



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
mención en Ingeniería Mecánica**

**Gasificación de RSU en un reactor Updraft modificado**

**Tesis para optar al grado de**

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica**

**Daniel Cuevas Arcos**

**CONCEPCIÓN - CHILE**

**2023**

**Profesor Guía: Einara Blanco Machín**

**Daniel Travieso Pedroso**

**Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería**

**Universidad de Concepción**

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, Leonardo Cuevas y Marcela Arcos por darme la mejor formación escolar posible, los valores que me inculcaron, por promover mis sueños, creer y confiar en mi al darme la oportunidad de desarrollar mis estudios superiores en Concepción.

Agradezco a mis tutores de tesis Einara Blanco y Daniel Travieso por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto de investigación, guiarme en el desarrollo del proyecto, tener la mayor disposición en responder todas mis consultas que se fueron planteando a medida que se ejecutaba el trabajo.

También debo agradecer a todo el personal técnico de la universidad de Concepción que me ayudo tanto en la fabricación y operación del reactor. A don José y don Ricardo por ayudarme a desarmar y armar el reactor tantas veces fueron necesarias. A don Eduardo, don Mario y Rodrigo por brindarme apoyo técnico de fabricación de elementos mecánicos. Mención especial para mi colega Sebastián Yañez, por su apoyo en la fabricación de las probetas y requerimientos varios al momento de los ensayos.

Además, agradezco a todos mis amigos y personas que me acompañaron en este viaje, ya que, gracias a su apoyo moral, palabras de aliento y jornadas de distensión en “Casa salud” me ayudaron bastante para finalizar mi etapa en el pregrado y postgrado.

Finalmente, quiero dar las gracias a Angelica González, quien me ha acompañado incondicionalmente en todo este periodo, apoyándome en todo momento con toda su paciencia y dedicación. No fue fácil terminar este proyecto, pero tú siempre creíste en mí. Me ayudaste más de lo que deberías y por eso te amo mucho.

Muchas gracias a todos, sin ustedes todo esto no sería posible.

## Resumen

Actualmente, la producción de los residuos va en incremento a nivel mundial a causa del aumento de la población mundial. Particularmente en Chile, el 99% de los residuos sólidos urbanos (RSU) va como disposición final al vertedero, lo cual está encima del promedio de los países que componen la OECD (44%). Entonces, como alternativa de manejo de RSU, se propone su caracterización energética mediante el sistema de gasificación, específicamente con la tecnología de un reactor ascendente modificado, el cual tiene como innovación de ingresar el combustible por la zona inferior del reactor y agregar una entrada secundaria de agente oxidante. El objetivo del presente estudio es producir un gas combustible a partir de la gasificación de RSU con un contenido energético mayor de 2,5 MJ/Nm<sup>3</sup> empleando aire como agente oxidante.

La metodología empleada es de gasificar RSU de composición conocida, la cual es similar a la composición actual de los RSU en Chile. Los RSU que se utilizan son: plásticos, cartón, goma, textiles y materia orgánica (cascaras de frutas, vegetales, frutos secos, entre otros). Con el fin de garantizar el encendido y el pagado del reactor, se utiliza pellet de biomasa (pino radiata), esto debido a sus características y su conocimiento experimental. En los experimentos se testea distintos tipos de composición de RSU para su valorización energética y los efectos de su composición sobre la temperatura, la composición del gas producido y el PCI del gas producido.

Como resultados se obtiene un gas estable en base a RSU con un poder calorífico inferior promedio (PCI) entre 2,53 y 2,87 MJ/Nm<sup>3</sup>. En comparación del PCI generado con pellet de biomasa, el PCI en base a RSU disminuye sobre un 65% su contenido energético. Las temperaturas máximas al interior del reactor rondan entre los 684 °C y 760°C, lo que en promedio es 213 °C menor que la temperatura máxima alcanza al utilizar pellet de biomasa como combustible. Los resultados del estudio indican que las diferentes composiciones de RSU analizadas tienen un bajo impacto en el PCI del gas producido y en la temperatura del proceso.

Los resultados obtenidos son alentadores, ya que se obtiene un gas combustible con un PCI aceptable en base de a RSU, pero no se tiene certeza de la influencia de los pellets en el resultado final. Es por esto que se propone implementar el sistema de alimentación con RSU, esto con el fin de asegurar que las mediciones no estén influenciadas con esta materia prima.

# Tabla de Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>ii</b>
<b>Tabla de Contenido</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>vi</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>viii</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Contexto del problema .....	1
1.1.1 Proceso de gasificación .....	2
1.1.2 Gasificación de RSU .....	3
1.2 Contribución del trabajo .....	4
1.3 Hipótesis y Objetivos .....	4
1.3.1 Hipótesis .....	4
1.3.2 Objetivos .....	4
1.4 Metodología .....	5
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>7</b>
<b>Marco teórico</b> .....	<b>7</b>
2.1 Gasificación .....	7
2.1.1 Contexto histórico .....	7
2.1.2 Etapas de gasificación .....	7
2.2 Tipo de gasificadores .....	8
2.2.1 Reactor de corriente ascendente modificado .....	9
2.3 Elementos principales del sistema de gasificación .....	10
2.3.1 Sistema de alimentación .....	11
2.3.2 Reactor .....	11
2.3.3 Sistema de limpieza para el gas combustible .....	12
2.3.4 Agentes gasificantes .....	13
2.4 Caracterización de los RSU .....	14
2.4.1 Valorización energética de los RSU .....	15
2.4.2 Composición de los RSU en Chile .....	16
2.4.3 Caracterización de la biomasa .....	17

<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>19</b>
<b>Reactor de corriente ascendente modificado</b> .....	<b>19</b>
3.1 Descripción del equipo .....	19
3.1.1 Descripción del proceso .....	20
3.2 Reactor .....	21
3.2.1 Cuerpo principal del reactor .....	22
3.2.2 Parrilla .....	22
3.2.3 Depósito de cenizas .....	23
3.3 Sistema de salida de los gases .....	23
3.3.1 Ciclón .....	23
3.3.2 Tubo de salida y quemador .....	24
3.4 Sistema de alimentación .....	25
3.4.1 Tornillo sin fin .....	25
3.4.2 Tolva .....	25
3.5 Sistema de aire .....	26
3.6 Sistema de control .....	26
3.7 Sistema de medición .....	27
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>29</b>
<b>Resultados experimentales</b> .....	<b>29</b>
4.1 Descripción de los RSU .....	29
4.2 Resultados experimentales .....	30
4.3 Análisis de resultados .....	30
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>35</b>
<b>Conclusiones y perspectivas</b> .....	<b>35</b>
5.1 Conclusiones .....	35
5.2 Perspectivas .....	36
<b>Referencias</b> .....	<b>37</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>40</b>
• Experiencia 0 .....	40
• Experiencia 1 .....	41
• Experiencia 2 .....	45
• Experiencia 3 .....	48
• Experiencia 4 .....	51
• Experiencia 5 .....	55
• Experiencia 6 .....	60
• Experiencia 7 .....	63

## Índice de figuras

Figura 1. Sistema de gasificación instalado en el laboratorio de Termofluidos. Fecha: 06/20.	6
Figura 2. Instalación experimental del gasificador modificado. [Fuente: (Travieso et al., 2013)].	10
Figura 3. Balance energético del reactor <i>Updraft</i> modificado.	11
Figura 4. Generación de residuos municipales en Chile y el promedio en la OECD. [Fuente: (OECD, 2020)].	14
Figura 5. Destino de la biomasa residual. [Fuente:(Orellana, 2016)].	18
Figura 6. Sistema de gasificación instalado en el laboratorio de Termofluidos. Fecha: 01/21.	19
Figura 7. Flujos máxicos involucrados en el banco de ensayos.	20
Figura 8. Esquema del gasificador instalado en el laboratorio de Termofluidos.	21
Figura 9. Distribución de agujeros en la parrilla.	23
Figura 10. Parámetros de diseño del ciclón. [Fuente: (Perry, 1984)].	24
Figura 11. Tornillo sin fin alimentador.	25
Figura 12. Tolva de alimentación.	26
Figura 13. (a) Probetas de cartón y plástico. (b) Probetas de materia orgánica.	29
Figura 14. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 0.	31
Figura 15. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 4.	32
Figura 16. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 5.	32
Figura 17. Comparación gráfica entre todos los experimentos.	33
Figura 18. Análisis de gases para la experiencia 0.	40
Figura 19. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 0.	41
Figura 20. Análisis de gases para la primera experiencia.	44
Figura 21. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 1.	45
Figura 22. Análisis de gases para la segunda experiencia.	47
Figura 23. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 2.	48
Figura 24. Análisis de gases para la tercera experiencia.	50
Figura 25. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 3.	50
Figura 26. Análisis de gases para la cuarta experiencia.	54
Figura 27. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 4.	54
Figura 28. Análisis de gases para la quinta experiencia.	59
Figura 29. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 5.	59
Figura 30. Análisis de gases para la sexta experiencia.	62
Figura 31 PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 6.	62
Figura 32. Análisis de gases para la séptima experiencia.	64
Figura 33. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 7.	65

## Índice de tablas

Tabla 1. Concentración de alquitrán aceptado para distintos equipos. [Fuente: (Thapa et al., 2017)].	3
Tabla 2. Contenido masico de los RSU analizados.	5
Tabla 3. Propiedades admisibles de los combustibles para cada tecnología. [Fuente: (Dominguez Javier et al., 2018)].	9
Tabla 4. Resultados experimentales para un reactor de corriente ascendente modificado. [Fuente: (Travieso et al., 2013)].	10
Tabla 5. Comparación entre los distintos tipos de limpiadores de gases. [Fuente: (Valderrama Rios et al., 2018)].	13
Tabla 6. Agente gasificante y el gas que genera. [Fuente: (Dincer & Zamfirescu, 2016)].	14
Tabla 7. Efectos negativos en el ecosistema al aplicar distintas tecnologías de valorización energética de RSU. [Fuente: (Watkins & McKendry, 2014a)].	15
Tabla 8. Composición de los residuos domiciliarios en la región metropolitana en el 2005. [Fuente: (CONAMA, 2006)].	16
Tabla 9. Composición porcentual de los RSU en Concepción. [Fuente: (Neira, 2020)].	16
Tabla 10. Análisis elemental a los RSU en Concepción. [Fuente: (Neira, 2020)].	16
Tabla 11. Características de los pellets comercializados por ECOMAS. [Fuente:(Ecomas, 2020)].	17
Tabla 12. Dimensiones del ciclón.	24
Tabla 13. Rango de medición del analizador de gases Portable Syngas Analyser SYN-600. [Fuente: (TIANYU, 2020)].	28
Tabla 14. Masa evaluada en cada experiencia.	30
Tabla 15. Comparación entre los experimentos.	33
Tabla 16. Flujo de aire ingresados al gasificador para el ensayo 0.	40
Tabla 17. Valores máxicos para el primer experimento.	41
Tabla 18. Flujo de aire ingresados al gasificador para el primer ensayo.	41
Tabla 19. Análisis de gases en intervalo estable para la primera experiencia.	42
Tabla 20. Valores máxicos para el segundo experimento.	45
Tabla 21. Flujo de aire ingresados al gasificador para el segundo ensayo.	45
Tabla 22. Análisis de gases en intervalo estable para la segunda experiencia.	46
Tabla 23. Valores máxicos para el tercer experimento.	48
Tabla 24. Flujo de aire ingresados al gasificador para el tercer ensayo.	48
Tabla 25. Análisis de gases en intervalo estable para la tercera experiencia.	49
Tabla 26. Valores máxicos para el cuarto experimento.	51
Tabla 27. Flujo de aire ingresados al gasificador para el cuarto ensayo.	51
Tabla 28. Análisis de gases en intervalo estable para la cuarta experiencia.	51
Tabla 29. Valores máxicos para el quinto experimento.	55
Tabla 30. Flujo de aire ingresados al gasificador para el quinto ensayo.	55
Tabla 31. Análisis de gases en intervalo estable para la quinta experiencia.	55
Tabla 32. Valores máxicos para el sexto experimento.	60
Tabla 33. Flujo de aire ingresados al gasificador para el sexto ensayo.	60

Tabla 34. Análisis de gases en intervalo estable para la sexta experiencia.	60
Tabla 35. Valores máxicos para el séptimo experimento.	63
Tabla 36. Flujo de aire ingresados al gasificador para el séptimo ensayo.	63
Tabla 37. Análisis de gases en intervalo estable para la séptima experiencia.	63

## Nomenclatura

$h$	Entalpía [kJ/kg]
$\dot{M}$	Flujo másico [kg/s]
$PCI$	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
$\dot{Q}$	Flujo de calor [kW]
$RAC$	Relación aire-combustible [-]
$T$	Temperatura [°C]
$x$	Fracción molar [-]
$y$	Fracción másica [-]
$\Delta$	Variación [-]
$\eta$	Rendimiento [-]

## Subíndice

$a$	Aire
$ash$	Ceniza
$f$	Combustible
$g$	Gas gasificación
$p$	Perdidas

# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1 Contexto del problema

En la actualidad, la generación de residuos es un serio problema a nivel mundial, pues, debido al crecimiento de la población, la producción de basura aumenta. En el año 2016 se generó 2,01 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel mundial. Se proyecta que para el año 2030 y 2050 se generará, respectivamente, 2,59 y 3,40 billones de toneladas de RSU en todo el globo (Kaza et al., 2018), lo que significa un aumento 28,9% (2030) y 56,2% (2050) con respecto al 2016. Los impactos ambientales ocasionados por los RSU son variados, debido a la disposición final del elemento, composición del RSU, resistencia a la descomposición, etc. En general, los RSU generaron entre un 3% y 4% de las emisiones de  $CO_2$  del 2015 a nivel mundial (1.999 Tg), proyectando una generación para el 2050 de 3.539 Tg de emisiones de  $CO_2$  (un aumento del 77% con respecto al 2015) (Chen et al., 2020). Además, el costo asociado al manejo de los residuos depende de los distintos países y de la cultura que estos tengan (Elagroudy et al., 2016). En el caso de los costos asociados a los residuos, el estudio desarrollado por (Chen et al., 2020) presenta una correlación entre la cantidad de habitantes y el costo del manejo de los RSU. Entonces, en el escenario mundial, para el año 2050 habría un aumento del 205,4% costo per cápita al año (34.466,8 USD/año), en comparación al año 2015 (11.284,7 USD/año).

Existen distintas alternativas para el manejo de los RSU. De forma general, las alternativas más comunes son: reciclaje de los residuos, reutilizar los residuos, depositarlos en un relleno sanitario (vertedero) y valorizar los residuos energéticamente (Kaza et al., 2018). El manejo de los residuos domiciliarios es variado en los distintos países, por ejemplo, el promedio de la OECD, 44% de los residuos va a parar a un vertedero, 34% de los residuos se reciclan, un 20% se incinera para valorizarlo energéticamente, mientras el 2% se incinera sin aprovechamiento energético (OECD, 2015). En el aprovechamiento energético de los residuos se tienen distintos métodos para llevarlo a cabo, algunos de los métodos más convencionales son la incineración, gasificación, gasificación por plasma y digestión. De los métodos anteriores, en la gasificación de residuos tiene como ventaja producir menor cantidad de dióxido de carbono por cantidad de residuos, y si se interpolan los resultados a producción de energía eléctrica, ésta inyecta una mayor cantidad energía eléctrica a la red (Watkins & McKendry, 2014b).

En Chile, los métodos para el manejo de residuos urbanos a nivel nacional es básicamente su disposición en vertederos, ya que el 99% de los residuos termina en los rellenos sanitarios (OECD, 2015). En el estudio desarrollado por (SGS & SIGA INGENIERIA, 2018), presenta que en el año 2017 la generación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables (RSDyA) a nivel nacional fue de 7,488 millones de toneladas. En el 2017, la ciudad de Concepción registró una producción de 95.964 toneladas de RSU (Neira, 2020). En el caso de los RSU, además de la posibilidad de reutilizarlos y/o reciclarlos, también se tiene la alternativa de utilizarlos como combustible y valorizar dicho material energéticamente, donde la ventaja en comparación a otros combustibles es que es mucho más económico.

La composición de los RSU varía por zona geográfica y la estación en la que se encuentre. En el caso de Chile, en el estudio realizado por la CONAMA (institución que posteriormente fue remplazada por el Ministerio del Medio Ambiente) en el 2005, se analiza la composición de los residuos urbanos en la región metropolitana (CONAMA, 2006). En dicho estudio se destaca la presencia de materia orgánica (49,60%), papel y cartón (11,82%), Plásticos (9,74%), entre otros. En Concepción, el estudio realizado por (Neira, 2020) indica que la composición de los residuos sólidos domiciliarios (RSD) son mayoritariamente materia orgánica (53%), papel y cartón (13%) y plásticos (9%).

### 1.1.1 Proceso de gasificación

Aunque la aplicación de la gasificación no es novedosa, su estudio vuelve a tomar fuerza debido a que con esta tecnología se pueden valorizar los desechos residenciales, industriales y además combustibles sólidos convencionales. Estas aplicaciones hacen que la gasificación se convierta en una tecnología atractiva, al poder sacar provecho de elementos indeseados y transformarlos en energía útil para los procesos donde se requiera energía térmica o eléctrica.

La gasificación es un proceso termoquímico que consiste en convertir la energía contenida en un combustible líquido o sólido en un combustible gaseoso con el mínimo de pérdidas energéticas asociadas, el cual tiene un rango de eficiencia 50% a 80% en el gas frío (Arena, 2012). En este proceso, se ingresa la materia prima de forma intermitente, llevándose a altas temperaturas en un ambiente con déficit de oxígeno. Se emplea un agente gasificante que puede ser aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno. En general, la gasificación opera con una concentración de 25% a 35% de oxígeno estequiométrico (Arena, 2012). El producto formado es una mezcla gaseosa compuesta principalmente de  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ , hidrocarburos,  $H_2S$ , alquitran y otras especies (Indrawan et al., 2020). La proporción de cada uno de estos componentes en el gas de gasificación obtenido depende del tipo de sistema de gasificación, del agente de gasificación empleado y la composición elemental del combustible utilizado.

El proceso de gasificación, por su complejidad, se puede interpretar como una serie de etapas que se complementan entre sí. La materia utilizada pasa por una serie de reacciones tanto homogéneas como heterogéneas, además de procesos físicos, las cuales se pueden agrupar en los siguientes procesos: secado, pirólisis, combustión u oxidación y reducción. (Safarian et al., 2019)

Los gasificadores se pueden clasificar según como se mueva el combustible y el agente gasificante en su interior, clasificándose en los siguientes grupos (Arena, 2012): Gasificador de corriente ascendente o tiro directo (*Updraft*), Gasificador de corriente descendente o tiro invertido (*Downdraft*), Gasificador de tiro transversal (*Cross-draft*) y Gasificador de lecho fluidizado (*Fluidized bed*). Los parámetros para la elección del tipo de gasificador son variados, los cuales, generalmente, dependen del combustible, su forma final, el tamaño, el contenido de ceniza y el contenido de humedad.

Un antecedente directo sobre un reactor de gasificación *Updraft* modificado es el operado en Japón, el cual utiliza biomasa como combustible y aire como agente gasificante (Travieso et al., 2013). La modificación del diseño tiene relación con el ingreso del combustible, donde en un reactor convencional el ingreso es por la parte superior del equipo y en el reactor modificado la alimentación es por la zona inferior. Además, este reactor cuenta con una entrada secundaria de aire, la cual se ubica en la zona de combustión. La segunda entrada de agente gasificante potencia la oxidación del proceso, lo que conlleva a un aumento en el rendimiento del equipo (Travieso et al., 2013). De los resultados experimentales con el reactor modificado se logró observar que en régimen estacionario las concentraciones de alquitranes fueron menores, en comparación con el gasificador ascendentes (Cerone et al., 2020), con valores entre 10 a 100  $mg/Nm^3$ . Además, las temperaturas registradas en el lecho fueron del orden de 885 °C para la zona de combustión y 120 °C para la zona de secado. El perfil de temperaturas obtenidas por (Travieso et al., 2013) sugiere una reestructuración de las zonas de

gasificación, debido a que no coincide con los resultados de reactores de corriente ascendente convencional (Cerone et al., 2020) y resultados expuestos en la teoría. (Solar Technical Information Program, 1988)

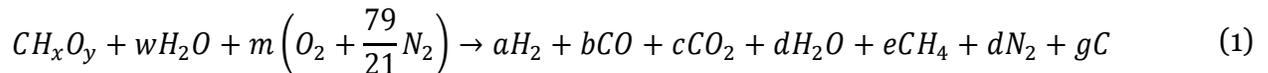
Las modificaciones planteadas tienen como objetivo reducir la concentración de alquitranes en el gas de gasificación, lo que constituye un serio problema para los equipos de generación de energía eléctrica (turbina, motor de combustión interna) y para el medio ambiente (Valderrama Rios et al., 2018). Generalmente, el sistema de limpieza de los gases requiere un alto costo de inversión y operación. En la Tabla 1 se muestran los límites de alquitranes para distintos equipos.

Tabla 1. Concentración de alquitrán aceptado para distintos equipos. [Fuente: (Thapa et al., 2017)].

Equipo	Alquitrán aceptado [g/Nm <sup>3</sup> ]
Turbina a gas	<0,005
Celda de combustible	<0,001
Motor de combustión interna	0,01-0,1

### 1.1.2 Gasificación de RSU

En torno a la gasificación de RSU, considerando un residuo con una composición  $CH_xO_y$  (Byun et al., 2012), la reacción global de gasificación (empleando aire como agente gasificante) puede ser descrita por la ecuación (1).



Donde,  $w$  es el número de moles de agua por mol de RSU,  $m$  es la cantidad de oxígeno por mol de RSU y  $a, b, c, d, e, f$  y  $g$  número de moles de los productos de la gasificación.

Por otro lado, los reactores de lecho fijo (corriente ascendente, corriente descendente y tiro transversal), las experiencias a escala industrial son reducidas. Por ejemplo, de las plantas de generación de energía eléctrica instaladas para reactores *Downdraft*, se encuentran las plantas de Kazusa y Toyohashi (Japón), las cuales generan 2,3 y 8 MW respectivamente (Arena, 2012). En estudios experimentales para el reactor *Downdraft*, se destaca la baja concentración de alquitranes en el gas generado y el rendimiento para este tipo de reactor. El estudio realizado por (Etutu et al., 2016), con un reactor de 2 m de alto y diámetro de 0,6 m, se obtiene una concentración de alquitranes entre 15 a 4,7 g/Nm<sup>3</sup>. Los rendimientos para este tipo de reactor utilizando RSU como combustible es sobre el 70%. (Shintre et al., 2014)

En cuanto a las experiencias con un reactor de lecho fluidizado, se tiene una planta a gran escala en Velmet (Lahti Energía, Finlandia) (Isaksson, 2015), la cual utilizó dos reactores de este tipo, con una potencia de 80 MW. La generación de energía eléctrica es mediante un ciclo a vapor y la planta genero 241 GWh, la cual fue inyectada a la red (Indrawan et al., 2020).

En relación con las experiencias de gasificación de RSU con reactores de corriente ascendentes son escasas. Para el reactor *Updraft* modificado, no se cuentan con estudios experimentales empleando RSU como combustible.

## 1.2 Contribución del trabajo

Como se menciona anteriormente, el manejo de los residuos genera impactos ambientales y económicos en todo el mundo. En Chile, actualmente, el manejo de los RSU es su disposición final en el vertedero y no existen otras alternativas en su administración. Con estos antecedentes, la gasificación de RSU puede ser una alternativa dentro del país para dar otro uso a los residuos, que es la valorización energética. La tecnología planteada es un reactor *Updraft* modificado, el cual tiene la ventaja de tener un alto rendimiento y producir un gas con concentración de alquitranes inferior a los  $250 \text{ mg/Nm}^3$ . La implementación de esta alternativa ocasionaría una disminución en la cantidad de residuos en los vertederos y generando excedentes en el organismo correspondiente (público y/o privado), debido a la comercialización de la energía.

En este contexto, el presente trabajo está orientado principalmente a evaluar este reactor de nuevo tipo utilizando como combustible los RSU. La investigación tiene como finalidad operacionalizar este gasificador de nuevo tipo e identificar relación aire combustible óptima del sistema *Updraft* modificado (puesta a punto), generando la menor cantidad de alquitranes. Se medirá la concentración de alquitranes en el gas generado y los resultados serán comparados con reactores *Updraft* convencionales. La novedad del trabajo está en que actualmente no se tiene registro de estudios operando este tipo de gasificador utilizando RSU como combustibles. Para profundizar en la investigación, se pretende evaluar el comportamiento del equipo, parámetros de operación, caracterización del gas combustible y eficiencia del proceso.

## 1.3 Hipótesis y Objetivos

### 1.3.1 Hipótesis

La Hipótesis de la investigación es: “La modificación del ingreso de combustible a la zona inferior a un reactor *Updraft* produce una reorganización en las zonas de reacción al interior del reactor, permitiendo la gasificación de RSU para la obtención de un gas combustible.”

