar probetas de la Figura 3.



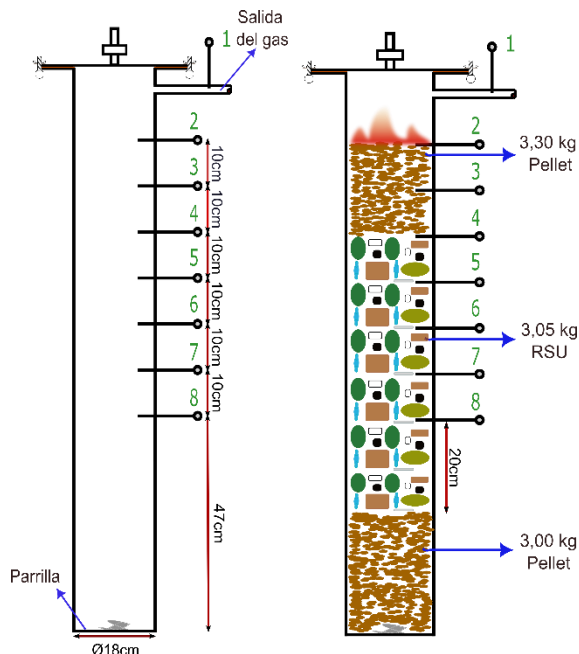
**Figura 2.** Secado de residuos orgánicos.



**Figura 3.** Probetas a base de residuos.

#### 2.1.4. Ensayos experimentales

Se realiza un total de 7 ensayos experimentales. Para asegurar el encendido y alcanzar las temperaturas necesarias para la gasificación, se carga una primera capa de combustible auxiliar con pellet de pino de PCI de 17,3 (MJ/kg) y una capa sobre la parrilla para asegurar un quemado completo. Los primeros 4 ensayos se realizaron para analizar el comportamiento al interior del reactor, en esta etapa se definió la distribución del combustible auxiliar y se infirió la necesidad del secado de la materia orgánica. La distribución de combustible implementada en los 3 ensayos finales se presenta en la Figura 4. Esta se mantuvo constante para realizar el seguimiento de las termocuplas enumeradas en el esquema, y así estudiar el efecto del flujo de aire en la gasificación.