### 1.3.2 Objetivos

#### 1.3.2.1 Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es producir un gas combustible a partir de la gasificación de RSU con un contenido energético mayor de  $2,5 \text{ MJ/Nm}^3$ .

#### 1.3.2.2 Objetivos Específicos

- 1 Operacionalizar el gasificador *Updraft* modificado instalado en la Universidad de Concepción usando RSU como combustible.
- 2 Evaluar el comportamiento del sistema de gasificación utilizando residuos de composición definida.
- 3 Establecer los parámetros de gasificación adecuados para maximizar la eficiencia energética de operación del sistema.

## 1.4 Metodología

En primera instancia se debe realizar el montaje y mejoras de la instalación experimental (ver Figura 1). El sistema de gasificación se encuentra operativo, sin embargo, se deben corregir parte del diseño e instalar nuevos equipos. La intervención del reactor es en el ingreso de aire, ya que se instalará una nueva entrada de aire secundaria para potenciar la zona de combustión. En el caso de los nuevos equipos se instalará un soplador, un nuevo motor alimentador y el analizador de gases.

Los ensayos estarán constituidos con residuos tales como cartón, plásticos, materia orgánica y pellet. Inicialmente se realizarán ensayos con probetas de cartón y plástico, las cuales tienen la composición de 77% de cartón y 23% de plástico (PEBD). Posteriormente, se realizarán experimentos con materia orgánica, la cual es conformada por: cascara de tomate, papa, huevo, sandía, porotos, nueces, limones, además de hojas choclos, cuesco de durazno, etc. La composición de los RSU utilizada es presentada en la Tabla 2, estos datos son proporcionales al sustraer el ítem “otros” de (CONAMA, 2006). Tanto las probetas de materia orgánica y las probetas de cartón-plástico tienen 60 mm de diámetro y 100 mm de largo. El pellet se utiliza para asegurar el encendido y el apagado del reactor, por ende, se dispone este combustible en la parte superior de la parrilla y en la parte superior del reactor. Este método es implementado para todos los ensayos, independiente de los residuos a analizar.

Entonces, el estudio evalúa la viabilidad de la gasificación de RSU para su valorización energética y los efectos de su composición sobre la temperatura al interior del reactor, la composición del gas de gasificación y el PCI del gas de gasificación. El diseño experimental considerado fue de una sola variable y esta consta de cuatro niveles. Los niveles evaluados para la variable independiente del diseño experimental fueron las composiciones de los RSU, variando los contenidos porcentuales de materia orgánica, cartón, plástico, textiles, residuos de madera y goma.

Tabla 2. Contenido masico de los RSU analizados.

<b>Categoría</b>	<b>% en peso/peso</b>
Materia orgánica	65,40
Cartón	16,04
PEBD	4,60
Polipropileno	1,04
Poliestireno	1,58
Textiles	2,46
Madera	4,44
Goma	4,44

Antes de operar el gasificador se debe realizar la puesta a punto del equipo, que consiste en ajustar sus parámetros de entrada, los cuales son el flujo de combustible y el flujo de aire. La regulación del sistema de gasificación se debe hacer con cada nuevo combustible a utilizar, lo que conlleva a realizar la puesta a punto cada vez que se cambie la composición del combustible. Para el alcance de esta investigación, el sistema de alimentación no se empleará, por lo tanto, el flujo de combustible varía en función de la cantidad de combustible que ingrese al reactor.

Cada corrida experimental tendrá una duración entre 1 a 2 horas.

El proceso de gasificación, debido a su complejidad, se divide en cuatro zonas, que se diferencian por las distintas reacciones que ocurren en cada una de ellas. Debido a las reacciones presentes en cada zona se crea un perfil de temperatura al interior del reactor. Destacando la zona de combustión, que tiene una mayor temperatura, y la zona de secado que tiene una menor temperatura. Para verificar la

hipótesis del proyecto, se debe medir la temperatura al interior del reactor. La medición de temperatura del reactor se realizará mediante 9 termocuplas ubicadas a lo largo de todo el reactor. Las mediciones de temperatura son registradas por un sistema de adquisición de datos, el cual entrega un perfil de temperatura al interior del reactor vs el tiempo transcurrido.

Además, se debe evaluar la relación aire combustible óptima del proceso para cada combustible a utilizar, la correlación con la temperatura alcanzada en el reactor y la concentración de alquitranes en el gas producido.

Para determinar la eficiencia del proceso de gasificación se debe medir el consumo de combustible, alimentación de aire y composición del gas de gasificación. Con la información recopilada se puede estimar la eficiencia del proceso de gasificación por medio de su análisis termodinámico. Con la medición de la composición del gas producido, se puede obtener la cantidad de alquitrán presente en el producto final.

De los datos obtenidos de las pruebas experimentales se analizará y se tendrá que concluir acerca de la influencia de la composición de los residuos en el PCI de los gases de gasificación.

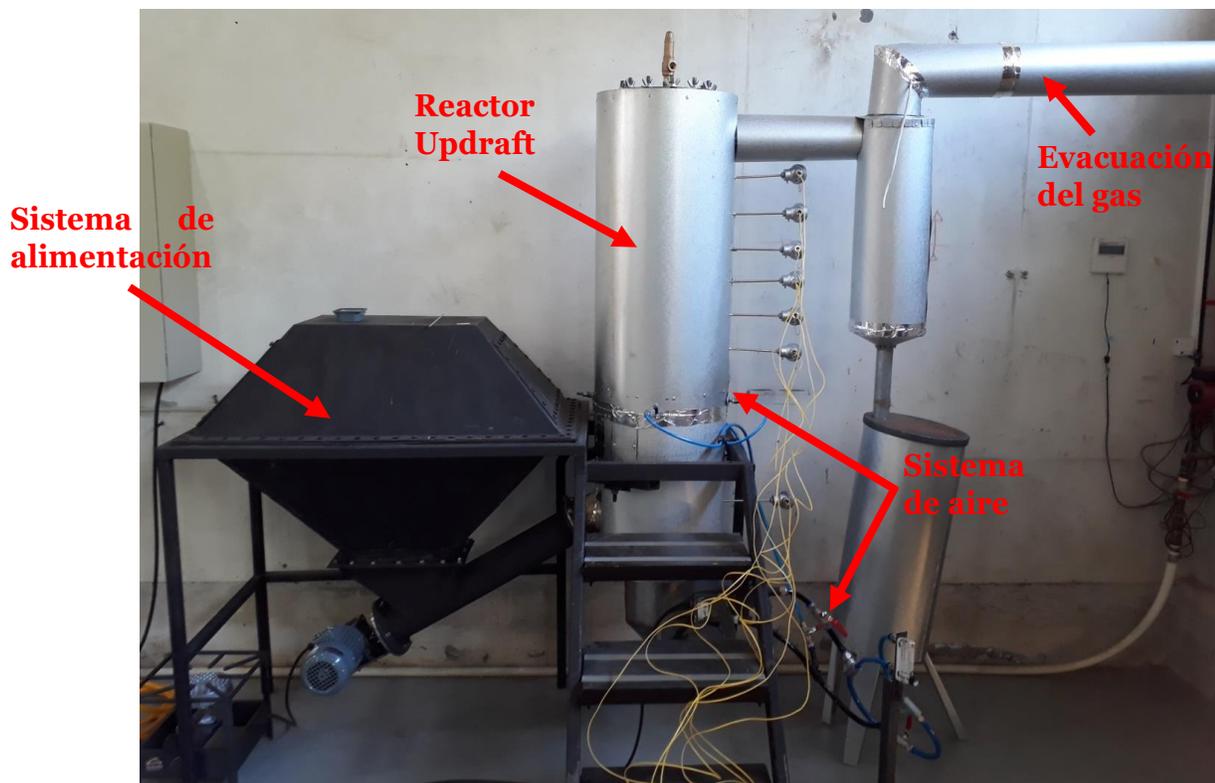


Figura 1. Sistema de gasificación instalado en el laboratorio de Termofluidos. Fecha: 06/20.

## CAPÍTULO 2

### Marco teórico

#### 2.1 Gasificación

##### 2.1.1 Contexto histórico

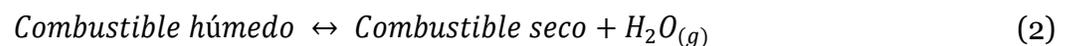
El proceso de gasificación para la conversión de materia orgánica en un portador energético gaseoso es una tecnología con más de 180 años de uso. Inicialmente esta tecnología se utilizó para producir gas de ciudad para el alumbrado o *gaslight* y también se utilizó para labores de cocina. A inicios del siglo XX se empezó a implementar la gasificación para la producción de productos químicos sintéticos, tecnología que actualmente se continúa utilizando. Es importante agregar que durante el periodo de la segunda guerra mundial la gasificación fue ampliamente utilizada por distintos tipos de vehículos en Europa, debido a la escasez de petróleo en esa época. Se estima que pudo ser utilizado en más de 1 millón de vehículos. (Breault, 2010)

##### 2.1.2 Etapas de gasificación

El proceso de gasificación, por su complejidad, se puede interpretar como una serie de etapas que se complementan entre sí. La materia utilizada pasa por una serie de reacciones tanto homogéneas como heterogéneas, además de procesos físicos, las cuales se pueden agrupar en los siguientes procesos: secado, pirólisis, combustión u oxidación y reducción. (Safarian et al., 2019)

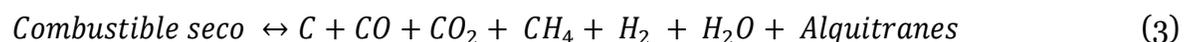
###### 2.1.2.1 Secado

Es un proceso endotérmico el cual busca tener niveles requeridos de humedad para tener una mayor eficiencia en el proceso de gasificado. La humedad contenida en el sólido depende de la tecnología de gasificación empleada. La eficiencia teórica máxima se obtiene de forma general para valores de humedad que oscilen entre el 20 a 30% de su peso en base seca. El proceso de secado comienza a temperaturas inferiores a 100 °C y puede expresarse con la siguiente ecuación: (Singh Siwal et al., 2019)



###### 2.1.2.2 Pirólisis

La pirólisis es un proceso endotérmico que se lleva a cabo a temperaturas entre 200 a 600 °C, este proceso tiene como objetivo la degradación térmica del combustible en ausencia de oxígeno. En este proceso se produce un residuo carbonoso o *char*, gases condensables (hidrocarburos ligeros y pesados) y gases no condensables (monóxido de carbono, metano, dióxido carbono e hidrógeno). La reacción que describe el proceso es detallada en la siguiente ecuación. (Singh Siwal et al., 2019)



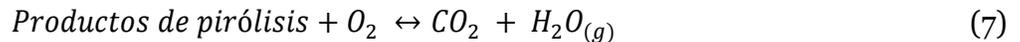
Además, la ecuación puede ser complementada por otras reacciones químicas. En el estudio realizado por (Ratnadhariya & Channiwala, 2003), el proceso de pirólisis puede ser modelado por tres

ecuaciones complementarias, las cuales son: *Steam reforming* (4), *Methanation reaction* (5) y *Water-gas shift reaction* (6).



### 2.1.2.3 Combustión u oxidación

La etapa de combustión es un proceso exotérmico, donde se libera la energía necesaria para desarrollar el resto de las reacciones de la gasificación. Las reacciones presentes en esta zona pueden llegar a temperaturas de 1000 °C a 1300 °C (Singh Siwal et al., 2019). La ecuación de la combustión de forma genérica se detalla a continuación, la cual depende del agente gasificante que se emplee en el proceso. Considerando oxígeno como agente gasificante, la reacción que describe el proceso se puede escribir como sigue: (Singh Siwal et al., 2019)



En el caso de las ecuaciones complementarias, según (de Souza-Santo, 2005), en la zona de combustión para los gasificadores de lecho fijo, las reacciones de *Methanation reaction* (8) y *Boudoard equilibrium* (9) son parte de las reacciones principales.



### 2.1.2.4 Reducción

La fase de reducción al ser compleja se divide en subprocesos para facilitar su análisis. Esta fase se empieza a desarrollar cuando la materia alcanza una temperatura entre los 700 °C y los 900 °C. Las reacciones ocurren en presencia de vapor de agua y dióxido de carbono, produciendo monóxido de carbono e hidrógeno molecular: (Singh Siwal et al., 2019). Las siguientes ecuaciones presentan las principales reacciones de esta etapa del proceso.



## 2.2 Tipo de gasificadores

Los gasificadores se puede clasificar según como se mueva el combustible y el agente gasificante al interior de estos, los cuales a grandes rasgos se pueden clasificar como de lecho fijo, lecho móvil y gasificación por plasma. Algunos de los principales tipos de gasificadores son: (Arena, 2012)

- Gasificador de corriente ascendente o tiro directo (*Updraft*)
- Gasificador de corriente descendente o tiro invertido (*Downdraft*)
- Gasificador de tiro transversal (*Cross-draft*)
- Gasificador de corriente ascendente modificado
- Gasificador de lecho fluidizado (*Fluidized bed*)
- Gasificador a plasma

Los parámetros para la elección del tipo de gasificador son variados, los cuales, generalmente, dependen del combustible, su forma final, el tamaño, el contenido de ceniza y el contenido de humedad. Se debe además considerar que estos equipos están en constante modificación, por lo que el diseño original se altera para lograr mejorar la gasificación en distintas situaciones. En la Tabla 3 se muestran algunos de los requerimientos que debe tener el combustible en los gasificadores de lecho fluidizado, de flujo descendente y de flujo ascendente.

Tabla 3. Propiedades admisibles de los combustibles para cada tecnología. [Fuente: (Dominguez Javier et al., 2018)].

<b>Parámetro</b>	<b><i>Downdraft</i></b>	<b><i>Updraft</i></b>	<b><i>Fluidized bed</i></b>
Tamaño [mm]	20 – 100	5 – 100	10 – 100
%Humedad	<15	<50	<40
%Ceniza	<5	<15	<20
Morfología	Uniforme	Casi uniforme	Uniforme
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	>500	>400	>1000

### **2.2.1 Reactor de corriente ascendente modificado**

Considerando las características de los diferentes gasificadores anteriormente mencionados, se determina que los de corriente ascendente son los más apropiados para el presente trabajo; sin embargo, para maximizar sus ventajas se aplican modificaciones al diseño original.

La modificación del diseño en este caso se realiza en la alimentación del combustible, donde el material hace su entrada por encima de la parrilla ubicada en la zona inferior del reactor en dirección ascendente. Este tipo de gasificador ya ha sido utilizado logrando una ventaja considerable en cuanto a la reducción del contenido de alquitranes en el gas de gasificación, en comparación a su contraparte original.

#### **2.2.1.1 Estudio experimental de un gasificador de corriente ascendente modificado**

Como antecedente directo se tiene el estudio de un reactor *Updraft* modificado (Travieso et al., 2013) que fue caracterizado con chip de madera como combustible, con un contenido de humedad de 8% y un poder calorífico en base seca de 4 - 6 MJ/Nm<sup>3</sup>. Para el estudio se midieron las temperaturas a lo largo del reactor por medio de termocuplas y la concentración de alquitrán en el gas de salida por las 6 horas que duraba la carga de combustible; además para términos de comparación se estimó el rendimiento del proceso de gasificación. En la Figura 2 se muestra un esquema de la instalación del banco de ensayos.

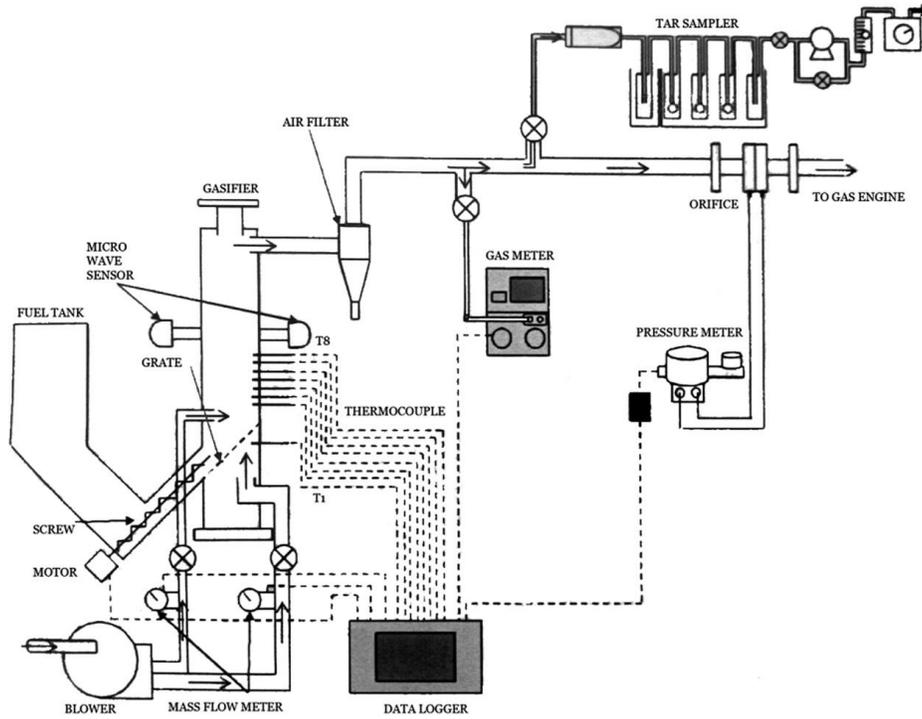


Figura 2. Instalación experimental del gasificador modificado. [Fuente: (Travieso et al., 2013)].

De los resultados experimentales con el reactor modificado se logró observar que en régimen estacionario las concentraciones de alquitranes fueron mucho menores, en comparación con el gasificador ascendente convencional, con valores entre 10 a 100 mg/Nm<sup>3</sup>. Además, las temperaturas registradas en el lecho fueron del orden de 885 °C para la zona de combustión y de 120 °C para la zona de secado, obteniendo un rendimiento del proceso entre un 60 y un 70%.

La Tabla 4 se muestra la cantidad de gas producido, la composición del gas y su poder calorífico en función la cantidad de aire inyectado y la cantidad de humedad presente en la biomasa que se utilizó para las tres corridas experimentales.

Tabla 4. Resultados experimentales para un reactor de corriente ascendente modificado. [Fuente: (Travieso et al., 2013)].

Parámetro	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3
Contenido de humedad [%]	8	8	8
Flujo medio de aire [m <sup>3</sup> /h]	15,1	17,6	17,3
Flujo medio de gas [m <sup>3</sup> /h]	19,8	22,9	21,1
CO [%]	26,97	22,39	18,9
H <sub>2</sub> [%]	7,07	5,29	4,64
CO <sub>2</sub> [%]	19,0	12,96	3,43
CH <sub>4</sub> [%]	4,32	2,69	3,43
O <sub>2</sub> [%]	0,19	0,45	0,12
Poder calorífico [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	5,71	4,36	4,11

### 2.3 Elementos principales del sistema de gasificación

Independientemente del tipo de tecnología de gasificación que se implemente, existen equipos en común para todos los gasificadores, los que cumplen funciones indispensables para el funcionamiento del sistema.

### 2.3.1 Sistema de alimentación

Para introducir el combustible a los distintos tipos de reactores se debe homogenizar el tamaño de éste, facilitando el proceso de alimentación, las reacciones del proceso, y evitando interrupciones indeseadas debido a obstrucciones. Existen diferentes tipos de diseños para los sistemas de alimentación, que dependen principalmente del tipo de combustible y la presión de operación del gasificador. (Nevill, 2001)

#### 2.3.1.1 Alimentación mediante tornillo sin fin

Este sistema se compone por una tolva alimentadora, que sirve como depósito del material, y de un tornillo sin fin o transportador helicoidal impulsado por un motor. La frecuencia de giro está dada por la cantidad de materia que se le desea ingresar al gasificador. Las ventajas de este sistema son: la versatilidad para transportar sólidos homogéneos, la facilidad de sellar y que puede funcionar tanto a presiones positivas como negativas. (Nevill, 2001)

### 2.3.2 Reactor

Es la parte principal del sistema de gasificación. En este elemento tiene lugar el proceso de gasificación. El diseño del reactor depende de la tecnología a emplear, existiendo diversas opciones, que serán presentadas posteriormente en este trabajo.

#### 2.3.2.1 Balance energético del reactor Updraft modificado

Para el balance energético del gasificador, se toma como referencia el desarrollado en el estudio (Blanco, 2015), el cual considera un reactor de gasificación de lecho fluidizado que utiliza como combustible biomasa. En la Figura 3 se muestran los flujos másicos y de energía del reactor.

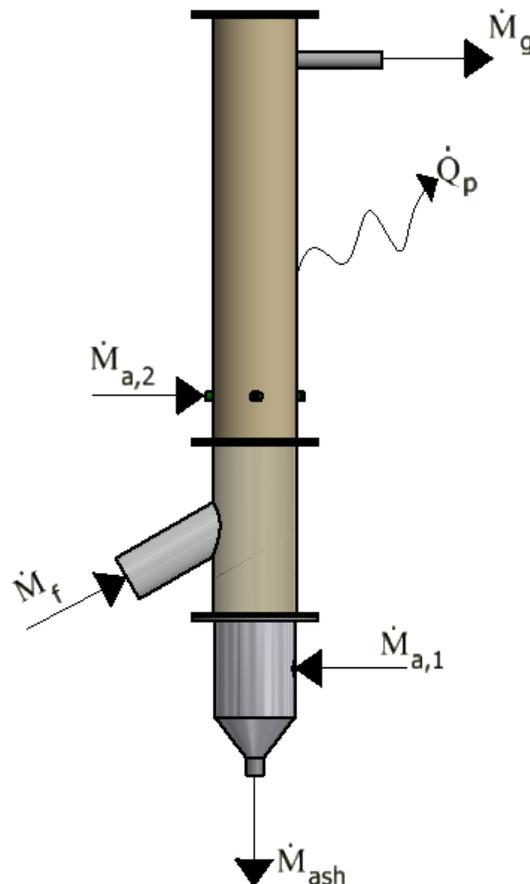


Figura 3. Balance energético del reactor *Updraft* modificado.

Al aplicar la primera ley de la Termodinámica al volumen de control mostrado en la ecuación (14), se puede determinar la siguiente expresión:

$$\dot{M}_f PCI_f + (\dot{M}_{a,1} + \dot{M}_{a,2})h_a = \dot{M}_g PCI_g + \dot{Q}_p \quad (14)$$

El PCI del gas es estimado mediante la expresión (15), la cual es una aproximación con los gases más energéticos presentes en el producto final. Para la estimación del PCI del gas generado se emplea la ecuación presentada en (Tamošiunas & Jeguirim, 2019), debido a que considera el componente energético de los alquitranes y estos se representan por medio del contenido energético del acetileno. (Tamošiūnas et al., 2019)

$$PCI_g = 10,78x_{H_2} + 12,63x_{CO} + 35,88x_{CH_4} + 56,5x_{C_2H_2} \quad (15)$$

El rendimiento del reactor es estimado con la energía generada por el reactor por la cantidad de energía suministrada. En la ecuación (16) se presenta la expresión para estimar la eficiencia de un reactor de gasificación.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_g}{\dot{M}_f PCI_f} = \frac{\dot{M}_g PCI_g}{\dot{M}_f PCI_f} \quad (16)$$

La relación aire combustible se define como:

$$RAC = \frac{\dot{M}_a}{\dot{M}_f} \quad (17)$$

Remplazando la ecuación (17) en (16), se obtiene la siguiente ecuación para expresar el rendimiento del reactor:

$$\eta = \frac{(RAC + 1)PCI_g}{PCI_f} \quad (18)$$

### 2.3.3 Sistema de limpieza para el gas combustible

La limpieza de los gases es una de las partes más relevantes dentro del sistema de gasificación. Como se produce una combustión incompleta, el gas producido puede tener un alto contenido de alquitranes, incombustos y partículas, que deben ser extraídos para que el gas esté suficientemente limpio para ser empleado en la aplicación aguas abajo. Existen varios tipos de sistemas y equipos para lograr limpiar el gas, pero de modo general solo se detallarán los más comunes: sistema de limpieza seco y húmedo.

#### 2.3.3.1 Tipo de limpieza en seco

Este tipo de sistema busca principalmente la captura de partículas más grandes, además de capturar el alquitrán de forma condensada. Los equipos principales para este proceso son el ciclón y diferentes tipos de filtros, ambos complementarios. En el caso del ciclón, por medio de la fuerza centrífuga, las partículas se adhieren a las paredes, para luego ser arrastradas hacia la parte inferior. En el caso de los filtros, están diseñados para la retención de partículas no separadas en el ciclón. Aunque se cuente con estos dos tipos de sistemas, generalmente se necesita de un tercer sistema para completar la eliminación del alquitrán. (Valderrama Rios et al., 2018)

### 2.3.3.2 Tipo de limpieza por lavado

La limpieza por lavado se fundamenta en la circulación del gas de gasificación en un medio acuoso, ya que el alquitrán es una mezcla de varios compuestos orgánicos que son solubles en este tipo de fluidos. Un sistema de limpieza por lavado eficiente es el OLGA (acrónimo Holandés para lavado de gases en base de aceite), método que utiliza aceite como fluido de limpieza; además que cuenta con la ventaja de eliminar y reutilizar elementos deseados del alquitrán (Valderrama Rios et al., 2018). En la Tabla 5 se muestra una comparación entre los sistemas mencionados anteriormente.

Tabla 5. Comparación entre los distintos tipos de limpiadores de gases. [Fuente: (Valderrama Rios et al., 2018)].

Equipo	Ventajas	Inconvenientes
Ciclón	Costo bajo	Bajo rendimiento en partículas pesadas
	Funcionamiento a altas temperaturas	Altos gastos de explotación
	Bajo mantenimiento	
Filtro	Funcionamiento a altas temperaturas	Costo elevado
OLGA	Eficaz eliminando alquitrán	Coste elevado
		No asegura eliminar PAHs pesados
Lavadores	Mantenimiento bajo	Alto potencial de corrosión
	Diseño simple	Protección de solidificación
	Enfriamiento de los gases	Tratamiento de agua y sólido

### 2.3.3.3 Tipo de limpieza por plasma

Otro tipo de limpieza de gases de gasificación es por medio de plasma. El proceso de limpieza, a grandes rasgos, es similar a la gasificación por medio de plasmas. Se realiza un crackeo de los alquitranes debido a los procesos físicos y químicos involucrados. Esto conlleva a la producción de syngas al final del proceso de limpieza. Para la limpieza por medio de plasma se distingue dos tipos de plasmas: térmico y no térmico. (Saleem et al., 2020)

En el caso del plasma térmico la temperatura del gas es elevada, provocando que las partículas neutras y cargadas estén en equilibrio térmico. Una aplicación de este sistema es un estudio realizado en la República de Corea (Cho et al., 2015), donde se obtuvo que el rendimiento de monóxido de carbono y la molécula de hidrógeno aumenta en comparación a utilizar otros métodos de limpieza. Sin embargo, para limpiar grandes volúmenes de gases, se necesita una gran cantidad de energía, lo que implica a un alto costo económico. (Saleem et al., 2020)

El plasma no térmico es un proceso que ocurre a baja potencia, lo que produce una baja temperatura en el gas, pero con temperaturas en los electrones del orden de  $10^4 - 10^5$  K. Gracias a esta alta temperatura en los electrones pueden ocurrir reacciones termodinámicamente desfavorables. En comparación con el plasma térmico, el plasma no térmico consume una menor cantidad de energía para producir un rendimiento comparable de  $H_2$ . Algunos de los plasmas no térmicos más comunes son generados por descarga de barrera dieléctrica, radiofrecuencia y microondas. (Saleem et al., 2020)

### 2.3.4 Agentes gasificantes

El agente gasificante es el encargado de la oxidación. Se pueden utilizar distintos tipos de agentes gasificantes. La elección de éste incidirá tendrá consecuencia directa en la composición final del gas, su poder calorífico, etc. En el caso de utilizar aire como agente gasificante repercute en disminuir el poder calorífico del gas de gasificación, esto debido a la alta concentración de  $N_2$ . El vapor de agua como agente gasificante aumenta la concentración de  $H_2$  (aproximadamente 45%) y de CO

(aproximadamente 25%), lo que conlleva a un gas con contenido energético elevado (Dincer & Zamfirescu, 2016). En la Tabla 6 se detalla el nombre del gas en función de su poder calorífico y el agente gasificante empleado.

Tabla 6. Agente gasificante y el gas que genera. [Fuente: (Dincer & Zamfirescu, 2016)].

Agente gasificante	Gas generado	Poder calorífico [MJ/Nm³]
Aire	Pobre	4 – 6
Oxígeno	Medio	10 – 15
Vapor de agua	Medio	8 – 10
Hidrógeno	Alto	40

## 2.4 Caracterización de los RSU

Existen varias definiciones para los RSU, las cuales dependen del sector geográfico donde se utilice el término. Según la OECD, los RSU corresponden a los residuos recogidos y tratados por o para las municipalidades, donde su alcance va desde residuos domiciliarios, relacionados con el comercio, residuos de oficina, pequeñas industrias, basura de la calle, como también desechos de jardines y sectores relacionados. (OECD, 2020)

En relación con el caso nacional, según datos de la *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD, 2020), durante el 2016 Chile generó en promedio alrededor de 411,6 kg de residuos per cápita, lo que se traduce a 1,13 kg de basura por persona al día. El volumen de generación de residuos municipales promedio, para los países miembros de la OECD es de 522,3 kg, el caso de Chile se encuentra 21,2% por debajo del promedio de la OECD; sin embargo, la tendencia de estos países es ir a la baja en la generación de residuos y el caso nacional, por el contrario, es ir al alza. En la Figura 4 se ilustra un gráfico detallando estas tendencias, donde la línea de color rojo es Chile y la negra el promedio de los países miembros de la OECD.

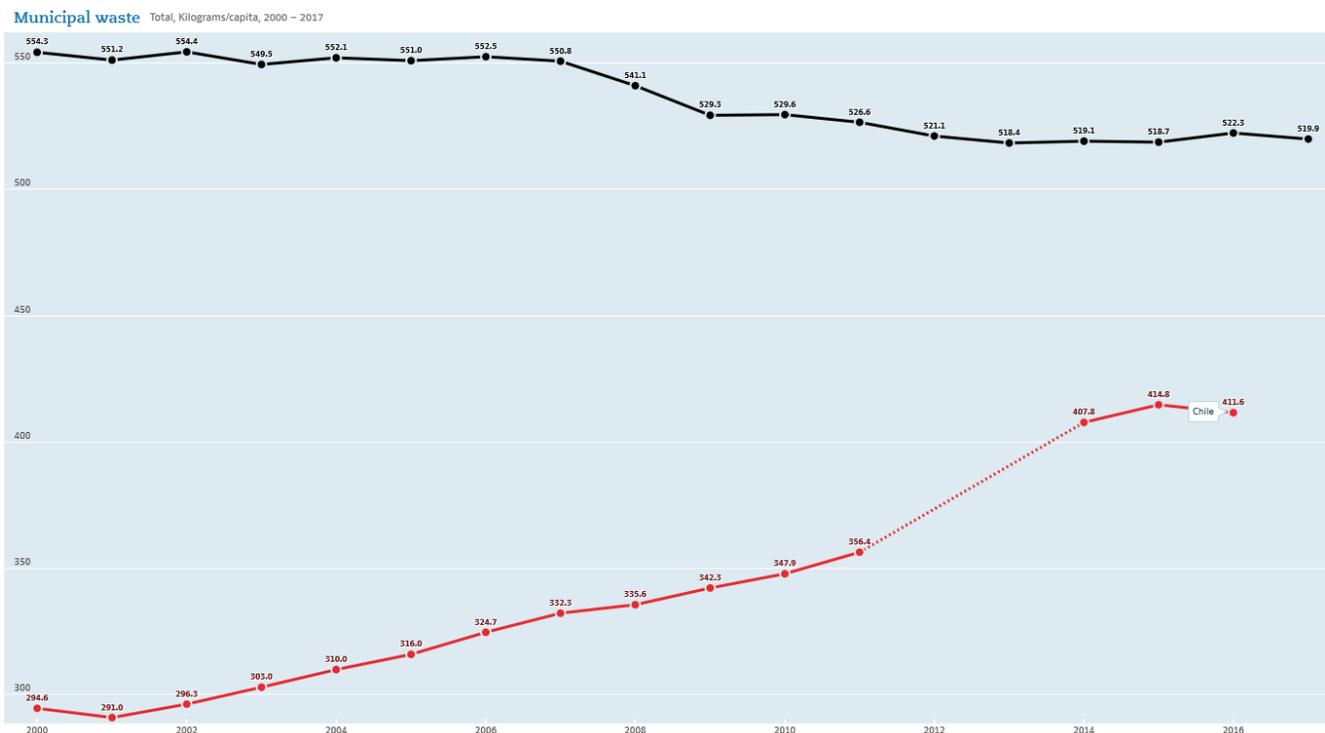


Figura 4. Generación de residuos municipales en Chile y el promedio en la OECD. [Fuente: (OECD, 2020)].

El manejo de los residuos domiciliarios es variado en los distintos países, por ejemplo, el promedio de la OECD, 44% de los residuos va a parar a un vertedero, 34% de los residuos se reciclan, un 20% se incinera para valorizarlo energéticamente, mientras el 2% se incinera sin aprovechamiento energético. En el caso de Chile el 99% de los residuos son enviados a los vertederos y solo el 1% se recicla (OECD, 2015). Al comparar ambas situaciones se ve que Chile está atrasado en el manejo de los residuos, lo cual se podría solucionar mejorando o implementando nuevas políticas públicas sobre la materia.

Las tecnologías para el aprovechamiento energético de los residuos son aplicadas principalmente en los países de la OECD, siendo Dinamarca y Suecia los que más recurren a esta alternativa, países donde más del 50% de los residuos se destina para este fin (OECD, 2015). Para evaluar la viabilidad tecnológica de la aplicación de esta tecnología en Chile se debe conocer la composición media de los RSU generados en el país, en base a la información levantada.

#### 2.4.1 Valorización energética de los RSU

Como se menciona con anterioridad, otra manera para el manejo de los RSU es su valorización energética. En la actualidad existen varias tecnologías que utilizan los RSU como combustible, por ejemplo, algunas son: la incineración (combustión), digestión, pirolisis, gasificación y gasificación por plasma. En el caso de la digestión su uso es más común en los residuos orgánicos en la generación de biogás y las otras aplicaciones para combustibles en general (Watkins & McKendry, 2014b). Como ejemplo, en Japón las plantas de gasificación de RSU ubicadas en Nagasaki y Toyohashi producen una potencia eléctrica de 8 y 8,7 MW respectivamente. (Arena, 2012)

Los impactos negativos al ecosistema son variados, ya que cada tecnología genera distintos daños al medio ambiente. En la Tabla 7 se muestra un resumen de los impactos negativos de algunas de las tecnologías mencionadas ya descritas.

Tabla 7. Efectos negativos en el ecosistema al aplicar distintas tecnologías de valorización energética de RSU. [Fuente: (Watkins & McKendry, 2014a)].

Proceso	Impacto en el Aire	Impacto en el agua	Impacto en el suelo
Incineración	Emisión: $NO_x$ , $SO_x$ , $HC$ , $HCl$	Depende del sistema de limpieza para la polución	Disposición del combustible en el vertedero y disposición de la ceniza producida
Gasificación	Emisión: $NO_x$ , $SO_x$ , $HC$ , $HCl$	Depende del sistema de limpieza para la polución del gas producido	Disposición del combustible en el vertedero y disposición de la ceniza producida
Gasificación por plasma	Emisión: $NO_x$ , $SO_x$ , $HC$ , $HCl$	Depende del sistema de limpieza para la polución del gas producido	Disposición del combustible en el vertedero y disposición de la escoria producida
Digestión	Fuga de olores Emisión de $CH_4$	En la digestión húmeda se produce un biofertilizante	Abono orgánico (CLO)

Como se indica en la Tabla 7 la incineración y la gasificación comportan impactos al medio ambiente, sin embargo, como se indica en (Watkins & McKendry, 2014a) los impactos en las emisiones y la polución son menores en la gasificación. Además, se debe tener en consideración las tecnologías de limpieza de gases para cada proceso.

### 2.4.2 Composición de los RSU en Chile

La composición de los RSU varía por zona geográfica y la estación en la que se encuentre. En el caso de Chile, se tiene un estudio hecho por la CONAMA (institución que posteriormente fue remplazada por el Ministerio del Medio Ambiente) en el 2005, donde se analiza la composición de los residuos urbanos en la región metropolitana (CONAMA, 2006). En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos en el estudio desarrollado el 2005 por la CONAMA.

Tabla 8. Composición de los residuos domiciliarios en la región metropolitana en el 2005. [Fuente: (CONAMA, 2006)].

<b>Categoría</b>	<b>% en peso/peso</b>
Materia orgánica	49,60
Papel y cartón	11,82
Plásticos	9,74
Escoria, cenizas y lozas	6,30
Vidrios	3,5
Textiles	1,87
Metales	1,59
Huesos	0,59
Otros	14,91

En el estudio realizado por (Neira, 2020) se indica la composición RSU en la ciudad de Concepción y su análisis elemental, los cuales se presentan en la Tabla 9 y Tabla 10, respectivamente.

Tabla 9. Composición porcentual de los RSU en Concepción. [Fuente: (Neira, 2020)].

<b>Categoría</b>	<b>% en peso/peso</b>
Materia orgánica	53
Papel y cartón	13
Plásticos	9
Metales	2
Otros	23

Tabla 10. Análisis elemental a los RSU en Concepción. [Fuente: (Neira, 2020)].

<b>Elemento</b>	<b>Contenido de RSU (%masa)</b>
Carbono	49,24
Hidrógeno	6,51
Oxígeno	36,09
Nitrógeno	1,99
Azufre	0,31
Contenido de ceniza	5,86

### 2.4.3 Caracterización de la biomasa

La biomasa se define como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, de la silvicultura y de las industrias conexas, como también la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales (Herguedas et al., 2012). La definición de biomasa es bastante amplia y por ende no es tan sencillo encasillar este tipo de combustible.

El pellet compuesto de biomasa comprimida a una alta presión puede tener diferentes diámetros y contiene un alto poder calorífico. El consumo de este tipo de combustible en Europa es masivo y además se proyecta que seguirá aumentando en el corto plazo (Atuesta & Vargas, 2015). El consumo de pellets en Chile se ha incrementado sustancialmente en los últimos años, principalmente para su uso en la calefacción doméstica.

Para los ensayos experimentales se utilizará pellets de pino. La ficha técnica de los pellets entregados por la empresa (Ecomas, 2020) es especificada en la Tabla 11, donde se presenta la caracterización física de este combustible.

Tabla 11. Características de los pellets comercializados por ECOMAS. [Fuente:(Ecomas, 2020)].

Parámetro	Resultado
Durabilidad mecánica [%]	98,5
Densidad Granel [kg/m <sup>3</sup> ]	670
Humedad [%]	6,3
Contenido ceniza 550°C [%]	0,16
Poder calorífico inferior [kWh/kg]	5,01
Finos (<3,15mm) [%]	0,2
Largo (3,15≤L≤40 mm) [%]	99
Largo (40≤L≤45 mm) [%]	0,8
Diámetro [mm]	6,0

Dentro de la Octava Región se presenta una gran industrialización del sector forestal, donde se genera una gran cantidad de residuos debido al tratamiento que tiene la madera, de los cuales ya se han caracterizados, aunque se debe tener presente las condiciones de operación y la materia prima empleada. El posterior uso de la biomasa residual es variado, un porcentaje no menor de casi un 10% se acumula o regala, por lo que aprovechar energéticamente este desecho forestal es una alternativa considerar (Orellana, 2016). La Figura 5 muestra en que se utilizan los residuos forestales.

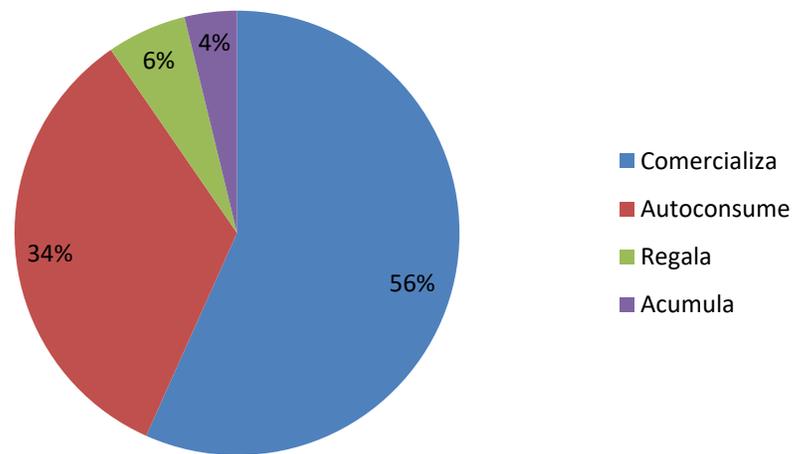


Figura 5. Destino de la biomasa residual. [Fuente:(Orellana, 2016)].

## CAPÍTULO 3

### Reactor de corriente ascendente modificado

#### 3.1 Descripción del equipo

Este capítulo contempla la descripción del gasificador de corriente ascendente modificado. El sistema de gasificación está compuesto por un reactor de corriente ascendente modificado, diseñado y construido en la Universidad de Concepción. En la Figura 6 se presenta el sistema de gasificación instalado en el laboratorio de Termofluidos.

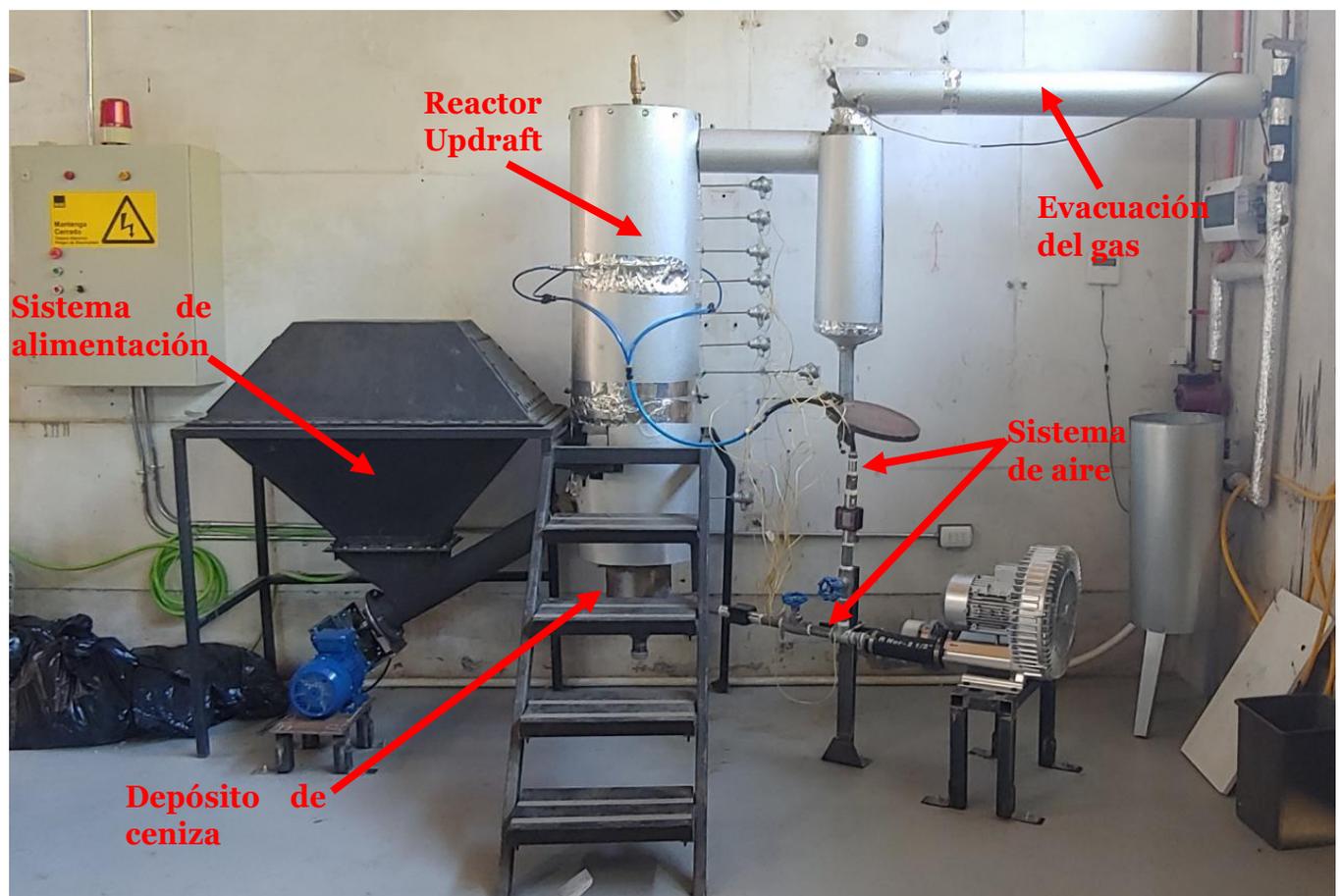


Figura 6. Sistema de gasificación instalado en el laboratorio de Termofluidos. Fecha: 01/21.

Como se muestra en la , el sistema consta de un manto que cumple la función de no exponer la aislación que rodea el reactor con el exterior. Se utiliza como aislación lana mineral de un espesor de 6,82 cm. En la parte inferior se encuentra el depósito de cenizas que está unido al cuerpo central mediante bridas apernadas. En el interior del depósito de cenizas se posiciona un tubo difusor que se encarga de inyectar el agente gasificante en el sector de la parrilla.

A una distancia de 45 cm por debajo de la salida de los gases (ver Figura 7), se encuentra la entrada secundaria de agente gasificante a través de 4 tubos soldados al cuerpo del reactor con un diámetro de

6 mm aproximadamente ( $\dot{M}_{a,2}$ ). Es importante notar que tanto la entrada principal, como la secundaria, son alimentadas de manera simultánea por aire, el cual es impulsado por un soplador ( $\dot{M}_a$ ). El flujo de agente gasificante se regula mediante válvulas de aguja en cada circuito de alimentación de aire.

En la parte superior del reactor está el tubo de salida de los gases. El gas al momento de ser evacuado pasa por el ciclón, el cual separa las partículas más pesadas. Las partículas separadas se depositan en el tambor que se encuentra en la parte inferior del ciclón, donde son acumuladas para su posterior desecho ( $\dot{M}_{ash,2}$ ).

El sistema de alimentación del gasificador está conformado por una tolva de 190 litros de capacidad, que tiene como finalidad almacenar el combustible. El paso del combustible hacia el reactor es por medio de un tornillo sin fin, impulsado por un motor eléctrico ( $\dot{M}_f$ ). El combustible es depositado en la parrilla del reactor, para que posteriormente ocurran las diferentes reacciones del proceso de gasificación. En el interior del reactor, a una distancia vertical de 50 cm hacia abajo de la entrada del sistema de alimentación, se encuentra la parrilla donde se deposita el material suministrado por el tornillo sin fin.

En la parte frontal de la estructura, como se muestra en la Figura 6, se encuentra una escalera para facilitar el acceso a la zona superior del gasificador, específicamente para que al momento de realizar los ensayos el operador pueda depositar la carga y así partir con el proceso.

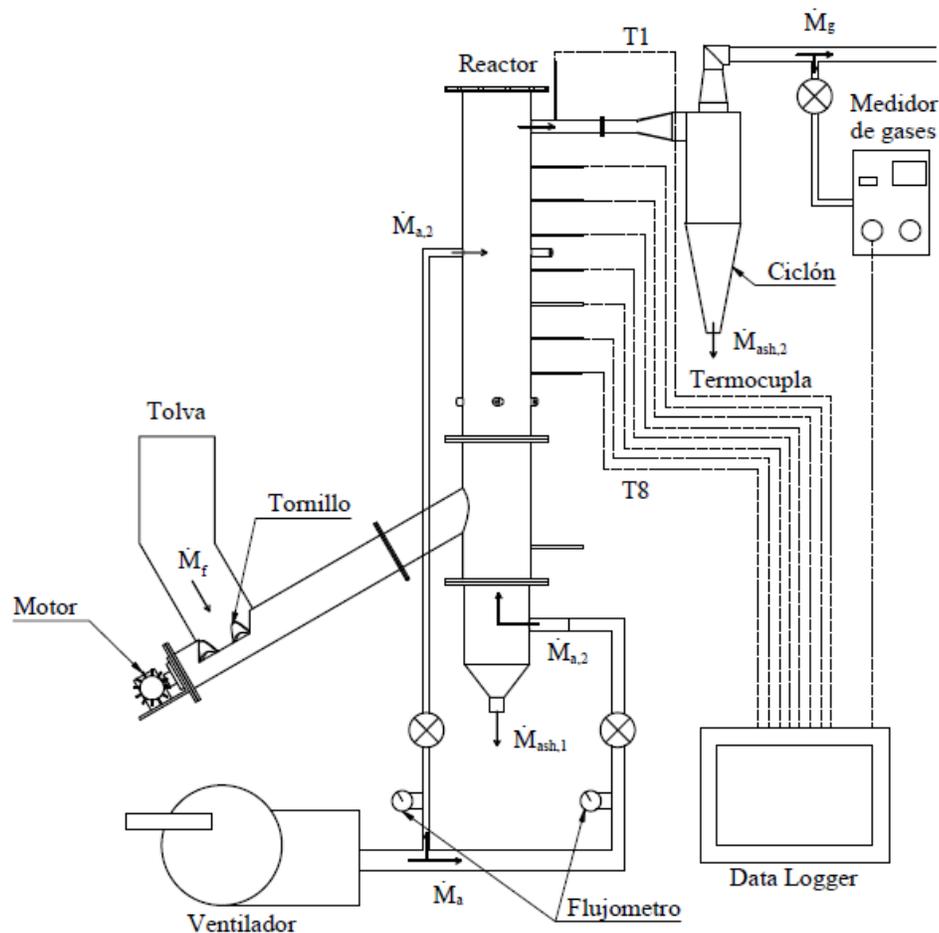


Figura 7. Flujos másicos involucrados en el banco de ensayos.