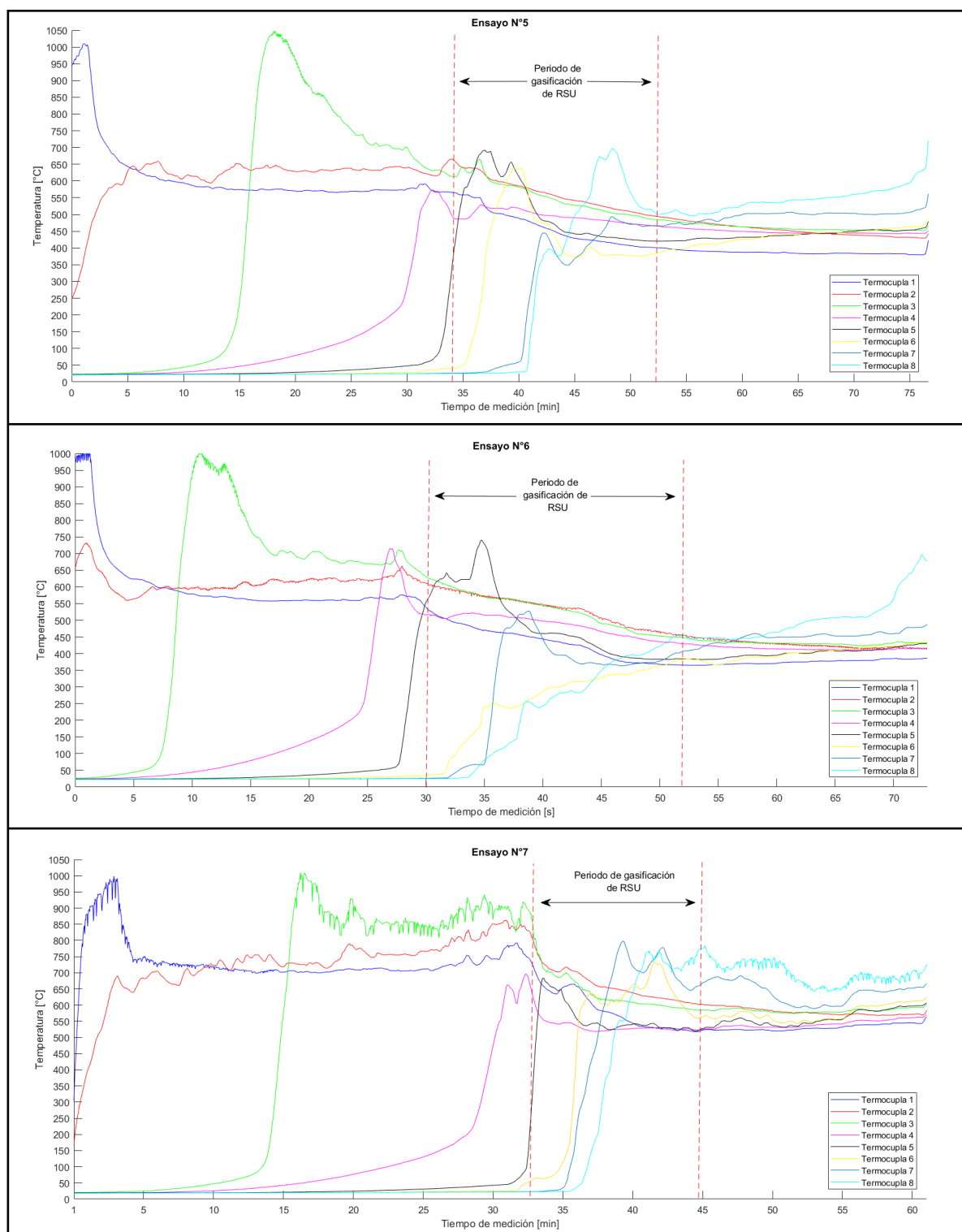


**Figura 4.** Esquema de la distribución de combustible al interior del reactor. Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados

#### 3.1. Proceso al interior del reactor

Del análisis de las temperaturas y la composición del gas de síntesis obtenido durante los ensayos iniciales, se infiere un comportamiento lineal del proceso de gasificación al interior del reactor compuesto por 5 etapas. Estas etapas incluyen un encendido del reactor y combustión de combustible auxiliar de la capa superior. Estabilizadas las temperaturas y reducida la entrada de aire, el combustible comienza a gasificar desde las capas superiores hasta la inferior. Se tiene una gasificación de la capa superior de combustible auxiliar, gasificación de los RSU y gasificación de la capa inferior de combustible auxiliar. Terminando con una combustión de pellet de la capa inferior. Estas etapas se infieren al analizar los perfiles de temperatura a lo largo del reactor durante los primeros ensayos, comportamiento que se mantuvo durante los ensayos finales como se puede ver en los perfiles de temperatura de la Figura 5. De forma similar se puede observar este comportamiento en la composición del gas de síntesis de la Figura 6, donde se puede ver la disminución en el PCI del gas de síntesis a lo largo de los ensayos, la cual coincide con el aumento de temperaturas en las termocuplas donde se ubican los residuos y una nueva variación al alcanzar las termocuplas de la capa inferior de pellet. En base a estas etapas del proceso al interior del reactor se desarrollará el análisis de los resultados en la gasificación de RSU.



**Figura 5.** Perfil de temperaturas durante los ensayos finales. Fuente: elaboración propia.

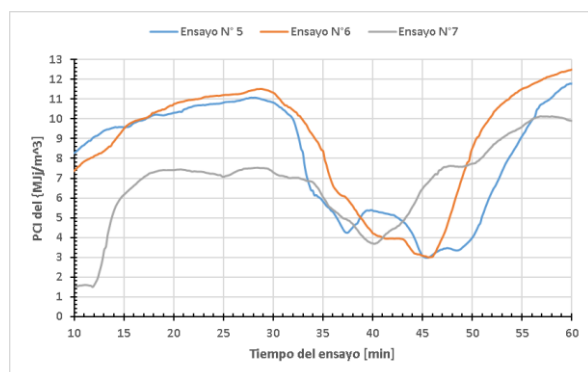
### 3.2. Poder calorífico del gas de síntesis

Se realiza el cálculo del PCI del gas basándose en el periodo de gasificación de RSU de la Figura 5. El analizador TY6330P entrega la composición

porcentual en volumen del  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  y del  $\text{O}_2$  en el gas de síntesis producido.