### 3.1.1 Descripción del proceso

El proceso de gasificación comienza en el sector de la tolva (1) (ver Figura 8), donde se abre la tapa del sector izquierdo y se almacena el combustible al interior de la misma hasta ocupar todo su volumen. Posteriormente el material es impulsado mediante el tornillo sin fin (2), hasta que se almacena en el sector de la parrilla (3), se pone cuidado en controlar su altura para que los ensayos sean comparables entre sí. Luego, en la zona superior, se destapa el reactor (10) y se continúa rociando alcohol al combustible, para dar lugar a la ignición o partida del proceso mediante un encendido manual. Una vez finalizada la ignición del reactor se procede al llenado del reactor hasta unos 30 cm por debajo de la zona de salida del gas combustible (4). Tras una espera de 10 minutos posterior al llenado del reactor, se espera que el sistema se estabilice y ocurra la gasificación del material. A continuación, el gas de gasificación asciende hasta el tubo de salida del reactor (4), donde posteriormente se extraen las partículas más pesadas del gas en el ciclón (5) y sigue su trayecto hasta ser expulsado a la salida del laboratorio (6). Por último, el gas generado es combustionado empleando un quemador de gas natural (7).

La entrada principal de aire se encuentra en la zona inferior del reactor (8), esto en la zona inferior de la parrilla, y luego se tiene la entrada secundaria (9) por sobre la parrilla, a través de 4 entradas. Los caudales que ingresan al gasificador son del orden de 44 a 68 lpm.

Para el almacenamiento de residuos se tienen dos depósitos de residuos, uno es el cenicero (11), ubicado en el sector inferior del reactor y un tambor debajo del ciclón (12), con la finalidad de depositar los desechos más pesados del gas de síntesis y por otro lado la acumulación de alquitranes ya condensados. La medición de los gases es mediante una sonda (13) ubicada a continuación del ciclo. En la Figura 8 se ilustra un esquema detallado del reactor.

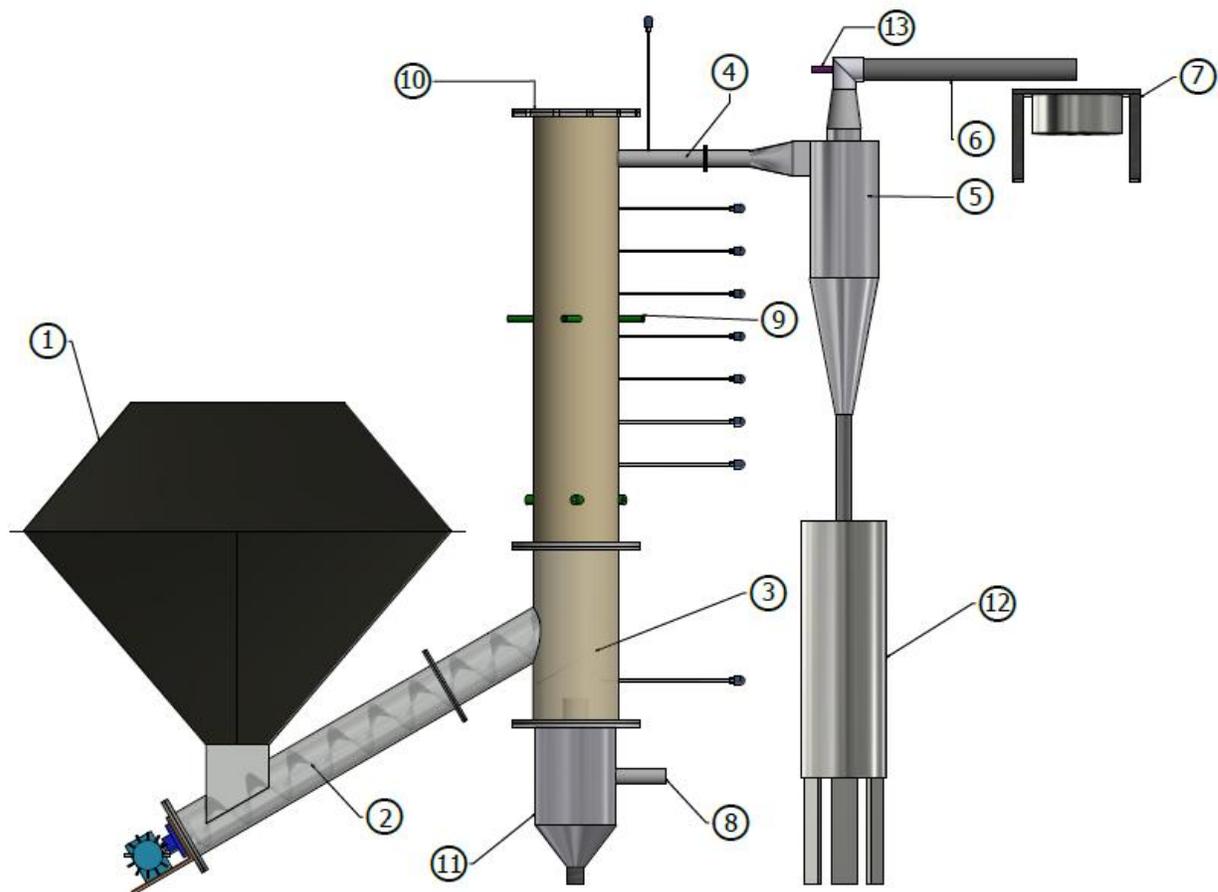


Figura 8. Esquema del gasificador instalado en el laboratorio de Termofluidos.

### 3.2 Reactor

### 3.2.1 Cuerpo principal del reactor

El cuerpo central del reactor tiene una altura de 1,5 m y un diámetro exterior de 200 mm con un espesor de pared de 10 mm.

Para facilitar la mantención o una posible intervención a la parrilla se le realizó un corte al tubo justo a unos 20 cm sobre el sector donde se ubica la parrilla, y estas dos nuevas secciones se unen mediante bridas perforadas. Para evitar posibles fugas en la unión se hace uso de una empaquetadura de grafito. Por otro lado, en la parte inferior del reactor se sueldan 3 aletas a 120° entre sí, para sujetar el reactor a la estructura del gasificador.

Como este equipo fue diseñado para observar y medir una serie de parámetros del gasificador con el objetivo de estudiar el proceso de gasificación, se debe tener en consideración el perfil de temperatura que se tiene a lo largo de todo el reactor. Para esto se instalan ocho termocuplas separadas a 10 cm entre sí.

El cuerpo del reactor está envuelto por aislación de lana mineral, la cual es utilizada para que el gasificador tenga un alto rendimiento térmico, como también para evitar pérdidas de calor al exterior. El calor generado al interior del reactor se utiliza para realizar los procesos endotérmicos que sintetizan algunos componentes del combustible gaseoso desarrollado en el gasificador. El uso de la aislación contribuye a la seguridad del operador, esto con el fin de impedir quemaduras u otros tipos de accidentes al aproximarse al reactor. El aislante es finalmente protegido por una lámina de acero. Mayores detalles sobre el dimensionamiento, consideraciones de diseño del reactor y materiales aislantes pueden ser encontrados en (Ortiz, 2019).

En la tapa del reactor se encuentra instalada una válvula de seguridad, la cual se acciona en el instante que la presión interior sea superior a 2 kgf/cm<sup>2</sup> manométricos.

### 3.2.2 Parrilla

La parrilla es un elemento que es sometido a altas temperaturas, es por esto que en el diseño se tiene que considerar su dilatación térmica. Por consideración de diseño la parrilla se inclina 30° con respecto a la horizontal. En cuanto a la plancha se decide utilizar una plancha de 6 mm de espesor con perforaciones perpendiculares al plano de la elipse formada, con el fin que la fabricación de la misma no sea compleja al tratarse de un elemento relativamente delgado y así garantizar una correcta repartición de aire al interior del reactor. La distribución de agujeros utilizados es formada por una distribución de triángulos equiláteros (distribución *honeycomb*) de distancia entre centros de 17 mm y diámetro de 4mm. En la Figura 9 se muestra la distribución de agujeros empleada utilizado en el software Autodesk Inventor.

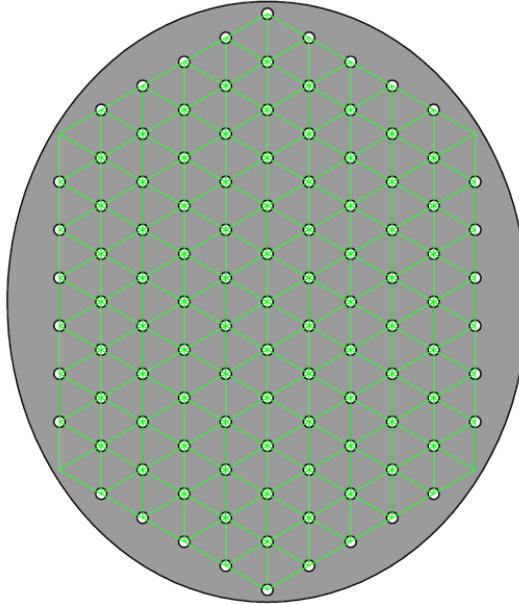


Figura 9. Distribución de agujeros en la parrilla.

### 3.2.3 Depósito de cenizas

Dentro del reactor, durante el proceso oxidación, se genera ceniza. Este residuo debe ser almacenado de forma continua, para no interrumpir la operación del gasificador, por lo que es necesario diseñar un dispositivo que tenga un volumen suficiente para almacenar esta ceniza. Este reservorio debe tener una tapa hermética que permita retirar esta ceniza a medida que sea necesario.

Este reservorio fue dimensionado considerando un flujo de 12,38 kg/h de ceniza. (Ortiz, 2019)

La fabricación de este elemento es de manera similar al ciclón, tiene de un espesor de pared de 0,8 mm y tiene dos secciones, una es de forma cilíndrica con un diámetro de 180 mm con una altura de 230 mm y luego se realiza una reducción de área a la sección de forma cónica, con una altura de 100 mm. Además, en el sector del cenicero se introdujo un tubo difusor de aire, el cual está diseñado para lograr una distribución homogénea del agente oxidante suministrado en el sector de la parrilla del gasificador.

## 3.3 Sistema de salida de los gases

### 3.3.1 Ciclón

El ciclón es el equipo encargado de separar las partículas del gas generado por la gasificación por medio de la fuerza centrífuga. El funcionamiento de este equipo se basa en la diferencia de trayectorias, donde la trayectoria curva que toma el gas por la geometría que tiene el ciclón, conlleva que las partículas de mayor peso impactan con las paredes del mismo. La ventaja de este tipo de equipo es que puede operar a altas temperaturas (alrededor de los 1000 °C) (Perry, 1984). Una vez finalizado el proceso de gasificación, el material particulado extraído del gas es depositado en un tambor cerrado ubicado en la parte inferior del ciclón, el cual tiene que ser vaciado a medida que se vaya llenando.

El diseño de este equipo se basó en el manual del ingeniero químico (Perry, 1984), el cual recomienda una velocidad de entrada al ciclón entre 6 a 21 m/s para equipos que operen a presiones cercanas a la atmosférica, en este caso se considera una velocidad de 15 m/s. Luego, se puede determinar la superficie que necesita la entrada del ciclón, aplicando la ecuación de continuidad. La forma geométrica de la sección, por facilidad de construcción, es una entrada rectangular de dimensiones 40 x 80 mm. En la Figura 10 se ilustran las dimensiones a tener en consideración y en la Tabla 12 se

muestra estas dimensiones en función al diámetro mayor del ciclón.

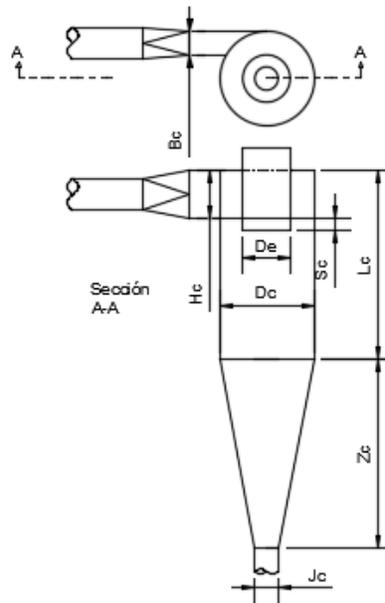


Figura 10. Parámetros de diseño del ciclón. [Fuente: (Perry, 1984)].

Tabla 12. Dimensiones del ciclón.

Parámetro de diseño	Parámetro en función del diámetro mayor	Dimensión final [mm]
$B_c$	$D_c/4$	40
$D_e$	$D_c/2$	80
$H_c$	$D_c/2$	80
$L_c$	$2D_c$	320
$S_c$	$D_c/8$	20
$Z_c$	$2D_c$	320
$J_c$	$D_c/4$	40
$D_c$	-	160

Aparte de las dimensiones mencionadas en la Tabla 12, se debe agregar que el espesor de pared es de 8 mm. El material utilizado para su fabricación es acero comercial ASTM A53. Para guiar el gas dentro del ciclón, se construye un canal helicoidal de paso igual a la altura de la garganta del equipo. En el tubo de diámetro “De” el gas limpio es evacuado del ciclón; este gas posteriormente puede ser utilizado para distintos tipos de aplicaciones energéticas o también pasar por otro tipo equipo de limpieza de gases, como por ejemplo un limpiador de gases mediante plasma generado por microondas.

### 3.3.2 Tubo de salida y quemador

Posteriormente del ciclón los gases continúan su trayecto a través de un tubo de diámetro 1½” de longitud de 1,5 m, donde finaliza su recorrido en el quemador. Para asegurar que el ciclón no se dañe, se instala el tubo de forma descendente, para que en caso de ocurrir la condensación de los gases, el condensado sea expulsado hacia el quemador y no retorne en dirección al ciclón.

Debido a que los gases de gasificación son combustibles se implementa un sistema de forma que, al salir expulsados del reactor, los gases pasan por el contacto directo de un quemador.

### 3.4 Sistema de alimentación

#### 3.4.1 Tornillo sin fin

Para el sistema de alimentación se usa un tornillo sin fin con una inclinación aproximada de  $60^\circ$  con respecto al reactor. Este equipo tiene las ventajas de ser versátil para transportar material homogéneo, ser un sistema sencillo de sellar y además que puede operar con presiones manométricas tanto positivas como negativas. De igual forma, al ser un reactor pequeño, el tornillo también sirve para transportar la materia prima desde la tolva hacia la parrilla al interior del reactor.

El tornillo está constituido por un helicoide de longitud de 760 mm fabricado con acero comercial SAE 1020 soldada a un tubo de acero comercial ASTM A53 de longitud 760 mm. Las hélices tienen un espesor de 8 mm y el paso entre las hélices igual a 110 mm, debido a consideraciones de diseños tales que el diámetro del eje debe ser aproximadamente igual al paso. El tornillo cuenta con una cantidad de 8 hélices. En la Figura 11 se ilustra el modelo 3D del tornillo sin fin desarrollado con el software Autodesk Inventor.

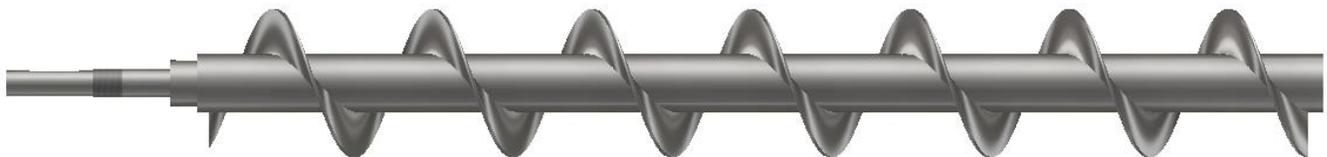


Figura 11. Tornillo sin fin alimentador.

En la sección de eje que transmitirá la potencia al tornillo, se realiza una reducción de diámetro a 28 mm por un largo de 120 mm, donde en el cambio de sección se ubicará el rodamiento que tendrá que soportar el tornillo al interior del tubo exterior.

El motor empleado para accionar el tornillo es un motor trifásico de 4 HP conectado a un reductor que hace girar el tornillo a 70 revoluciones por minuto, el cual transmite el giro mediante una unión con chaveta.

#### 3.4.2 Tolva

La tolva es el dispositivo encargado de almacenar el combustible para luego ser transportado por el tornillo sin fin. Cuando el gasificador entra a un régimen estacionario, el volumen de la tolva tiene que ser tal que deba suplir la demanda del combustible que tendrá el reactor, por lo que debe tener un volumen mínimo para que pueda completar esta necesidad. También se tiene en consideración que este elemento debe ser hermético, de forma tal de imposibilitar la entrada de oxígeno al reactor, originando la oxidación completa del combustible. La salida de los gases puede ser bloqueada por la condensación de los alquitranes o gases condensables. Por seguridad, para de que el gas combustible no retorne a la tolva y escape por la misma, contaminando el entorno del reactor, ésta debe poseer la característica de hermeticidad. En la Figura 12 se muestra un dibujo en 3D de la tolva con la estructura que la soporta. El dibujo es desarrollado en el software Autodesk Inventor.

El diseño de la tolva consta de dimensiones 1000 x 500 mm en la sección más ancha y para la salida del combustible se tiene una sección de 300 x 190 mm ubicada a 300 mm por debajo de la parte más amplia. En la zona superior se fabrica una estructura cóncava hacia arriba con una sección final 500 x 250 mm con una altura de 300 mm, esto con el fin de generar dos puertas laterales de carga trapezoidales, las cuales irán apernadas con la tolva. Con el motivo de garantizar la hermeticidad del equipo, se adhiere empaquetadura a las tapas. La descarga del combustible, de la tolva hacia el conducto alimentador, es mediante una garganta adaptada por la inclinación que se tiene del tubo

alimentador. El volumen del equipo es aproximadamente de  $0,1 \text{ m}^3$  para su parte inferior y  $0,088 \text{ m}^3$  en la superior, lo cual, sumando el volumen de la garganta, corresponde a un total de  $0,19 \text{ m}^3$ .

En la garganta que une la tolva con el tornillo sin fin se incorpora un dosificador de combustible, el cual tiene como finalidad no obstruir el sistema de alimentación. Este sistema de dosificación es operado de manera manual en la parte frontal de la tolva.

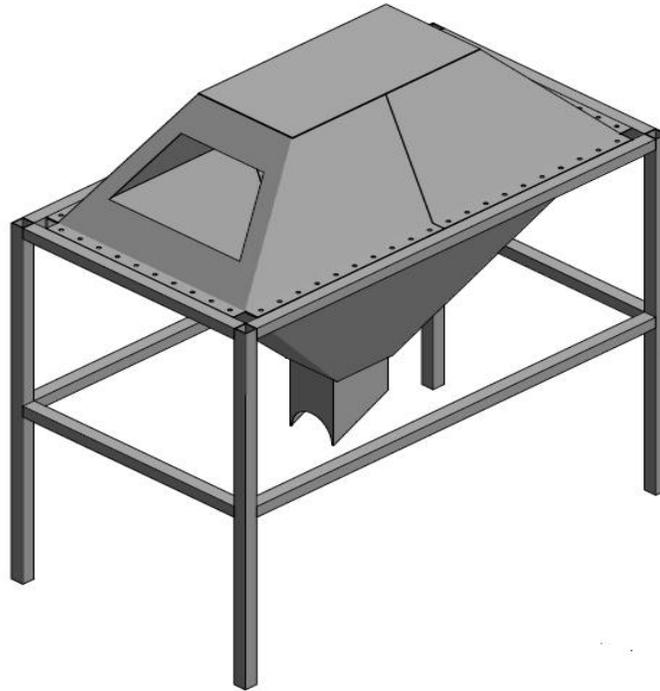


Figura 12. Tolva de alimentación.

### 3.5 Sistema de aire

El agente de gasificación que se emplea el gasificador instalado en el laboratorio de Termofluidos es el aire, el cual es suministrado mediante un soplador. La operación del equipo requiere de un caudal de aire de aproximadamente  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ , con el fin de asegurar la gasificación de los combustibles que se utilizarán en las experiencias. Como se menciona con anterioridad, las entradas para el flujo de aire al interior del reactor son dos; la principal ubicada en el sector del depósito de las cenizas y la secundaria o complementaria, la cual está ubicada en la parte superior a la parrilla, aproximadamente  $35 \text{ cm}$  por debajo de la salida de los gases, esto hace posible que se potencie la zona de combustión.

El soplador utilizado consta de una potencia de  $2,2 \text{ kW}$  de potencia. En la sección donde el soplador succiona aire se instala un filtro para polvo, el cual tiene como finalidad impedir que cualquier tipo de partícula sólida dañe el equipo.

### 3.6 Sistema de control

El sistema de control del gasificador *Updraft* modificado, para el alcance de este estudio, en su mayor parte es manual, tanto en el sistema de alimentación de combustible mediante el tornillo sin fin, y además el sistema de control del suministro de aire también es manual, donde se puede regular el flujo de aire mediante válvulas. Para el sistema de alimentación de combustible, al motor del tornillo alimentador se le instala un variador de frecuencias con el fin de controlar el flujo de combustible que está siendo alimentado hacia el reactor.

El análisis de datos, en el caso de las termocuplas, se desarrolla un programa en código Matlab, el cual al insertar las temperaturas registradas en el sistema adquisición de datos (*datalogger*), se entrega

una gráfica de temperatura vs tiempo y una tabla con los valores máximos de temperatura para cada termocupla en su respectivo tiempo de operación.

Además, posteriormente, se implementará un sistema de alimentación automatizado, que funcione censando el combustible al interior del reactor.

Igualmente, para el sistema de suministro de aire, se implementará un sistema automatizado de inyección de aire empleando válvulas de control, esto para regular automáticamente el flujo de aire a medida que la temperatura al interior del reactor varíe, a fin de lograr una condición óptima de gasificación.

### 3.7 Sistema de medición

El sistema de medición del gasificador consta de varios instrumentos, destinados para medir la temperatura al interior del reactor, el flujo de aire que ingresa al reactor, la cantidad de masa que entra al reactor y la concentración de los gases.

La temperatura al interior del reactor se mide para obtener el perfil de temperaturas a dentro del gasificador y así distinguir las zonas de gasificación. Para la medición de temperatura se utilizan nueve termocuplas tipo K, las cuales cuentan con un error instrumental de  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ . Estos instrumentos tienen una precisión de  $1^{\circ}\text{C}$  y alcanzan una temperatura máxima de operación de  $1050^{\circ}\text{C}$ . Las termocuplas están ubicadas a lo largo de todo el reactor, siete termocuplas se ubican en la zona superior de la parrilla, la octava por debajo de la parrilla y la novena en el tubo de salida antes de llegar al ciclón. En la zona superior, se sitúa la primera termocupla, a unos 10 cm por debajo del tubo de salida de los gases. La separación que tiene cada termocupla es también de aproximadamente 10 cm, esto con respecto a su centro. La termocupla que se encuentra en la zona inferior de la parrilla se ubica a unos 15 cm debajo de la misma. En el tubo de salida de los gases, a unos aproximadamente 10 cm del cuerpo central del reactor, se ubica la novena termocupla. Todas las termocuplas quedan expuestas unos 4 cm al interior del reactor, esto para prevenir cualquier tipo de falla por impacto que se tenga debido a la carga de combustible y así prolongar la vida útil de la instrumentación. Las termocuplas se conectan a un *datalogger*, el cual tiene la función de recopilar toda esta información y graficar las mediciones registradas por el equipo.

La medición de aire es por medio de dos flujómetros, los cuales se ubican en el cauce principal y el secundario. La medición entregada por el flujómetro es la cantidad de volumen por minutos que circula por el instrumento. La graduación del instrumento es en litros, cuenta con una precisión de 0,1 litros y por especificaciones técnicas el instrumento opera en un rango de 10 a  $100\text{ l/min}$ . La exactitud del instrumento es de  $\pm 1\%$ .

Para determinar la cantidad de combustible que ingresa al sistema se utiliza una balanza que posee una precisión de 1 gramo y tiene un rango máximo de 100 kg. La balanza cuenta con una exactitud de  $\pm 0,05\%$ . Para estimar el flujo de combustible, en primer lugar, se mide la cantidad de combustible que ingreso al reactor y se analiza con el tiempo total que dura el experimento. Esto se puede determinar sabiendo en que instante se extingue la llama.

En el caso de la medición de la composición de los gases de salida se utiliza un analizador de gases manual portátil. Este posee de una sonda, que es introducida en el tubo de salida de los gases (sector antes de llegar al quemador). La ventaja de este analizador es que está diseñado para procesos de gasificación, lo que permite medir la concentración de alquitranes. Los elementos que puede detectar son:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  (alquitranes) y  $\text{O}_2$ . La resolución del equipo es de  $0,01\%$  y tiene un error instrumental de  $\pm 1\%$ . En la Tabla 13 se muestra el rango de medición que posee el instrumento.

Tabla 13. Rango de medición del analizador de gases Portable Syngas Analyser SYN-600. [Fuente: (TIANYU, 2020)].