Además, entrega el PCI del gas en  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ , los resultados se presentan en la Figura 6. El gasificador no cuenta con instrumentación para medir el flujo volumétrico del gas de síntesis, por lo que no es





**Figura 6.** PCI del gas de síntesis producto de gasificación de RSU.

posible calcular la eficiencia del gas frío. Sin embargo, se realiza el balance másico del reactor mediante la ecuación (1). Además, se calcula la razón de equivalencia (RE), correspondiente a la razón entre el aire utilizado en la gasificación con el aire necesario para la combustión estequiométrica. Estos resultados son presentados en la Tabla 2.

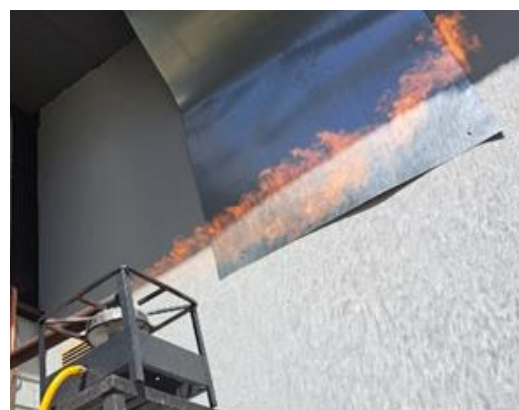
$$m_{RSU} + m_{aire} = m_{syngas} + m_{residuos} \quad (1)$$

El PCI obtenido se mantiene dentro del rango esperado, obteniéndose una combustión exitosa del gas combustible, como se muestra en la Figura 7. La disminución del flujo de aire implicó la reducción de las temperaturas en el reactor. De acuerdo con la información estudiada en la literatura, a temperaturas inferiores a los 600°C, el carbono y el oxígeno tienden a permanecer en forma de CO<sub>2</sub> y como “Char”. Si se aumenta la temperatura, el oxígeno tiende a reaccionar con el carbono antes que el hidrógeno, rompiéndose el CO<sub>2</sub> y aumentando la formación de CO, así aumenta la formación de H<sub>2</sub>, cuando las temperaturas superan los 600°C, el CH<sub>4</sub> como otros hidrocarburos tienden a descomponerse [7].

**Tabla 2. Balance de ensayos finales**

Parámetro	Ensayo N°5	Ensayo N°6	Ensayo N°7
Tiempo de medición [min]	18,33	21,67	11,67
Flujo de aire de entrada [l/min]	14	11	17
T° de salida de los gases [°C]	459,8°	416,7	549,3
Masa de aire [kg]	0,309	0,287	0,239
Masa de RSU [kg]	2,542	2,542	2,542
Masa de gas [kg]	2,277	2,255	2,207
Razón equivalencia	2,38	2,21	1,84
PCI promedio [MJ/Nm³]	4,27	3,65	4,06

Fuente: elaboración propia.



**Figura 7.** Quemado del gas de síntesis a la salida del reactor.

Lo anterior es evidenciado en los ensayos experimentales N°5 y N°7, en estos se presentaron temperaturas sobre los 600°C, lo que generó un incremento en el PCI del gas. De esto, se asume que el aumento en temperatura favorece la reacción de Boudouard, el reformado en seco y la oxidación de hidrocarburos por sobre las reacciones de hidrogasificación y metanización [7].

En cuanto a la razón de equivalencia, esta es baja con respecto a lo estudiado en la literatura, donde las más altas eficiencias para la gasificación de RSU se encuentran para un rango de RE entre 0,25-0,35 [7]. El problema radicó que, al aumentar el flujo de aire, el consumo de los RSU fue más rápido, lo que implicó una baja razón de equivalencia. Por el contrario, cuando se disminuyó el flujo de aire, aumentó el tiempo, sin embargo, el reactor disminuyó considerablemente su temperatura dando indicios de un posible apagado.