<b>Elemento</b>	<b>Rango [%]</b>	<b>Precisión</b>
$CO$	0 - 100	$\leq 2\%$
$CO_2$	0 - 100	$\leq 2\%$
$CH_4$	0 - 100	$\leq 2\%$
$H_2$	0 - 100	$\leq 3\%$
$C_nH_m$	0 - 10	$\leq 3\%$
$O_2$	0 - 25	$\leq 2\%$

## CAPÍTULO 4

### Resultados experimentales

#### 4.1 Descripción de los RSU

Como se menciona en la sección 1.4, se realizan dos tipos de probetas, cuyas dimensiones son de 60 mm de diámetro y 100 mm de largo. Estos elementos son elaborados en una prensa mediante una matriz donde se comprime el residuo y se adapta a la forma de la matriz. Para asegurar que las probetas no se desacoplen, se utiliza agua como aglutinante.

Las probetas realizadas son dos: una es conformada con un 77% de cartón y 23% de plástico (PEBD) y la otra está constituida por materia orgánica. Debido a que el gasificador Updraft solo admite un máximo de 50%, las probetas de materia orgánica se le extrae humedad mediante un horno. La humedad extraída en las probetas de materia orgánica oscila entre 50% a 80%. Las probetas de materia orgánica están formadas por: cascara de tomate, papa, huevo, sandia, porotos, entre otros. En la Figura 13 se muestra una imagen de las probetas generadas.

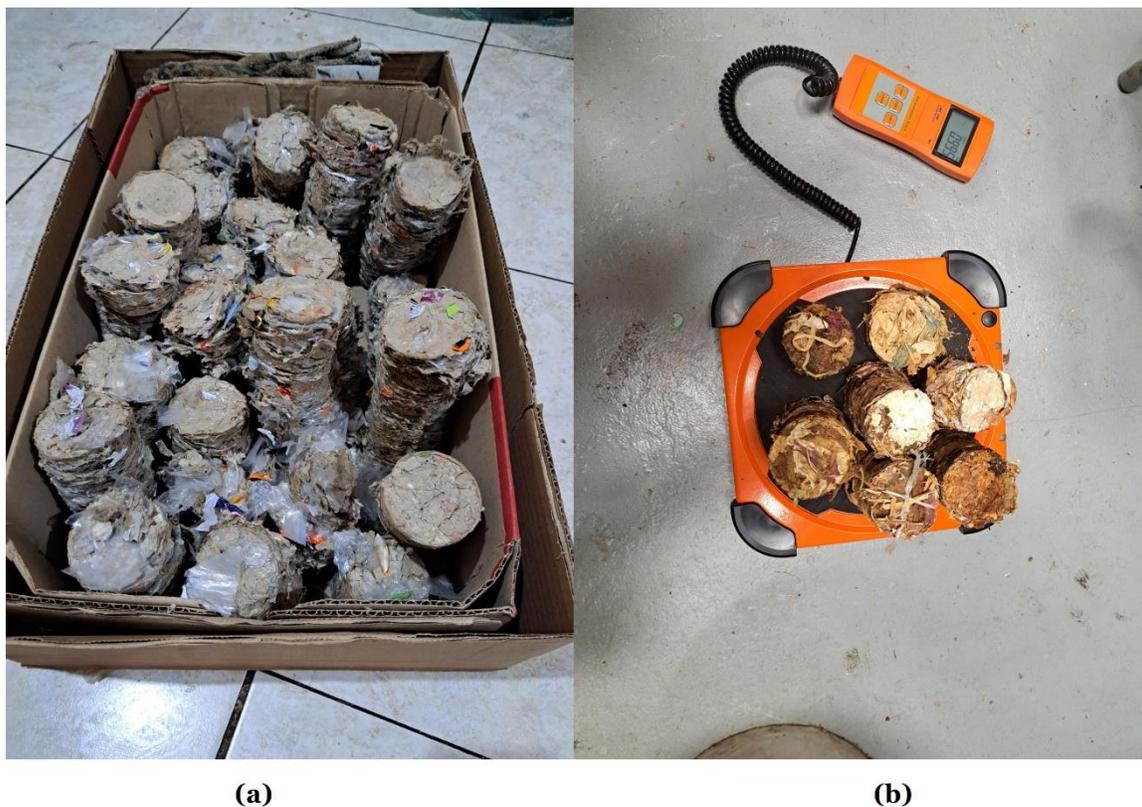


Figura 13. (a) Probetas de cartón y plástico. (b) Probetas de materia orgánica.

## 4.2 Resultados experimentales

Se realizaron siete ensayos experimentales utilizando RSU como combustibles y un ensayo “0” donde se utilizó pellet como combustible. Las experiencias que se dispuso de RSU se distribuyó como 2 experimentos con probetas de cartón y plástico, junto con otros residuos tales como: textiles y goma, además de pellet, y el resto de los experimentos fue empleando los dos tipos de probetas más pellet. En el caso del experimento “0”, se realiza esta experiencia con el fin de analizar el comportamiento del reactor al implementar la biomasa como combustible y para tener un medio de comparación en el funcionamiento del reactor al utilizar estos dos tipos de combustibles. En la Tabla 14 se presenta la cantidad de cada residuo implementado en los experimentos.

En la sección de Anexos se muestra las mediciones realizadas en cada experimento con los respectivos datos de entrada correspondientes.

Tabla 14. Masa evaluada en cada experiencia.

Parámetro [kg]	Experiencia							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Masa de pellet en zona inferior del reactor	17.25	7.58	3.00	3.37	3.30	3.30	3.30	3.30
Masa de pellet en zona superior del reactor	0.00	3.32	3.13	6.0	3.00	3.00	3.00	3.00
Masa de materia orgánica	0.00	0.00	0.00	1.69	2.00	2.00	2.00	2.00
Masa de cartón	0.00	1.16	1.54	0.41	0.49	0.49	0.49	0.49
Masa de plástico	0.00	0.35	0.45	0.19	0.27	0.27	0.27	0.27
Masa de textiles	0.00	0.16	0.21	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08
Masa de residuos de madera	0.00	0.00	0.00	0.11	0.14	0.14	0.14	0.14
Masa de goma	0.00	7.58	0.37	0.11	0.14	0.14	0.14	0.14
Total	17.25	3.32	8.70	11.94	9.42	9.42	9.42	9.42

## 4.3 Análisis de resultados

En el experimento 0, se obtiene un valor de PCI promedio de 4,17 MJ/Nm<sup>3</sup>, con un máximo de 4,29 MJ/Nm<sup>3</sup> y un valor mínimo de 4,17 MJ/Nm<sup>3</sup>, valores similares a los reportados en (Işık et al., 2023) y (Wang et al., 2023). La temperatura más alta registrada en este experimento es de 923,8 °C y se obtiene en la Termocupla 5 (ver Figura 14). El resultado de esta experiencia se emplea posteriormente para comparar la gasificación de los RSU vs la gasificación del pellet de biomasa.

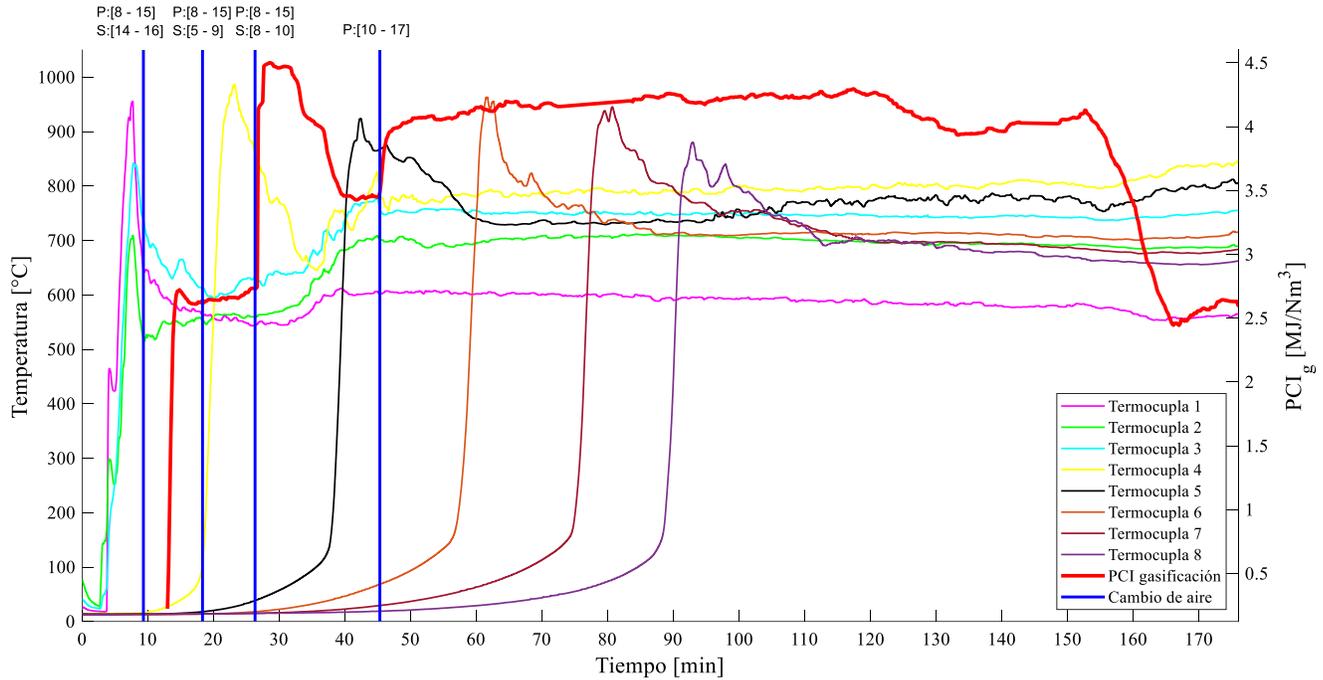


Figura 14. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento o.

El comportamiento del PCI generado y la temperatura al interior del reactor durante la gasificación de RSU es similar para todas las experiencias. Cuando en el frente térmico de la gasificación avanza hacia el lecho de RSU en el reactor, el PCI del gas producido experimenta una reducción lineal seguida de un periodo de estabilización breve, donde posteriormente continua con un incremento lineal cuando en el frente térmico alcanza el lecho de los pellets de biomasa.

La conducta del PCI es causada por la reducción del H<sub>2</sub> y CO en el gas producido. Eso puede ser causado por la combustión del CO, aumentado la concentración de CO (reacción (19)) y consecuentemente reduciendo la velocidad de la reacción Water-gas shift (reacción (20)).



En el caso del experimento 4 (presentado en la Figura 15), al momento de la gasificación de RSU la temperatura más alta alcanzada es de 692 °C y es conseguida en la termocupla 5 (ubicada sobre la entrada secundaria de aire). Al igual que las otras experiencias, las temperaturas de las termocuplas 7 y 8 suben casi al mismo tiempo, lo cual se debería, principalmente, a la naturaleza del combustible, ya que al no ser homogéneo permitiría circular más fácilmente el aire a través del combustible. En este experimento, se cierra la entrada secundaria de aire en el minuto 36, lo cual ocasiona una disminución en el aire ingresado al reactor en un 28,2%. Como se muestra en la Figura 15, el PCI del gas es estabilizado entre los 38 y 43 minutos transcurridos del experimento y se estabiliza entre los valores de 3 a 2,94 MJ/Nm<sup>3</sup>. Además, al comparar el PCI del gas generado por pellet (experimento o) con el PCI estable generado por los RSU, se obtiene una diferencia del 29,5%. La diferencia entre el contenido energético de los gases generado por pellet y RSU es observable, ya que, al momento de realizar los experimentos y se da a lugar la gasificación de los RSU, la llama ubicada en la zona de evacuación de los gases se extinguía o tenía dificultades para encender. Esta diferencia era observable y queda respaldada por los resultados expuestos en este estudio.

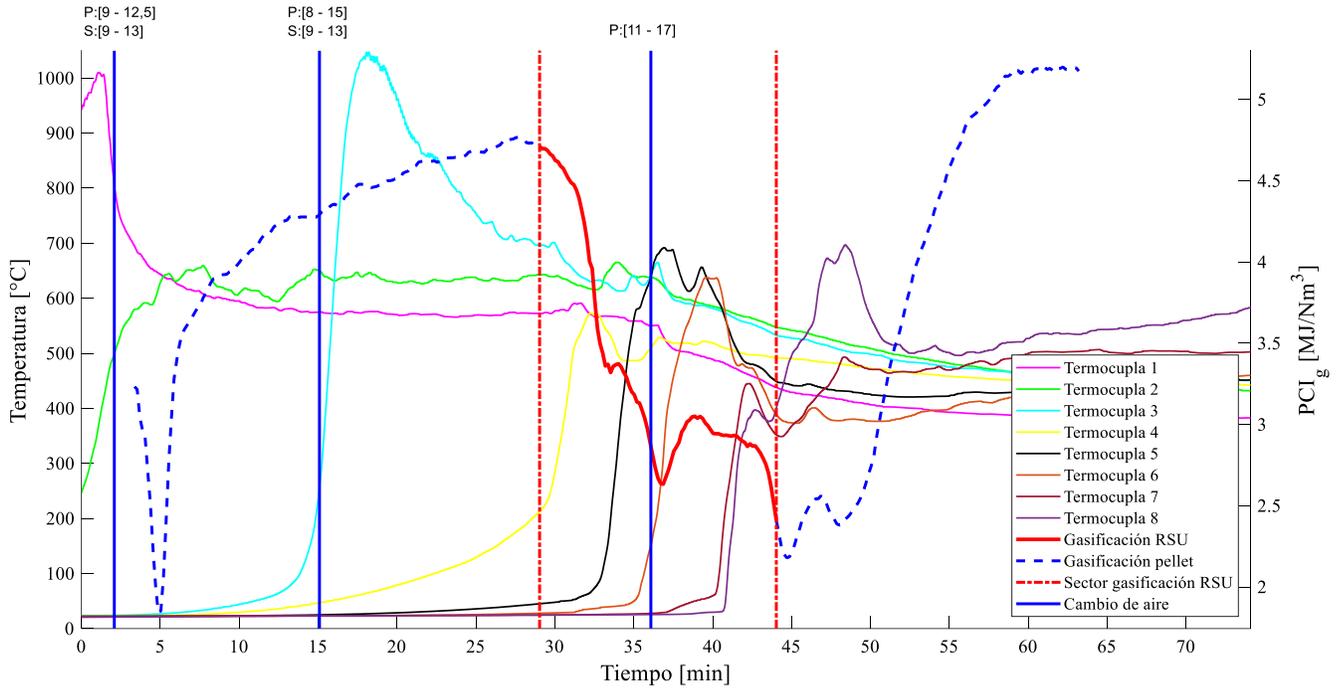


Figura 15. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 4.

En el experimento 5 (ver Figura 16) se obtiene una curva de PCI con la misma tendencia que en el experimento 4, a excepción que se realizan dos cambios de aire durante la gasificación de RSU. En el minuto 29:58 se realiza el primer cambio de aire (el cual es debido al cierre del aire secundario), donde se reduce el ingreso de aire en un 64% y posteriormente en el minuto 42:58 se aumenta el ingreso de aire en 33%. En el caso de la temperatura, como se observa en la Figura 16, en esta experiencia la temperatura más elevada también se obtiene en la termocupla 5, pero en esta ocasión con un valor de 740 °C. Por otro lado, el gas se logra estabilizar entre el minuto 38 hasta el 41 y se obtiene un gas con un rango de PCI de 2,58 a 2,52 MJ/Nm<sup>3</sup>, esto es un 39,4% menos del PCI generado por el pellet (experimento 0).

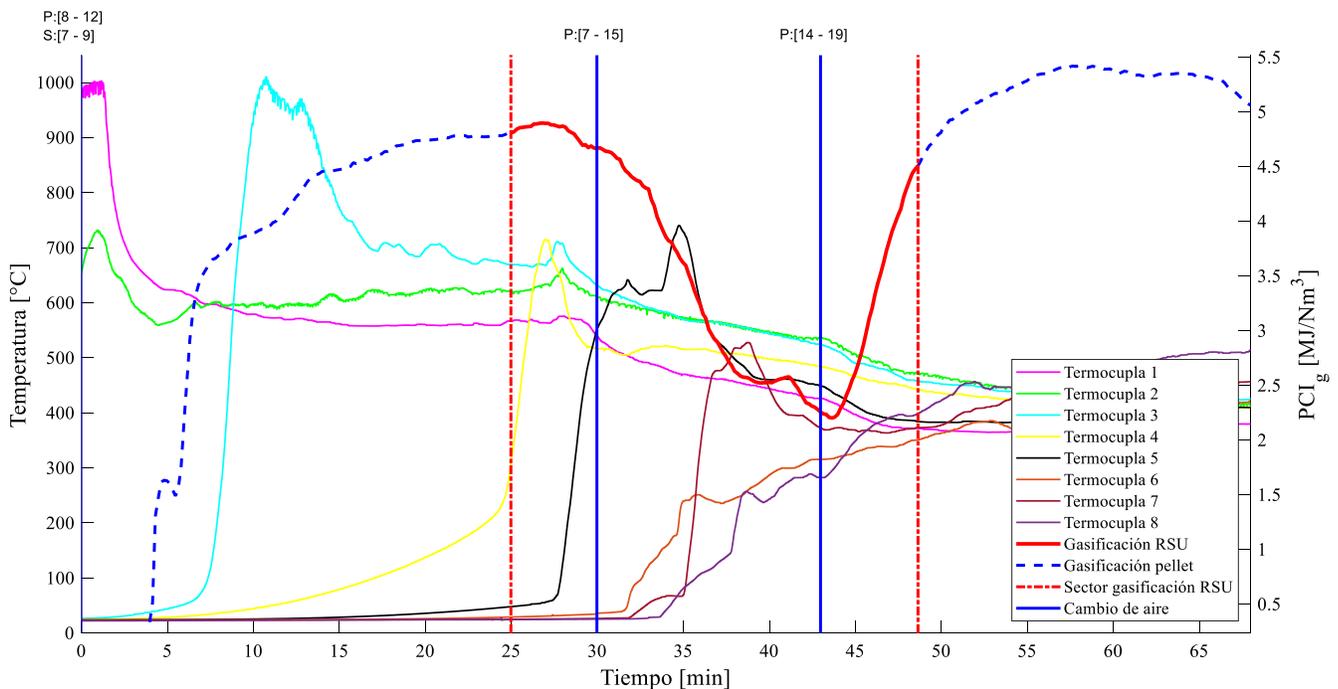


Figura 16. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 5.

En la Tabla 15 compara los resultados del comportamiento del PCI para todas las experiencias. El valor promedio del PCI mostrado en la Tabla 15, representa el vapor medio observado durante la estabilización de este parámetro. Además, en la Tabla 15, presenta la mayor temperatura observada en la 5ta termocupla debido a que esta termocupla está posicionada sobre la entrada secundaria de aire, lo cual incide en potenciar su temperatura cuando el gradiente térmico se aproxima a este sector.

Tabla 15. Comparación entre los experimentos.

Parámetro	Unidad	Experiencia							
		0	1	2	3	4	5	6	7
PCI máximo	$\frac{MJ}{Nm^3}$	4,28	3,65	1,88	2,89	3,03	2,71	3,0	3,6
PCI mínimo		3,44	2,32	1,65	2,26	2,18	2,2	2,56	2,11
PCI promedio		4,17	2,59	1,71	2,65	2,69	2,53	2,78	2,87
Máxima temperatura en T5	°C	923,8	759,1	689,4	684,9	691,8	740,2	683,4	700,1

En la Figura 17 muestra un gráfico de barras del PCI obtenido en cada experiencia y la temperatura máxima para el comportamiento de la 5ta termocupla para todas las experiencias.

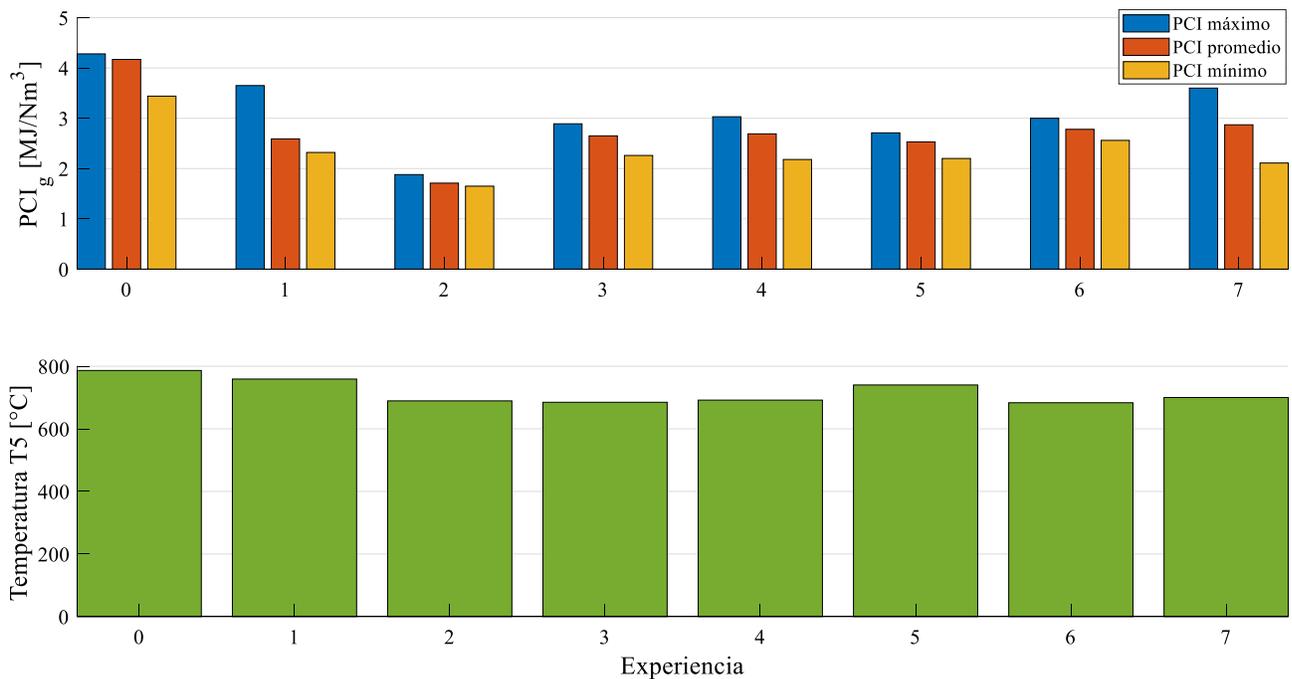


Figura 17. Comparación gráfica entre todos los experimentos.

Los resultados obtenidos en la 2da experiencia difieren de los resultados obtenidos en el resto de los experimentos, por esto, esta composición no fue considerada viable para su gasificación y tampoco será considerada en el análisis estadístico. A excepción de la 2da experiencia, el valor promedio de PCI para todas las experiencias presenta baja variación entre ellas, y se obtienen valores similares a la gasificación de RSU para reactores *Downdraft* (Raj et al., 2023) y (Jiang et al., 2023). Para los

experimentos 1, 3, 4, 5, 6 y 7, la media aritmética de los valores de PCI alcanzo el 65% del contenido energético del gas de gasificación de pellet de biomasa (Experimento 0), con un error del 0,12 MJ/Nm<sup>3</sup>.

La mayor temperatura del proceso en la quinta termocupla fue en promedio 213 °C inferior a la temperatura observada en la Experiencia 0, un resultado esperado, esto porque se debe tener en cuenta la composición de los RSU y la composición de los pellets de biomasa. La mayor temperatura de proceso para la composición de RSU considerada, supera en todas las experiencias los 680 °C, consistente con experiencias previas para reactores de lecho fijo (Wang et al., 2023), (Liu et al., 2022) y (Lee, 2022).

Los resultados del estudio muestran que las diferencias en las composiciones de RSU evaluadas tienen un bajo impacto en el PCI del gas producido y en la temperatura del proceso. El gas de gasificación obtenido en la experiencia 4 presenta el mayor PCI (ver Tabla 15).

# CAPÍTULO 5

## Conclusiones y perspectivas

### 5.1 Conclusiones

El presente estudio lleva como finalidad la caracterización energética de los RSU por medio de la gasificación en un reactor ascendente modificado, el cual tiene como novedad la alimentación de materia prima por la zona inferior del reactor y dos ingresos de agente oxidante (una por debajo de la parrilla y otra en la zona intermedia del reactor). La metodología aplicada es de utilizar dos combustibles como materia prima, los cuales son: pellet y RSU. El pellet se utiliza con la finalidad de asegurar el correcto encendido y el apagado del equipo, esto porque el contenido de humedad del pellet es menor que en los RSU y esto facilita las acciones ya descritas. Los experimentos realizados son 7 en total y se obtienen valores de PCI estable de 2,53 MJ/Nm<sup>3</sup> a 2,87 MJ/Nm<sup>3</sup>. Entonces, tras los resultados obtenidos en el presente estudio, se confirma que se produjo un gas combustible en base RSU con un PCI superior a 2,5 MJ/Nm<sup>3</sup> en el reactor ascendente modificado. Sin embargo, estos resultados se deben validar asegurando un método donde se tenga certeza que solo se da a lugar la gasificación de RSU y no existe una influencia de la biomasa.