### 3.3. Comparación de resultados

Para extender el análisis de resultados, se realizó la comparación de la composición obtenida con proyectos de gasificación de RSU en Latinoamérica [8], presentada en la Tabla 3. En este caso se considera la composición del ensayo N°5 por poseer la mayor RE y mayor PCI. Se observa diferencias principalmente en las elevadas concentraciones de CO y CO<sub>2</sub>. Los ensayos llevados a cabo en Brasil fueron realizados a una temperatura promedio al interior del reactor de 740°C mientras que, en los ensayos experimentales realizados en la Universidad de Concepción, no se pudo estabilizar una temperatura, y la mayor parte del tiempo fue inferior a los 740°C. A esto, se puede adjudicar la menor concentración de H<sub>2</sub>. Por otro lado, la diferencia considerable en cuanto a la elevada concentración de CO<sub>2</sub> y de CO apunta a una presencia mayoritaria de las reacciones de oxidación presentes en el proceso de gasificación [7].

**Tabla 3. Comparación de composición de gas con proyecto en Paraná, Brasil.**

Composición (%Volumen)	Universidad de Concepción	Energía Limpia do Brasil Company[8]
H <sub>2</sub>	1,43	3,81
CH <sub>4</sub>	1,34	3,43
CO	8,35	4,20
CO <sub>2</sub>	21,97	13,39

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Combustible auxiliar

Si bien el foco está puesto en la gasificación de los RSU, se realiza un análisis del comportamiento del combustible auxiliar cuando este es gasificado. Sin enfocarse en la composición y poder calorífico del pellet, se estudió el PCI en el gas de síntesis generado durante los periodos de gasificación del combustible auxiliar en las curvas del PCI presentadas en la Figura 6. Se puede observar un aumento en el PCI cuando se gasifica la capa inferior de pellet, con respecto al poder calorífico calculado mientras se gasifica la capa superior del combustible auxiliar. Este incremento del poder calorífico entre ambas capas se mantiene dentro de un rango de porcentaje del 15-28%. La diferencia puede implicar la posibilidad de que el combustible de las capas superiores no se gasifica por completo en las distintas etapas al interior del reactor, reduciendo su tamaño y acumulándose en el fondo del reactor, y que el aumento en el PCI se deba a una gasificación en conjunto de pellet y RSU.

## 4. Conclusiones

### 4.1. Conclusiones

Durante la etapa experimental se observó que sin el pretratamiento de los residuos no es posible gasificar RSU. Debido a la forma de propagación ascendente del calor en el reactor, se concluye que no es capaz de realizar el secado de los residuos con alto contenido de humedad, lo que hace que esta etapa el tratamiento previo sea obligatorio.

Fue necesario realizar 7 ensayos, donde en cada uno de ellos se adaptó la carga para lograr obtener una gasificación exitosa. De estos, los 3 ensayos finales emulan la composición de los RSU de la región que, al obtener un gas combustible, demuestran que es posible su gasificación. Los resultados son acordes a lo esperado en la literatura, con un PCI promedio de 4,27 (MJ/Nm<sup>3</sup>), el valor más elevado se dio para la razón de equivalencia más alta, en este caso, la más cercana a los valores de mayor eficiencia de acuerdo con los estudiado en la literatura.

Se concluye que es posible gasificar RSU en el gasificador ascendente modificado aplicando un tratamiento previo de los residuos. Adicionalmente, se concluye que el proceso de gasificación no se completó en el periodo estudiado, las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> apuntan a la predominancia de reacciones de oxidación al interior del reactor y el incremento en el PCI del gas de síntesis durante la gasificación de la capa inferior de combustible señala la presencia de una mezcla de residuos y pellet. Sumado a eso, la baja razón de equivalencia calculada da indicios de un proceso que no ha sido completado, de lo cual se concluye que queda carbono por ser gasificado, este se acumula como “char” y se mezcla con el pellet. Por todo esto, el análisis de los resultados es alentador, ya que el PCI del gas de síntesis se encuentra dentro del rango esperado aun considerando estas perspectivas de mejoras.

### 4.2. Perspectivas

Se estima que es necesario extender el periodo de tiempo de gasificación de los RSU, aumentando el volumen total de aire para lograr incrementar la RE, lo que favorecerá la reacción de Boudouard y el reformado en seco, incrementando el PCI y disminuyendo las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el gas.

Se propone la instalación de una placa de orificio en la tubería de salida de los gases, esto permitirá calcular el volumen de gas que se genera y por consiguiente la eficiencia del gas frío. Es de suma importancia calcular este parámetro para encontrar las condiciones óptimas de gasificación de los RSU que permitan la futura implementación de una central de gasificación a gran escala. Por otro lado, para obtener mejores resultados se deberá rediseñar el sistema de alimentación del gasificador, para realizar una alimentación constante con combustible a base de residuos y así poder asegurar el completo desarrollo de las reacciones dentro del reactor, sin ser mezclada con el combustible auxiliar. Ambas son tareas pendientes por realizar.

Por último, comprobada la viabilidad de la gasificación de los RSU, se considera que la implementación de un ciclo eléctrico con un ciclo combinado puede incluir el proceso de secado necesario para los residuos aumentando el rendimiento. Considerando la venta de energía eléctrica, se evitaría la electricidad generada a base de combustibles fósiles, con un beneficio ambiental aún mayor. Otra opción es la utilización de secadores solares para aumentar el rendimiento global del proceso. A la hora de diseñar una central a gran escala, será necesario considerar la energía eléctrica para mover los productos, que puede ser intermitente, o las campanas para captar gases y olores de secado.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo y voluntad del personal del laboratorio de Hormigones, Taller Mecánico y del Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción, en específico Gerard, José, Ricardo y Rolando.

## Referencias

- [1] Ministerio del Medio Ambiente [MMA], “Octavo Reporte del Estado del Medio Ambiente,” 2023. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2023/>
- [2] Ministerio del Medio Ambiente [MMA], “Informe del Estado del Medio Ambiente,” 2020. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/informe-del-estado-del-medio-ambiente-2020/>
- [3] Ministerio del Medio Ambiente [MMA], “Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente,” 2021. Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/06/REMA2021.pdf>
- [4] Ministerio del Medio Ambiente [MMA], *Ley 20920*. 2016.
- [5] C. S. Psomopoulos, A. Bourka, and N. J. Themelis, “Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA,” *Waste Management*, vol. 29, no. 5, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.11.020.
- [6] BioEnergy Producers Association, “Evaluation of Emissions from Thermal Conversion Technologies Processing Municipal Solid Waste and Biomass,” California, Jun. 2009. Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: [https://dpw.lacounty.gov/epd/SoCalConversion/pdfs/UCR\\_Emissions\\_Report\\_62109.pdf](https://dpw.lacounty.gov/epd/SoCalConversion/pdfs/UCR_Emissions_Report_62109.pdf)
- [7] U. Arena, “Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,” *Waste Management*, vol. 32, no. 4, 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
- [8] E. J. Lopes, N. Queiroz, C. I. Yamamoto, and P. R. da Costa Neto, “Evaluating the emissions from the gasification processing of municipal solid waste followed by combustion,” *Waste Management*, vol. 73, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.12.019.
- [9] S. Heberlein, W. P. Chan, A. Veksha, A. Giannis, L. Hupa, and G. Lisak, “High temperature slagging gasification of municipal solid waste with biomass charcoal as a greener auxiliary fuel,” *J Hazard Mater*, vol. 423, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127057.
- [10] D. T. Pedroso, E. B. Machín, J. L. Silveira, and Y. Nemoto, “Experimental study of bottom feed updraft gasifier,” *Renew Energy*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.01.056.
- [11] Daniel Cuevas, “Gasificación de biomasa y RSU en un reactor de gasificación Updraft modificado,” Universidad de Concepción, Concepción, 2021.
- [12] Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo [SUBDERE], “Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables. Programa nacional de residuos,” Santiago, 2018. Accessed: May 10, 2024. [Online]. Available: [https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/4.1\\_diagnostico\\_introduccion\\_agosto\\_2018.pdf](https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/4.1_diagnostico_introduccion_agosto_2018.pdf)
- [13] Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA], “Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile,” 2010.
- [14] Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA], “Informe Final Estudio Caracterización de los residuos sólidos domiciliarios en la región Metropolitana,” 2006.