Para operar el gasificador ascendente modificado instalado en la universidad de concepción usando RSU, se debe tener en consideración la densidad de la materia prima, esto porque la variable va directamente ligada al tiempo de residencia del combustible, el cual se debe maximizar para poder analizar el gas de mejor manera. Por lo anterior, se define utilizar probetas de RSU con dimensiones mínimas de 60 mm de diámetro y largo 100 mm. Se elaboran dos tipos de probetas: una en base a cartón y plástico y la segunda implementando materia orgánica. Con el fin de facilitar la operación del reactor, se extrae una fracción de la humedad presente en la materia orgánica. Además de las probetas de cartón-plásticos y las probetas de materia orgánica, se incorporan al combustible residuos como: gomas, textiles, madera, etc. En el caso del aire implementado, se logra identificar los intervalos de aire donde ocurre la gasificación de los RSU analizados. Estos resultados se deben validar con una operación continua en el suministro de combustible.

En torno a los resultados obtenidos, se logra gasificar RSU y se genera un gas combustible estable con PCI de 2,53 MJ/Nm<sup>3</sup> y 2,87 MJ/Nm<sup>3</sup>. Según los resultados obtenidos, se observa que a medida que sube el ingreso de aire en el reactor aumenta el PCI del gas. Estos resultados concuerdan con lo observado en el sector de evacuación de los gases, ya que en el instante que se gasifican RSU la llama generada se enciende con dificultad y esto advierte que el contenido energético del gas es deficiente y cuando se logra estabilizar el contenido energético del gas, se observa una llama estable.

La eficiencia energética del reactor no pudo ser estimada de manera precisa, debido a que no se mide el flujo de gas a la salida del equipo. Lo anterior conlleva a que no se puede obtener las condiciones de operación certeras para concluir los parámetros de operación óptimos en el punto de vista de la eficiencia. Sin embargo, se puede obtener de forma general la relación aire-combustible óptima para maximizar el contenido energético del gas, el cual fue entre 27 y 30 de ingreso de aire por 9,3 kg de RSU. Estos resultados deben ser validados al incorporar un instrumento de medición a la salida de los gases y así obtener de forma más certera las condiciones de operaciones de mayor rendimiento en el

reactor.

## 5.2 Perspectivas

Para aumentar la confiabilidad de los resultados, se sugieren las siguientes posibilidades de mejora tanto en la metodología de los experimentos, como en elementos adicionales que se podrían agregar a la instalación:

- Incorporar un sistema de placa orificio en la salida de los gases.
- Identificar como se mueve el combustible al interior del reactor.
- Realizar los experimentos con inyección de RSU mediante el sistema de alimentación. Además, ver que cambios ocasiona el accionamiento del tornillo en el gas generado.
- Calibrar elementos de medición de caudal de aire.
- Realizar un análisis químico a los RSU, con el fin de tener certeza de la proporción de los elementos químicos que conforma la materia prima, su contenido de humedad y contenido de ceniza.
- Instalación de un elemento de medición de alquitranes.

Cabe destacar que a la instalación de gasificación ubicada en la universidad de Concepción falta incorporar el sistema de limpieza de gases mediante ondas de microondas, el cual entregara un gas limpio y con un consumo energético mínimo. Este gas puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica por medio de un motor de combustión interna o una turbina a gas.

## Referencias

- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- Atuesta, L. E., & Vargas, F. S. (2015). Caracterización Físicoquímica De Pellets Producidos a Partir De Mezclas 50/50 Carbón Bituminoso/Medera Residual. *Informador Técnico*, 79(1), 18–25.
- Blanco, E. (2015). *Análise Técnica, Econômica e Ecológica da Incorporação de sistemas de gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro: Uso de ciclos combinados para o aumentada oferta de eletricidade*.
- Breault, R. W. (2010). Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies. *Energies*, 216–240. <https://doi.org/10.3390/en3020216>
- Byun, Y., Cho, M., Hwang, S.-M., & Chung, J. (2012). Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW). In *Gasification for Practical Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/48537>
- Cerone, N., Zimbardi, F., Contuzzi, L., Baleta, J., Cerinski, D., & Skvorčinskienė, R. (2020). Experimental investigation of syngas composition variation along updraft fixed bed gasifier. *Energy Conversion and Management*, 221(July), 113116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113116>
- Chen, D. M. C., Bodirsky, B. L., Krueger, T., Mishra, A., & Popp, A. (2020). The world's growing municipal solid waste: trends and impacts. *Environmental Research Letters*, 15(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8659>
- Cho, I. J., Park, H. W., Park, D. W., & Choi, S. (2015). Enhancement of synthesis gas production using gasification-plasma hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(4), 1709–1716. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.007>
- CONAMA. (2006). Informe final: Estudio Caracterización de Residuos Sólidos domiciliarios en la región metropolitana. *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*, 1–121.
- de Souza-Santo, M. (2005). *Solid Fuels Combustion and Gasification* (Marcel Dekker Inc., Ed.).
- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016). Hydrogen Production by Thermal Energy. In *Sustainable Hydrogen Production*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801563-6.00004-2>
- Dominguez Javier, Carraro Federica, Sanchez Sergio, Berriz Luis, Arencibia Alois, Zarzalejo Luis, Ciria Pilar, Ramos Raquel, Sanchez-Hervas Jose Maria, Ortiz Isabel, Maroño Marta, Arribas Luis, & Sanz Luciano. (2018). “Cogeneración de Energía , Eléctrica y Térmica , Mediante un Sistema Híbrido Biomasa-Solar para Explotaciones Agropecuarias en la Isla de Cuba.” <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25355.03364>
- Ecomas. (2020). *Ficha técnica*.
- Elagrouty, S., Warith, M. A., & Zayat, M. El. (2016). *Municipal Solid Waste Management and Green Economy*. [www.globalyoungacademy.net](http://www.globalyoungacademy.net)
- Etutu, T. G., Laohalidanond, K., & Kerdsuwan, S. (2016). Gasification of municipal solid waste in a downdraft gasifier: Analysis of tar formation. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 38(2), 221–228. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2016.30>

- Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E., & Paniagua, prado. (2012). Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad. *Transbioma*, 13(2), 105–109.
- Indrawan, N., Kumar, A., Moliere, M., Sallam, K. A., & Huhnke, R. L. (2020). Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste : A review Organic Rankine cycle. *Journal of the Energy Institute*, 93(6), 2293–2313. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.07.001>
- Isaksson, J. (2015). Commercial CFB gasification of waste and biofuels - operational experiences in large scale. *2015 Gasification Technologies Conference, October*, 1–39.
- Işık, K. E., Dogru, M., & Erdem, A. (2023). Gasification of MDF residue in an updraft fixed bed gasifier to produce heat and power via an ORC turbine. *Waste Management*, 169, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.06.025>
- Jiang, W., Tao, J., Zhong, X., Ye, Y., Kang, J., Tang, Q., Liu, D., Ren, Y., Li, D., Cai, H., & Li, D. (2023). Co-gasification of rural solid waste and biomass in rural areas: Simulation and plant-scale process. *Environmental Research*, 235, 116684. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116684>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Wolrd Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>.
- Lee, D. J. (2022). Gasification of municipal solid waste (MSW) as a cleaner final disposal route: A mini-review. In *Bioresource Technology* (Vol. 344). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126217>
- Liu, Y., Liao, C., Tang, Y., Tang, J., Sun, Y., & Ma, X. (2022). Techno-environmental-economic evaluation of the small-scale municipal solid waste (MSW) gasification-based and incineration-based power generation plants. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104594>
- Neira, M. (2020). *Estudio de la Factibilidad Técnica de la Implementación de un Sistema para la Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de Concepción*. Universidad del Bío-Bío.
- Nevill, J. D. (2001). *Biomass Gasification Feed System Design and Evaluation* (Vol. 1, Issue January). Texas Tech University.
- OECD. (2015). Environment at a Glance 2015: OECD Indicators. In *9th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.2514/6.2009-6924>
- OECD. (2020). *Municipal waste (indicator)*. 07 November. <https://doi.org/10.1787/89d5679a-en>
- Orellana, R. (2016). *Generación de energía mediante tecnologías de gasificación de desechos sólidos en la región del Bio-Bio*. Universidad de Concepción.
- Ortiz, E. (2019). *Dimensionamiento y construcción de un reactor de gasificación de corriente modificado para residuos sólidos urbanos*. Universidad de Concepción.
- Perry, R. (1984). *Manuel del Ingeniero Químico* (Vol. 6, Issue 2). Mc Graw Hill.
- Raj, R., Tirkey, J. V., Singh, D. K., & Jena, P. (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. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101271>

- Ratnadhariya, J. K., & Channiwala, S. A. (2003). *Parametric Sensitivity of Downdraft Gasifier As Predicted By Three Zone KF Model*. 2003(December), 26–28.
- Safarian, S., Unnþórsson, R., & Richter, C. (2019). A review of biomass gasification modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110(November 2018), 378–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.003>
- Saleem, F., Harris, J., Zhang, K., & Harvey, A. (2020). Non-thermal plasma as a promising route for the removal of tar from the product gas of biomass gasification – A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 382(September 2019), 122761. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122761>
- SGS, & SIGA INGENIERIA. (2018). *Capítulo 4: Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de residuos sólidos domiciliarios y asimilables*.
- Shintre, R., Jadhav, L. D., Wagh, M. M., & Shinde, N. N. (2014). *Experimental Analysis of Gasifier using Municipal Solid Wastes*. 3(6), 510–513.
- Singh Siwal, S., Zhang, Q., Sun, C., Thakur, S., Kumar Gupta, V., & Kumar Thakur, V. (2019). Energy production from steam gasification processes and parameters that contemplate in biomass gasifier – A review. *Bioresource Technology*, 297(November 2019), 122481. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122481>
- Solar Technical Information Program. (1988). *Downdraft Gasifier Engine Systems Handbook of Biomass* (Issue March).
- Tamošiūnas, A., Gimžauskaitė, D., Uscila, R., & Aikas, M. (2019). Thermal arc plasma gasification of waste glycerol to syngas. *Applied Energy*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113306>
- Tamošiūnas, A., & Jeguirim, M. (2019). Char gasification. In *Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications* (pp. 187–228). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814893-8.00006-7>
- Thapa, S., Bhoi, P. R., Kumar, A., & Huhnke, R. L. (2017). Effects of syngas cooling and biomass filter medium on tar removal. *Energies*, 10(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en10030349>
- TIANYU. (2020). *Ficha técnica: Portable Syngas Analyser SYN-600* (pp. 1–5).
- Travieso, D., Blanco, E., Luz, J., & Nemoto, Y. (2013). Experimental study of bottom feed updraft gasifier. *Renewable Energy*, 57, 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.056>
- Valderrama Rios, M. L., Martínez González, A., Silva Lora, E. E., & Almazán del Olmo, O. A. (2018). Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass and Bioenergy*, 108(July 2017), 345–370. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.002>
- Wang, B., Gupta, R., Bei, L., Wan, Q., & Sun, L. (2023). A review on gasification of municipal solid waste (MSW): Syngas production, tar formation, mineral transformation and industrial challenges. In *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.086>
- Watkins, P., & McKendry, P. (2014a). Assessment of waste derived gases as a renewable energy source - Part 1. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 10, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.03.001>
- Watkins, P., & McKendry, P. (2014b). Assessment of waste derived gases as a renewable energy source - Part 2. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 10, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.03.004>

## Anexos

- **Experiencia o**
  - **Mediciones**

En la Tabla 16 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 16. Flujo de aire ingresados al gasificador para el ensayo o.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
16:41:00	Principal	8 – 14,5
	Secundario	14 – 16
16:50:00	Principal	8 – 14,5
	Secundario	5 – 9
16:58:00	Principal	8 – 14,5
	Secundario	7,5 – 9,5
17:17:00	Principal	10 – 17,3
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Figura 18 se muestran el registro de la composición del gas generado para esta experiencia.

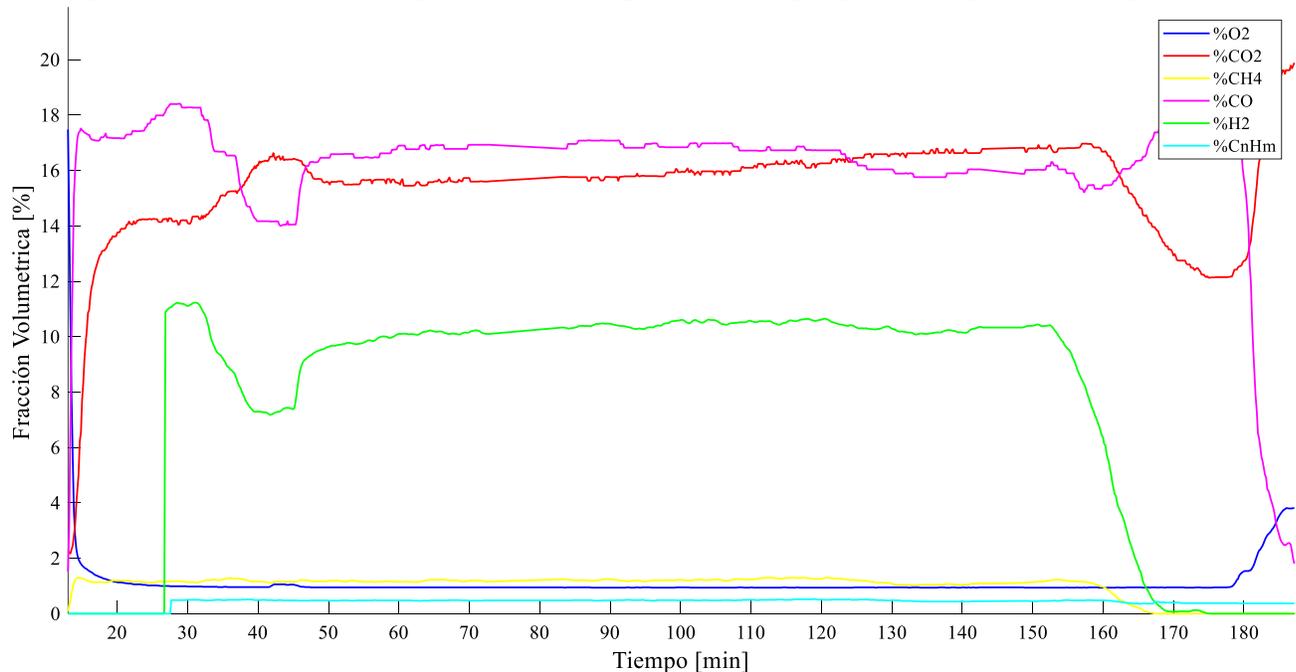


Figura 18. Análisis de gases para la experiencia o.

- **Post-procesamiento**

Para el análisis de datos se estima el poder calorífico inferior del gas generado según la ecuación mostrada en (15) con los 4 componentes más energéticos, los cuales son el monóxido de carbono,

hidrógeno molecular, metano y los alquitranes. En la Figura 19 se muestra el PCI del gas [MJ/m<sup>3</sup>] durante todo el experimento de RSU y las temperaturas al interior del reactor.

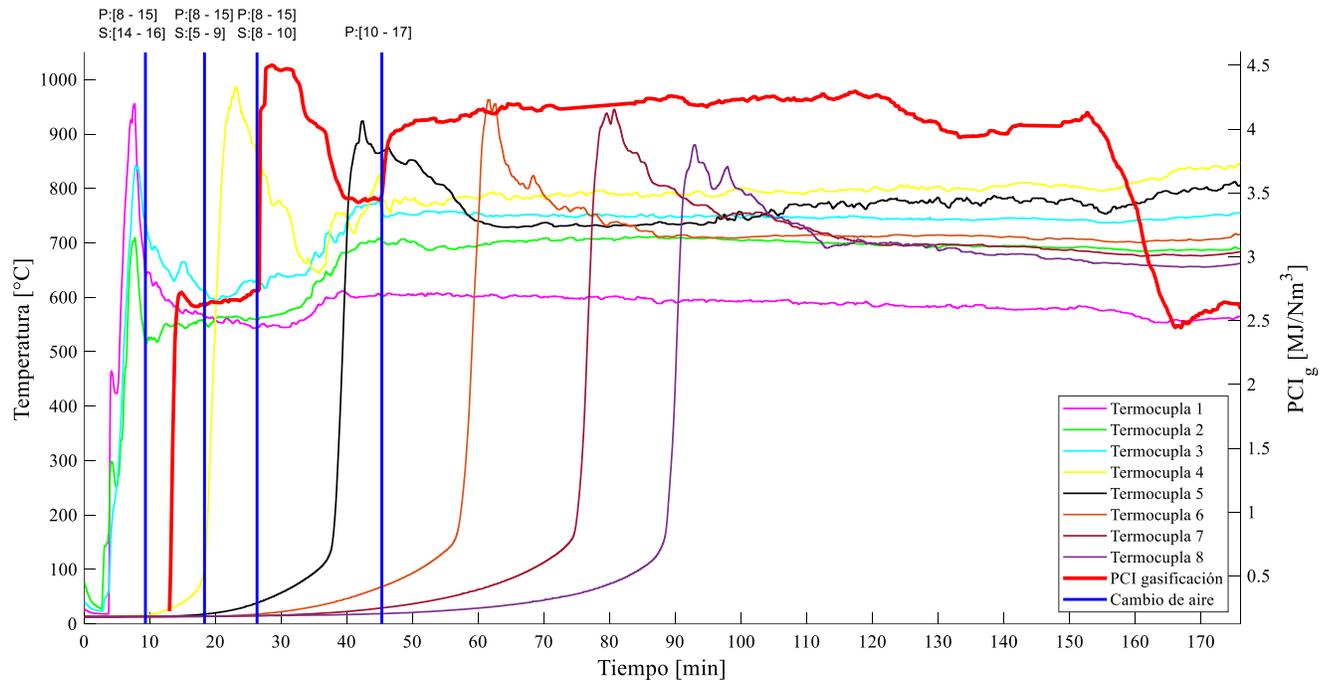


Figura 19. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 0.

## • Experiencia 1

### ○ Mediciones

En la Tabla 17 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor y la proporción de RSU.

Tabla 17. Valores másicos para el primer experimento.

Parámetro	Valor	Fracción másica RSU [%]
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	7,58	-
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	3,32	-
Masa de materia orgánica [kg]	0	0
Masa de cartón [kg]	1,16	60,4
Masa de plástico [kg]	0,35	18,2
Masa de textiles [kg]	0,155	8,1
Masa de goma [kg]	0,255	13,3

En la Tabla 18 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 18. Flujo de aire ingresados al gasificador para el primer ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
12:12:00	Principal	0
	Secundario	8,5 – 12

12:18:00	Principal	10 – 17
	Secundario	5 – 9
12:46:00	Principal	17 – 19
	Secundario	0
12:48:00	Principal	10 – 15
	Secundario	0
12:57:00	Principal	5 – 10
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 19 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 20 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 19. Análisis de gases en intervalo estable para la primera experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
28,60	4,72	4,14	16,23	1,61	17,40	11,04	0,84
28,77	4,71	4,14	16,30	1,66	17,24	10,88	0,86
28,93	4,73	4,16	16,45	1,71	17,24	10,73	0,90
29,10	4,72	4,19	16,55	1,75	17,10	10,63	0,91
29,27	4,74	4,21	16,84	1,80	17,02	10,55	0,93
29,43	4,74	4,22	16,85	1,83	16,91	10,51	0,95
29,60	4,76	4,24	17,02	1,88	16,82	10,43	0,98
29,77	4,76	4,25	17,03	1,91	16,69	10,34	1,01
29,93	4,74	4,24	17,14	1,93	16,57	10,21	1,02
30,10	4,72	4,24	17,18	1,93	16,51	10,11	1,03
30,27	4,65	4,25	17,34	1,91	16,05	9,87	1,07
30,43	4,62	4,25	17,38	1,90	15,88	9,71	1,09
30,60	4,54	4,25	17,40	1,88	15,50	9,54	1,10
30,77	4,51	4,25	17,53	1,88	15,22	9,43	1,12
30,93	4,48	4,25	17,59	1,88	15,12	9,31	1,13
31,10	4,46	4,25	17,60	1,89	15,00	9,20	1,14
31,27	4,45	4,24	17,61	1,90	14,87	9,10	1,16
31,43	4,43	4,24	17,77	1,91	14,74	8,96	1,18
31,60	4,38	4,25	17,78	1,91	14,53	8,72	1,20
31,77	4,31	4,25	17,98	1,91	14,14	8,50	1,21
31,93	4,21	4,25	18,01	1,92	13,56	8,19	1,22
32,10	4,17	4,26	18,18	1,93	13,34	8,01	1,24
32,27	4,06	4,26	18,31	1,96	12,77	7,48	1,26
32,43	3,99	4,27	18,53	1,99	12,39	7,07	1,29
32,60	3,89	4,26	18,63	2,01	11,86	6,63	1,33
32,77	3,82	4,26	19,00	2,01	11,43	6,21	1,39
32,93	3,76	4,26	19,24	1,99	11,16	5,85	1,43
33,10	3,67	4,26	19,38	1,96	10,79	5,54	1,45
33,27	3,61	4,27	19,39	1,92	10,54	5,26	1,49
33,43	3,52	4,27	19,43	1,88	10,04	5,08	1,51
33,60	3,46	4,28	19,62	1,84	9,79	4,89	1,54

33,77	3,39	4,28	19,66	1,79	9,52	4,69	1,56
33,93	3,34	4,29	19,85	1,75	9,32	4,54	1,57
34,10	3,29	4,29	20,02	1,72	9,14	4,41	1,58
34,27	3,26	4,29	20,31	1,67	9,04	4,29	1,60
34,43	3,22	4,29	20,24	1,63	8,89	4,23	1,61
34,60	3,19	4,29	20,24	1,59	8,75	4,14	1,63
34,77	3,16	4,29	20,41	1,53	8,69	4,05	1,65
34,93	3,11	4,29	20,57	1,45	8,51	3,96	1,68
35,10	3,05	4,29	20,61	1,39	8,40	3,91	1,66
35,27	3,00	4,29	20,62	1,31	8,26	3,90	1,66
35,43	2,96	4,29	20,87	1,27	8,13	3,90	1,65
35,60	2,92	4,30	20,97	1,22	8,11	3,91	1,61
35,77	2,88	4,30	21,01	1,17	8,03	3,91	1,60
35,93	2,86	4,32	21,01	1,14	8,03	3,90	1,58
36,10	2,83	4,32	21,03	1,12	8,03	3,89	1,55
36,27	2,81	4,32	21,03	1,07	8,03	3,96	1,53
36,43	2,78	4,32	21,15	1,05	8,03	3,99	1,49
36,60	2,76	4,32	21,23	1,04	7,97	3,92	1,49
36,77	2,68	4,32	21,40	1,01	7,70	3,70	1,48
36,93	2,59	4,33	21,45	0,97	7,44	3,41	1,46
37,10	2,49	4,33	21,47	0,93	7,19	3,20	1,43
37,27	2,42	4,34	21,48	0,90	7,07	2,98	1,40
37,43	2,37	4,34	21,66	0,90	7,00	2,78	1,37
37,60	2,34	4,34	21,67	0,88	7,00	2,67	1,36
37,77	2,33	4,34	21,71	0,87	7,12	2,55	1,34
37,93	2,36	4,34	21,67	0,91	7,31	2,53	1,33
38,10	2,39	4,34	21,54	0,96	7,48	2,59	1,30
38,27	2,45	4,33	21,48	1,01	7,74	2,65	1,29
38,43	2,47	4,33	21,38	1,03	7,78	2,68	1,31
38,60	2,53	4,34	21,32	1,09	7,81	2,83	1,33
38,77	2,57	4,42	21,36	1,14	7,69	3,05	1,34
38,93	2,61	4,56	21,26	1,18	7,62	3,14	1,37
39,10	2,60	4,67	21,21	1,20	7,51	3,12	1,38
39,27	2,54	4,84	20,94	1,16	7,28	2,84	1,41
39,43	2,47	4,87	20,96	1,11	7,03	2,53	1,44
39,60	2,38	4,86	20,70	1,07	6,91	2,25	1,41
39,77	2,34	4,84	20,58	1,04	6,91	2,06	1,40
39,93	2,35	4,82	20,46	1,04	7,17	1,95	1,38
40,10	2,61	5,12	22,33	1,13	8,41	1,90	1,51
40,27	2,59	4,87	20,52	1,09	8,43	1,93	1,50
40,43	2,66	5,29	22,00	1,24	8,43	1,99	1,50
40,60	2,61	5,35	22,00	1,24	8,50	1,99	1,40
40,77	2,58	4,63	20,52	1,13	8,50	2,06	1,40
40,93	2,61	4,57	20,54	1,16	8,65	2,11	1,40
41,10	2,55	4,55	20,43	1,18	8,41	2,16	1,32
41,27	2,62	4,53	20,40	1,22	8,76	2,28	1,30
41,43	2,68	4,52	20,55	1,27	9,06	2,42	1,28

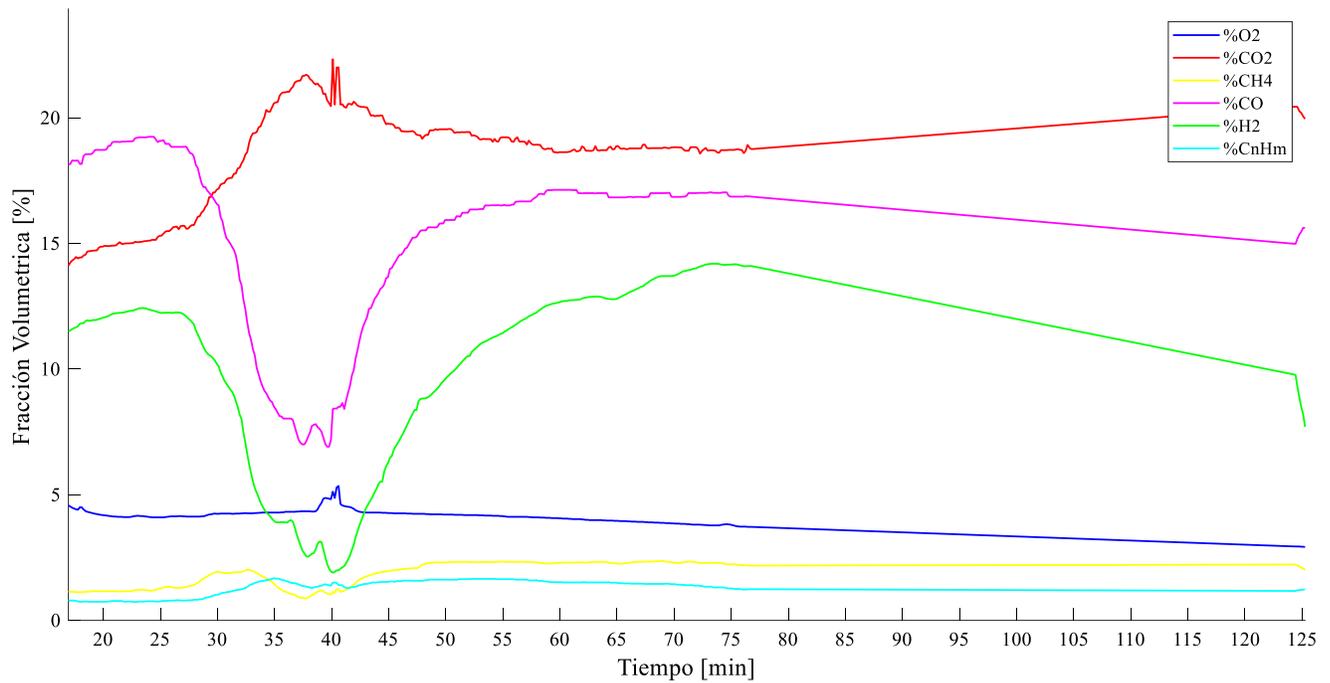


Figura 20. Análisis de gases para la primera experiencia.

#### ○ Post-procesamiento

Para el análisis de datos se estima el poder calorífico inferior del gas generado según la ecuación mostrada en (15) con los 4 componentes más energéticos, los cuales son el monóxido de carbono, hidrógeno molecular, metano y los alquitranes. En la Figura 21 se muestra el PCI del gas [ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ] durante todo el experimento de RSU. La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

Como se presenta en la Figura 21, se superpone las curvas de temperatura con el PCI, esto con la finalidad de estimar el momento cuando el pellet influye en el contenido energético del gas. Lo mencionado con anterioridad, se define cuando en la zona límite entre el RSU y el pellet se tiene una temperatura de  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura en la cual empezaría a pirolizar el pellet.

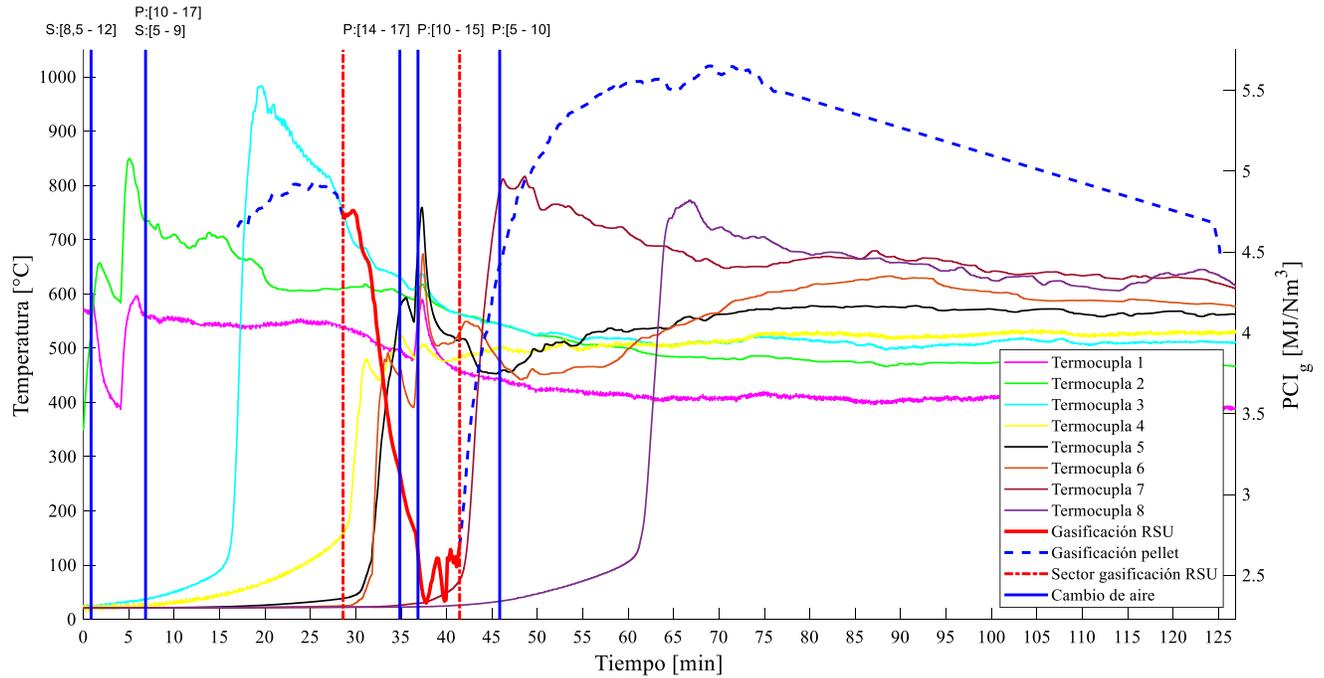


Figura 21. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 1.

## • Experiencia 2

### ○ Mediciones

En la Tabla 20 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor.

Tabla 20. Valores másicos para el segundo experimento.

Parámetro	Valor
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	3,0
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	3,13
Masa de materia orgánica [kg]	0
Masa de cartón [kg]	1,54
Masa de plástico [kg]	0,45
Masa de textiles [kg]	0,205
Masa de goma [kg]	0,365

En la Tabla 21 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 21. Flujo de aire ingresados al gasificador para el segundo ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
16:42:00	Principal	0
	Secundario	24 – 27
16:54:00	Principal	7 – 15
	Secundario	22 - 25
16:56:00	Principal	13 – 20

	Secundario	20 – 23
17:03:00	Principal	15 – 20
	Secundario	7 - 20
17:18:00	Principal	5 – 13
	Secundario	7 – 10
17:20:00	Principal	12 – 19
	Secundario	8 – 12
17:24:00	Principal	14 - 17
	Secundario	0
17:56:00	Principal	25 – 27
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 22 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 22 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 22. Análisis de gases en intervalo estable para la segunda experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
30,48	2,83	5,94	15,92	1,41	8,75	2,15	1,57
30,65	2,82	5,98	16,08	1,44	8,67	2,12	1,56
30,82	2,83	6	16,08	1,44	8,65	2,08	1,59
30,98	2,80	6,03	16,13	1,44	8,44	2,06	1,59
31,15	2,77	6,04	16,12	1,42	8,31	2	1,6
31,32	2,74	6	16,15	1,41	8,11	1,95	1,6
31,48	2,72	5,95	16,09	1,4	8,02	1,89	1,61
31,65	2,70	5,92	16,05	1,38	7,88	1,82	1,64
31,82	2,66	5,93	16,01	1,35	7,63	1,74	1,65
31,98	2,62	5,96	15,99	1,31	7,46	1,65	1,67
32,15	2,56	6,06	16	1,28	7,23	1,54	1,66
32,32	2,48	6,22	15,92	1,21	6,92	1,41	1,67
32,48	2,41	6,35	15,91	1,15	6,68	1,34	1,66
32,65	2,36	6,42	15,92	1,11	6,54	1,32	1,64
32,82	2,32	6,44	15,84	1,09	6,48	1,34	1,59
32,98	2,31	6,45	15,82	1,09	6,38	1,36	1,58
33,15	2,30	6,52	15,83	1,1	6,4	1,36	1,55
33,32	2,30	6,61	15,82	1,09	6,48	1,34	1,55
33,48	2,29	6,7	15,7	1,09	6,48	1,32	1,53
33,65	2,27	6,8	15,68	1,08	6,48	1,29	1,52
33,82	2,26	6,9	15,57	1,06	6,47	1,29	1,51
33,98	2,24	7,01	15,58	1,04	6,38	1,27	1,52
34,15	2,21	7,13	15,43	1,04	6,28	1,23	1,49
34,32	2,19	7,26	15,4	1,04	6,21	1,18	1,49
34,48	2,16	7,36	15,34	1,03	6,12	1,1	1,48
34,65	2,12	7,49	15,22	1,02	5,96	1,03	1,47
34,82	2,10	7,59	15,18	1,01	5,82	1	1,47

34,98	2,07	7,64	15,11	1	5,73	0,98	1,46
35,15	2,04	7,65	15,11	1	5,65	0,93	1,44
35,32	2,03	7,63	15	0,99	5,65	0,86	1,43
35,48	2,00	7,58	14,95	0,96	5,62	0,75	1,44
35,65	1,95	7,54	14,89	0,92	5,47	0,64	1,43
35,82	1,91	7,52	14,9	0,88	5,37	0,56	1,43
35,98	1,87	7,5	14,9	0,85	5,32	0,5	1,4
36,15	1,84	7,47	14,93	0,83	5,22	0,48	1,39
36,32	1,81	7,43	14,94	0,84	5,11	0,46	1,36
36,48	1,80	7,42	14,94	0,85	5,06	0,47	1,35
36,65	1,81	7,44	14,95	0,86	5,06	0,48	1,35
36,82	1,80	7,46	14,88	0,85	5,06	0,49	1,35
36,98	1,80	7,46	14,84	0,85	5,06	0,5	1,35
37,15	1,79	7,45	14,72	0,83	4,99	0,51	1,36
37,32	1,79	7,42	14,73	0,81	4,97	0,5	1,37
37,48	1,77	7,37	14,67	0,81	4,91	0,48	1,35
37,65	1,76	7,27	14,61	0,81	4,91	0,44	1,35
37,82	1,75	7,17	14,76	0,82	4,91	0,39	1,34
37,98	1,75	7,13	14,76	0,83	4,91	0,33	1,34

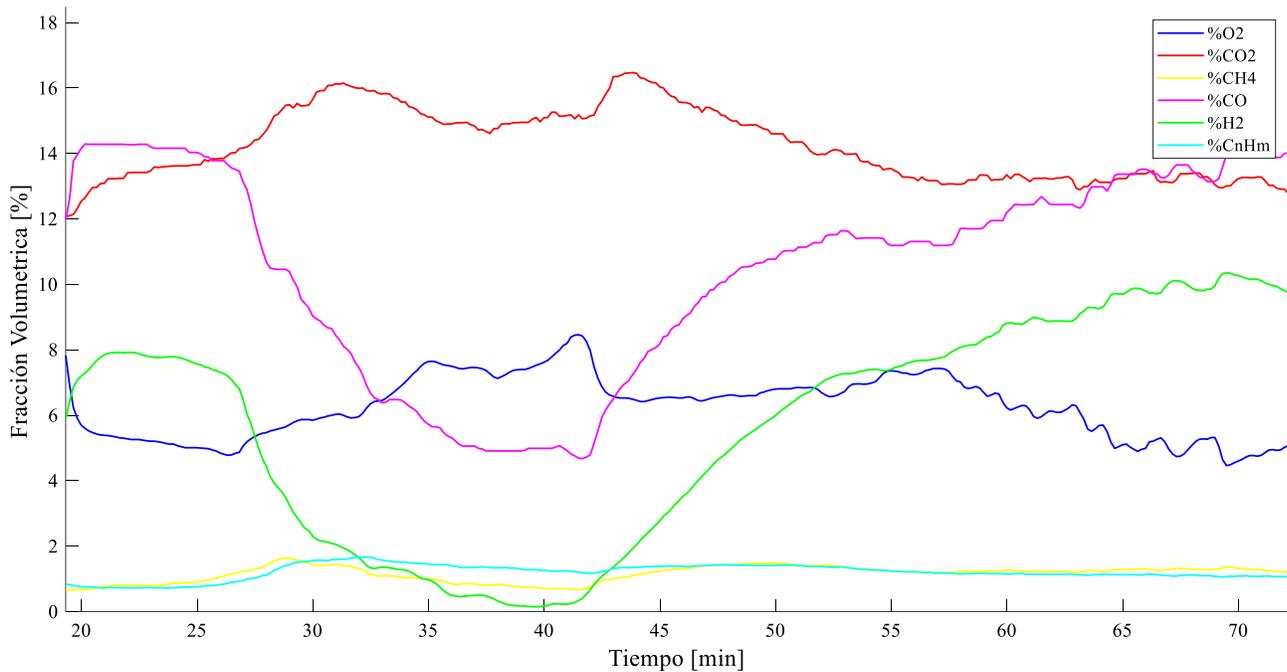


Figura 22. Análisis de gases para la segunda experiencia.

### ○ Post-procesamiento

Empleando la (15) se obtiene el PCI del gas generado durante todo el experimento. En la Figura 23 se muestra el PCI del gas generado en  $[MJ/m^3]$ . La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

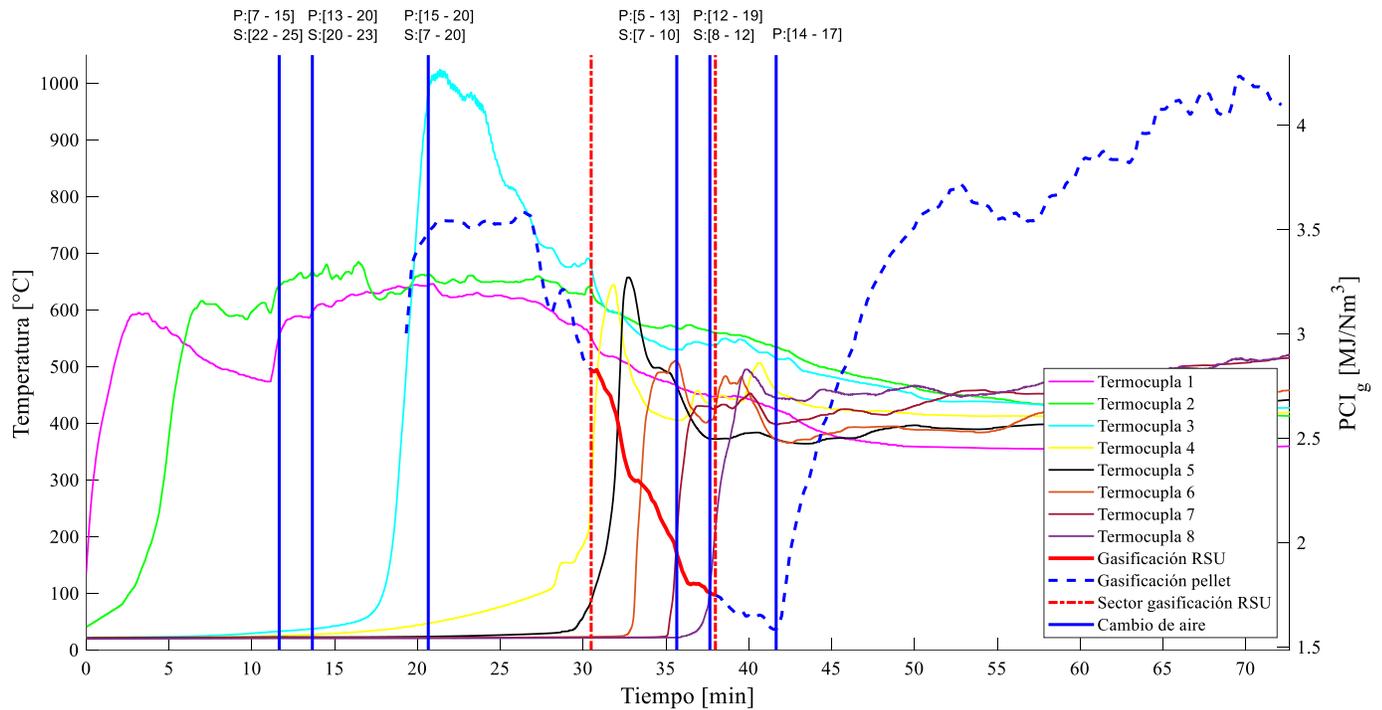


Figura 23. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 2.

### • Experiencia 3

#### ○ Mediciones

En la Tabla 23 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor.

Tabla 23. Valores másicos para el tercer experimento.

Parámetro	Valor
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	3,365
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	6,0
Masa de materia orgánica [kg]	1,685
Masa de cartón [kg]	0,413
Masa de plástico [kg]	0,186
Masa de madera [kg]	0,114
Masa de goma [kg]	0,114
Masa de textiles [kg]	0,064

En la Tabla 24 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 24. Flujo de aire ingresados al gasificador para el tercer ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
18:18:00	Principal	12 – 14,1
	Secundario	9,5 – 12
18:22:00	Principal	8 – 12

	Secundario	13 – 15
18:37:00	Principal	7 – 11
	Secundario	10 – 13
18:48:00	Principal	8 – 15
	Secundario	9 – 11
18:51:00	Principal	12 – 17
	Secundario	9 – 12
18:53:00	Principal	7 – 12
	Secundario	10 – 13
18:57:00	Principal	8 – 15
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 25 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 24 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 25. Análisis de gases en intervalo estable para la tercera experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
31,67	5,09	0,23	14,24	1,13	20,57	12,04	0,90
31,83	5,09	0,23	14,37	1,13	20,56	12,03	0,91
32,00	5,09	0,22	14,28	1,13	20,57	12,02	0,91
32,17	5,06	0,22	14,36	1,13	20,31	11,99	0,91
32,33	5,03	0,22	14,44	1,13	20,08	11,97	0,91
32,50	5,02	0,22	14,44	1,14	20,08	11,95	0,90
32,67	5,02	0,21	14,57	1,16	20,06	11,91	0,90
32,83	4,97	0,21	14,62	1,17	19,68	11,82	0,91
33,00	4,96	0,21	14,67	1,18	19,54	11,76	0,92
33,17	4,90	0,21	14,89	1,24	19,23	11,43	0,92
33,33	4,78	0,20	15,14	1,27	18,49	11,08	0,93
33,50	4,70	0,20	15,54	1,30	18,15	10,59	0,96
33,67	4,51	0,21	15,89	1,32	16,99	9,97	1,00
33,83	4,25	0,21	16,40	1,33	15,54	9,21	1,03
34,00	4,09	0,22	16,87	1,32	14,83	8,55	1,07
34,17	3,88	0,22	17,61	1,32	13,71	7,86	1,10
34,33	3,71	0,23	18,08	1,31	12,90	7,20	1,14
34,50	3,52	0,24	18,82	1,30	11,96	6,64	1,15
34,67	3,35	0,26	19,47	1,27	11,30	5,88	1,18
34,83	3,29	0,28	20,06	1,26	10,80	5,81	1,21
35,00	3,06	0,30	20,71	1,20	10,11	4,81	1,23
35,17	2,94	0,31	20,94	1,16	9,72	4,34	1,24
35,33	2,83	0,31	21,28	1,13	9,29	3,88	1,26
35,50	2,73	0,31	21,53	1,11	8,99	3,48	1,26
35,67	2,68	0,31	21,89	1,09	8,84	3,23	1,27
35,83	2,64	0,31	22,21	1,08	8,59	3,21	1,27
36,00	2,62	0,31	22,34	1,05	8,46	3,21	1,29
36,17	2,48	0,31	22,74	1,04	8,29	2,24	1,29

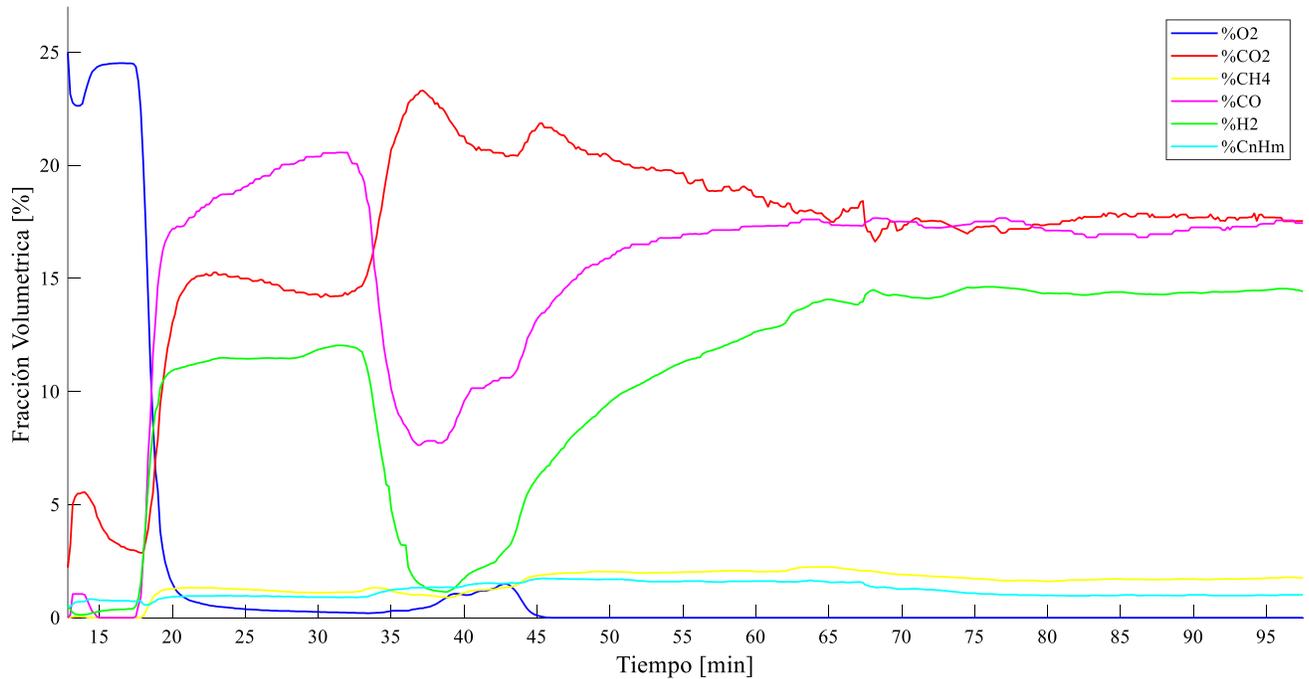


Figura 24. Análisis de gases para la tercera experiencia.

### ○ Post-procesamiento

Empleando la (15) se obtiene el PCI del gas generado durante todo el experimento. En la Figura 24 se muestra el PCI del gas generado en  $[\text{MJ}/\text{m}^3]$ . La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

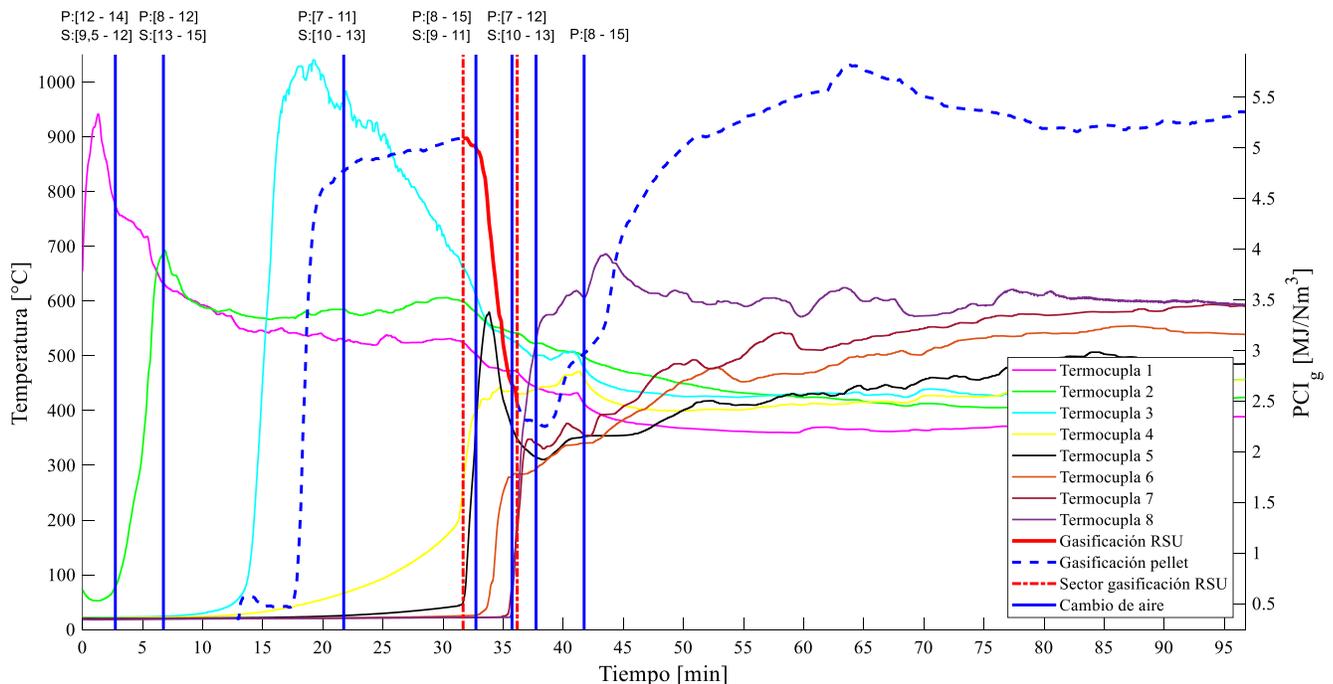


Figura 25. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 3.

- **Experiencia 4**
  - **Mediciones**

En la Tabla 26 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor.

Tabla 26. Valores másicos para el cuarto experimento.

Parámetro	Valor
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	3,3
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	3,0
Masa de materia orgánica [kg]	2,0
Masa de cartón [kg]	0,49
Masa de plástico [kg]	0,268
Masa de madera [kg]	0,135
Masa de goma [kg]	0,135
Masa de textiles [kg]	0,075

En la Tabla 35 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 27. Flujo de aire ingresados al gasificador para el cuarto ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
18:48:00	Principal	8,9 – 12,5
	Secundario	9 – 13
19:04:00	Principal	8 – 15
	Secundario	9 – 13
19:25:00	Principal	11 – 17
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 28 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 26 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 28. Análisis de gases en intervalo estable para la cuarta experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
29,03	4,71	0,00	15,94	1,16	18,30	11,31	0,88
29,20	4,70	0,00	16,01	1,16	18,21	11,28	0,88
29,37	4,70	0,00	16,01	1,16	18,14	11,23	0,91
29,53	4,69	0,00	16,01	1,16	18,12	11,16	0,91
29,70	4,66	0,00	16,03	1,16	18,02	11,09	0,91
29,87	4,65	0,00	16,02	1,16	18,02	10,99	0,91
30,03	4,62	0,00	16,25	1,16	17,90	10,89	0,91
30,20	4,62	0,00	16,23	1,16	17,84	10,85	0,92
30,37	4,59	0,00	16,24	1,16	17,71	10,72	0,93

30,53	4,58	0,00	16,22	1,16	17,68	10,64	0,93
30,70	4,54	0,00	16,40	1,16	17,53	10,53	0,93
30,87	4,51	0,00	16,53	1,19	17,27	10,41	0,94
31,03	4,49	0,00	16,56	1,20	17,16	10,34	0,93
31,20	4,48	0,00	16,56	1,23	17,05	10,22	0,94
31,37	4,44	0,00	16,48	1,27	16,76	10,03	0,96
31,53	4,39	0,00	16,77	1,31	16,49	9,74	0,97
31,70	4,32	0,00	16,81	1,36	16,08	9,32	0,99
31,87	4,24	0,00	17,15	1,41	15,63	8,86	1,02
32,03	4,14	0,00	17,56	1,46	15,04	8,36	1,05
32,20	4,00	0,00	17,83	1,49	14,27	7,83	1,08
32,37	3,96	0,00	18,08	1,53	13,90	7,55	1,12
32,53	3,76	0,00	18,50	1,54	13,08	6,69	1,14
32,70	3,59	0,00	18,95	1,54	12,26	6,11	1,15
32,87	3,50	0,00	19,26	1,55	11,88	5,63	1,17
33,03	3,44	0,00	19,33	1,56	11,69	5,21	1,20
33,20	3,36	0,00	19,63	1,59	11,29	4,89	1,20
33,37	3,37	0,00	19,83	1,64	11,16	4,81	1,23
33,53	3,32	0,00	19,89	1,68	10,97	4,43	1,24
33,70	3,36	0,00	19,89	1,75	10,97	4,38	1,27
33,87	3,37	0,00	20,10	1,78	10,84	4,14	1,35
34,03	3,37	0,00	20,25	1,80	10,76	3,98	1,40
34,20	3,35	0,00	20,40	1,81	10,54	3,84	1,44
34,37	3,32	0,00	20,46	1,78	10,35	3,67	1,48
34,53	3,29	0,00	20,47	1,76	10,19	3,50	1,52
34,70	3,24	0,00	20,50	1,73	9,97	3,36	1,53
34,87	3,20	0,00	20,61	1,71	9,75	3,25	1,55
35,03	3,18	0,00	20,71	1,70	9,64	3,15	1,57
35,20	3,14	0,00	20,74	1,69	9,45	3,02	1,57
35,37	3,13	0,00	20,76	1,68	9,38	2,89	1,61
35,53	3,09	0,00	20,79	1,65	9,23	2,73	1,62
35,70	3,04	0,00	20,90	1,59	9,11	2,56	1,64
35,87	2,97	0,00	20,61	1,49	8,91	2,39	1,68
36,03	2,89	0,00	20,64	1,39	8,71	2,25	1,68
36,20	2,81	0,00	20,63	1,30	8,62	2,12	1,65
36,37	2,73	0,06	20,47	1,22	8,45	1,98	1,64
36,53	2,67	0,07	20,36	1,16	8,39	1,87	1,61
36,70	2,64	0,00	20,25	1,14	8,35	1,81	1,59
36,87	2,63	0,00	20,24	1,14	8,40	1,81	1,57
37,03	2,68	0,00	20,32	1,15	8,65	1,87	1,57
37,20	2,72	0,00	20,19	1,16	8,87	1,97	1,57
37,37	2,78	0,00	20,16	1,18	9,21	2,05	1,56
37,53	2,83	0,00	20,14	1,20	9,49	2,13	1,57
37,70	2,86	0,00	20,15	1,21	9,59	2,21	1,57
37,87	2,89	0,00	20,15	1,22	9,66	2,25	1,59
38,03	2,95	0,00	20,15	1,26	9,66	2,48	1,62
38,20	2,98	0,00	20,16	1,28	9,50	2,64	1,65

38,37	3,01	0,00	20,35	1,32	9,27	2,81	1,70
38,53	3,03	0,00	20,53	1,36	9,01	2,91	1,73
38,70	3,05	0,00	21,18	1,38	8,68	2,97	1,81
38,87	3,05	0,00	21,38	1,40	8,47	2,97	1,85
39,03	3,04	0,00	21,73	1,41	8,26	2,96	1,87
39,20	3,05	0,00	22,26	1,40	8,06	2,92	1,95
39,37	3,04	0,00	22,48	1,39	7,89	2,89	1,98
39,53	3,01	0,00	22,60	1,37	7,75	2,87	1,98
39,70	2,99	0,00	22,89	1,35	7,48	2,85	2,03
39,87	2,97	0,00	23,09	1,33	7,30	2,85	2,04
40,03	2,94	0,00	23,14	1,32	7,16	2,84	2,04
40,20	2,94	0,00	23,15	1,32	7,16	2,83	2,04
40,37	2,94	0,00	23,37	1,33	7,16	2,80	2,04
40,53	2,94	0,00	23,66	1,34	7,16	2,76	2,03
40,70	2,93	0,00	23,54	1,34	7,16	2,73	2,03
40,87	2,93	0,00	23,52	1,35	7,16	2,71	2,03
41,03	2,93	0,00	23,52	1,35	7,16	2,68	2,03
41,20	2,93	0,00	23,57	1,35	7,16	2,62	2,04
41,37	2,93	0,00	23,55	1,35	7,16	2,57	2,06
41,53	2,93	0,00	23,55	1,33	7,16	2,55	2,07
41,70	2,91	0,00	23,32	1,31	7,16	2,44	2,08
41,87	2,90	0,00	23,19	1,30	7,16	2,37	2,08
42,03	2,89	0,00	23,19	1,29	7,16	2,28	2,09
42,20	2,86	0,00	23,19	1,30	7,07	2,19	2,08
42,37	2,88	0,00	23,22	1,31	7,16	2,06	2,11
42,53	2,87	0,00	23,19	1,32	7,16	1,92	2,11
42,70	2,87	0,00	23,22	1,32	7,20	1,76	2,14
42,87	2,85	0,00	23,24	1,31	7,26	1,56	2,14
43,03	2,82	0,00	23,05	1,29	7,26	1,39	2,15
43,20	2,79	0,00	23,23	1,25	7,26	1,18	2,17
43,37	2,76	0,00	23,24	1,21	7,26	0,98	2,18
43,53	2,70	0,00	23,24	1,17	7,26	0,78	2,16
43,70	2,62	0,00	23,26	1,11	7,07	0,58	2,14
43,87	2,51	0,00	23,28	1,04	6,92	0,40	2,08
44,03	2,41	0,00	23,12	0,98	6,69	0,22	2,03

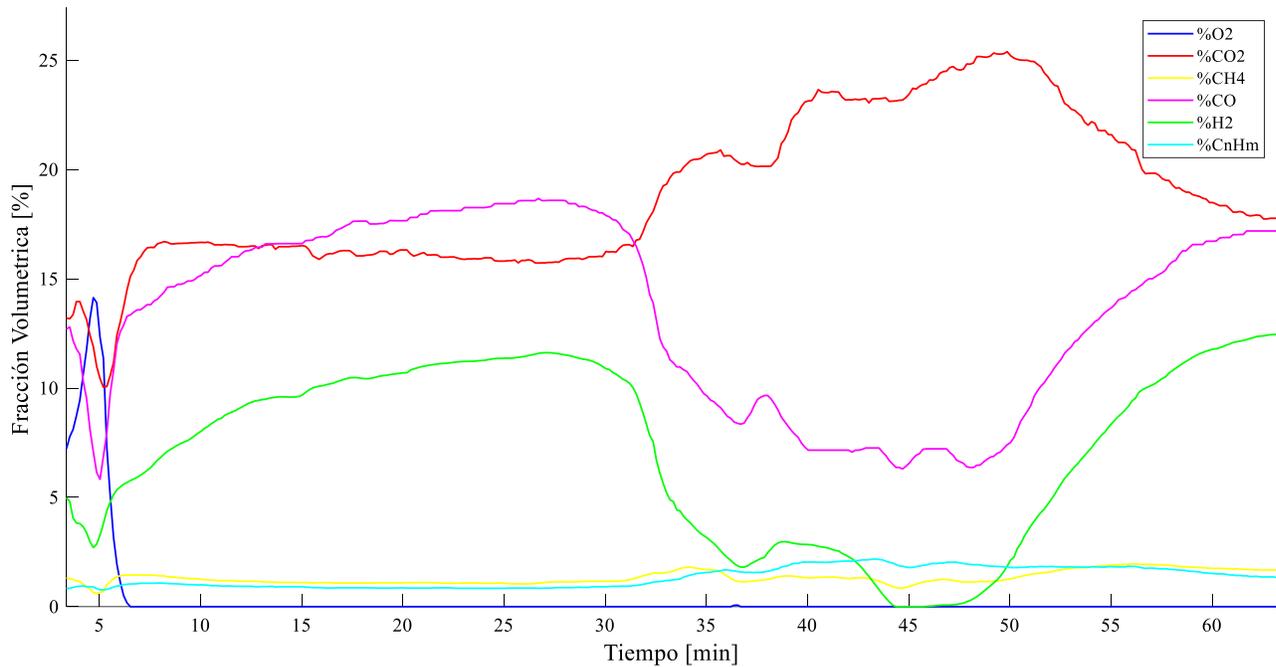


Figura 26. Análisis de gases para la cuarta experiencia.

### ○ Post-procesamiento

Empleando la (15) se obtiene el PCI del gas generado durante todo el experimento. En la Figura 27 se muestra el PCI del gas generado en  $[\text{MJ}/\text{m}^3]$ . La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

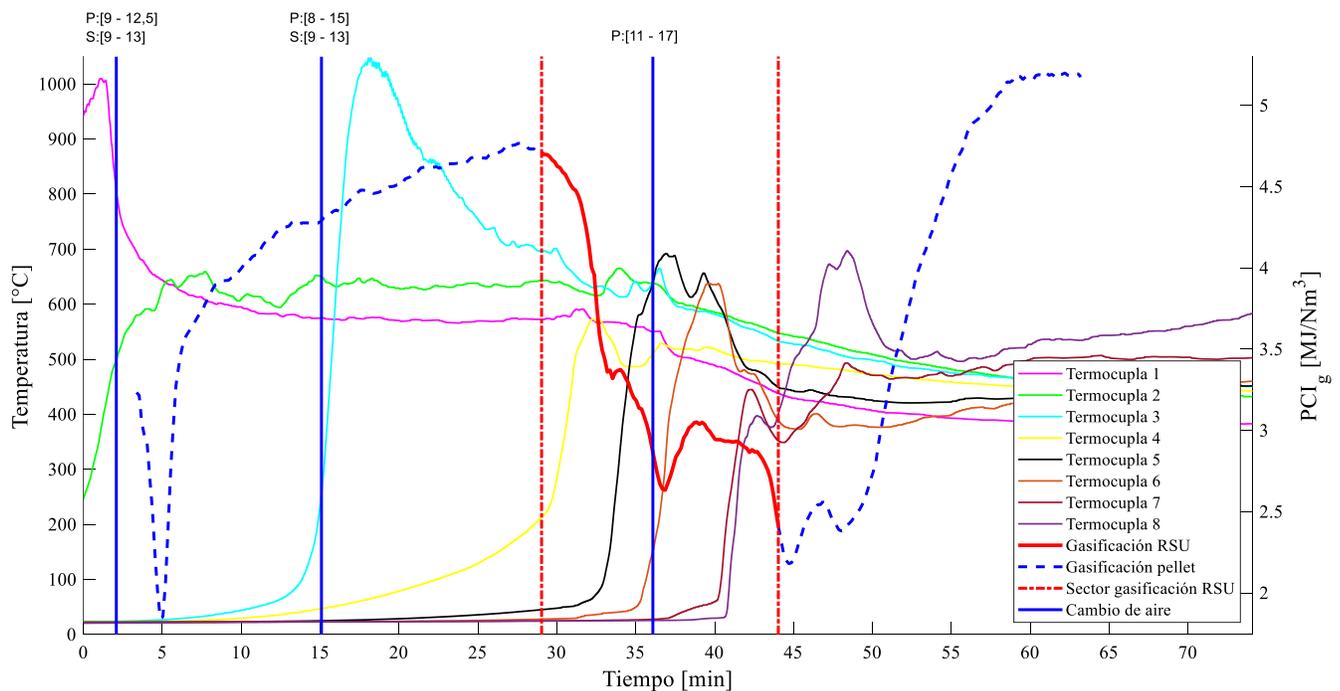


Figura 27. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 4.

- **Experiencia 5**

- **Mediciones**

En la Tabla 29 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor.

Tabla 29. Valores másicos para el quinto experimento.

Parámetro	Valor
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	3,3
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	3,0
Masa de materia orgánica [kg]	2,0
Masa de cartón [kg]	0,49
Masa de plástico [kg]	0,268
Masa de madera [kg]	0,135
Masa de goma [kg]	0,135
Masa de textiles [kg]	0,075

En la Tabla 30 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 30. Flujo de aire ingresados al gasificador para el quinto ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
18:28:00	Principal	8 – 12
	Secundario	7 – 9
18:58:00	Principal	7 – 15
	Secundario	0
19:11:00	Principal	14 – 19
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 31 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 28 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 31. Análisis de gases en intervalo estable para la quinta experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
25,0	4,81	0,00	15,97	1,15	18,22	11,92	0,94
25,1	4,82	0,00	15,99	1,16	18,22	11,95	0,94
25,3	4,84	0,00	15,98	1,16	18,32	11,95	0,96
25,5	4,85	0,00	15,98	1,16	18,37	12,01	0,96
25,6	4,86	0,00	15,99	1,16	18,37	12,04	0,96
25,8	4,86	0,00	15,99	1,16	18,37	12,07	0,96
26,0	4,86	0,00	15,87	1,16	18,37	12,09	0,96
26,1	4,87	0,00	15,89	1,16	18,37	12,11	0,96
26,3	4,89	0,00	15,88	1,16	18,52	12,13	0,96
26,5	4,89	0,00	15,88	1,16	18,52	12,14	0,96

26,6	4,90	0,00	15,88	1,17	18,53	12,14	0,96
26,8	4,90	0,00	15,89	1,18	18,53	12,13	0,96
27,0	4,90	0,00	15,78	1,19	18,54	12,11	0,95
27,1	4,90	0,00	15,77	1,2	18,54	12,08	0,95
27,3	4,88	0,00	15,78	1,2	18,38	12,04	0,97
27,5	4,88	0,00	15,87	1,21	18,38	12	0,97
27,6	4,87	0,00	16,01	1,21	18,37	11,94	0,97
27,8	4,86	0,00	16,08	1,21	18,37	11,88	0,97
28,0	4,87	0,00	15,97	1,22	18,38	11,8	0,99
28,1	4,86	0,00	15,96	1,23	18,38	11,7	0,99
28,3	4,83	0,00	15,98	1,24	18,26	11,57	0,98
28,5	4,81	0,00	16,11	1,26	18,23	11,42	0,98
28,6	4,80	0,00	16,12	1,29	18,14	11,27	0,99
28,8	4,77	0,00	16,21	1,32	17,9	11,1	1
29,0	4,73	0,00	16,43	1,34	17,62	10,96	1,02
29,1	4,69	0,00	16,45	1,37	17,29	10,86	1,03
29,3	4,70	0,00	16,66	1,42	17,18	10,81	1,04
29,5	4,67	0,00	16,69	1,44	16,89	10,69	1,07
29,6	4,69	0,00	16,89	1,48	16,88	10,6	1,09
29,8	4,67	0,00	17,03	1,51	16,73	10,51	1,09
30,0	4,67	0,00	17,17	1,55	16,71	10,35	1,1
30,1	4,67	0,00	17,24	1,58	16,56	10,17	1,16
30,3	4,66	0,00	17,5	1,6	16,42	10,09	1,17
30,5	4,64	0,00	17,65	1,68	16,14	9,81	1,21
30,6	4,64	0,00	17,69	1,69	16,01	9,74	1,24
30,8	4,63	0,00	17,98	1,82	15,57	9,48	1,29
31,0	4,60	0,00	18,14	1,88	15,22	9,28	1,33
31,1	4,58	0,00	18,46	1,95	14,73	9,05	1,39
31,3	4,57	0,00	18,71	1,99	14,57	8,84	1,43
31,5	4,50	0,00	19,07	2,02	14,02	8,57	1,48
31,6	4,46	0,00	19,65	2,05	13,66	8,33	1,52
31,8	4,44	0,00	19,75	2,06	13,47	8,14	1,56
32,0	4,41	0,00	19,88	2,08	13,14	7,9	1,62
32,1	4,39	0,00	20,22	2,08	13,01	7,65	1,67
32,3	4,37	0,00	20,43	2,09	12,86	7,41	1,72
32,5	4,36	0,00	20,42	2,11	12,74	7,18	1,77
32,6	4,32	0,00	20,63	2,14	12,51	6,87	1,8
32,8	4,30	0,00	20,79	2,15	12,36	6,52	1,87
33,0	4,30	0,00	20,84	2,16	12,28	6,41	1,89
33,1	4,20	0,00	21,02	2,14	12,03	5,69	1,95
33,3	4,14	0,00	21,21	2,13	11,81	5,26	2
33,5	4,04	0,00	21,44	2,09	11,48	4,8	2,03
33,6	3,98	0,00	21,67	2,08	11,31	4,37	2,06
33,8	3,92	0,00	21,93	2,07	11,15	3,99	2,08
34,0	3,86	0,00	22,15	2,05	10,96	3,66	2,11
34,1	3,82	0,00	22,49	2,04	10,76	3,42	2,15
34,3	3,81	0,00	22,49	2,04	10,71	3,23	2,18

34,5	3,76	0,00	22,65	2,02	10,44	3,1	2,19
34,6	3,71	0,00	22,73	2	10,2	3,03	2,2
34,8	3,66	0,00	22,79	1,97	9,86	3	2,21
35,0	3,62	0,00	22,8	1,93	9,65	3	2,22
35,1	3,60	0,00	22,84	1,88	9,5	3	2,24
35,3	3,52	0,00	22,84	1,81	9,14	3	2,23
35,5	3,45	0,00	23,04	1,73	8,92	2,98	2,22
35,6	3,37	0,00	23,09	1,65	8,68	2,95	2,19
35,8	3,30	0,00	22,92	1,57	8,54	2,89	2,17
36,0	3,24	0,00	22,96	1,5	8,47	2,8	2,15
36,1	3,15	0,00	22,98	1,44	8,21	2,7	2,12
36,3	3,11	0,00	22,8	1,38	8,19	2,6	2,12
36,5	3,01	0,00	22,82	1,34	7,88	2,51	2,06
36,6	2,97	0,00	22,87	1,3	7,82	2,42	2,04
36,8	2,92	0,00	22,89	1,28	7,72	2,32	2,02
37,0	2,90	0,00	22,9	1,27	7,72	2,2	2,01
37,1	2,85	0,00	22,91	1,25	7,61	2,05	2
37,3	2,80	0,00	22,93	1,24	7,48	1,92	1,98
37,5	2,77	0,00	23,1	1,21	7,4	1,76	1,99
37,6	2,71	0,00	23,15	1,2	7,19	1,73	1,96
37,8	2,68	0,00	23,15	1,15	7,12	1,57	1,99
38,0	2,63	0,00	23,16	1,13	7,11	1,5	1,93
38,1	2,61	0,00	23,17	1,11	7,02	1,46	1,94
38,3	2,59	0,00	23,17	1,09	7,02	1,42	1,92
38,5	2,57	0,00	23,27	1,08	7,02	1,36	1,92
38,6	2,57	0,00	23,34	1,07	7,02	1,33	1,93
38,8	2,57	0,00	23,24	1,05	7,02	1,29	1,94
39,0	2,55	0,00	23,2	1,04	7,02	1,24	1,93
39,1	2,53	0,00	23,24	1,04	7,02	1,21	1,91
39,3	2,53	0,00	23,24	1,03	6,96	1,19	1,92
39,5	2,52	0,00	23,47	1,03	6,93	1,19	1,92
39,6	2,52	0,00	23,49	1,03	6,93	1,2	1,92
39,8	2,52	0,00	23,49	1,03	6,93	1,21	1,92
40,0	2,53	0,00	23,49	1,04	6,93	1,2	1,92
40,1	2,52	0,00	23,59	1,04	6,93	1,18	1,92
40,3	2,54	0,00	23,68	1,05	6,93	1,16	1,94
40,5	2,55	0,00	23,71	1,07	6,93	1,14	1,95
40,6	2,56	0,00	23,71	1,08	6,93	1,1	1,97
40,8	2,56	0,00	23,71	1,1	6,93	1,04	1,98
41,0	2,57	0,00	23,71	1,11	6,93	0,99	2
41,1	2,58	0,00	23,89	1,1	6,93	0,83	2,05
41,3	2,55	0,00	23,92	1,08	6,92	0,67	2,06
41,5	2,51	0,00	23,93	1,05	6,77	0,48	2,08
41,6	2,48	0,00	23,81	1,03	6,68	0,33	2,09
41,8	2,43	0,00	23,81	1,01	6,64	0,2	2,06
42,0	2,38	0,00	23,83	0,99	6,53	0,1	2,04
42,1	2,34	0,00	23,86	0,97	6,42	0,01	2,02

42,3	2,33	0,00	23,86	0,96	6,39	0,00	2,02
42,5	2,31	0,00	23,92	0,95	6,35	0,00	2
42,6	2,30	0,00	24,06	0,93	6,29	0,00	2,01
42,8	2,28	0,00	24,08	0,92	6,29	0,00	1,98
43,0	2,26	0,00	24,09	0,91	6,23	0,00	1,96
43,1	2,24	0,00	23,92	0,9	6,21	0,00	1,94
43,3	2,23	0,00	23,92	0,89	6,21	0,00	1,94
43,5	2,21	0,00	23,96	0,89	6,17	0,00	1,9
43,6	2,20	0,00	23,93	0,89	6,12	0,00	1,9
43,8	2,21	0,00	23,93	0,89	6,19	0,00	1,9
44,0	2,23	0,00	24,15	0,93	6,35	0,00	1,88
44,1	2,29	0,00	24,07	0,96	6,59	0,15	1,87
44,3	2,33	0,00	23,92	1,01	6,71	0,35	1,84
44,5	2,41	0,00	23,91	1,04	6,91	0,56	1,86
44,6	2,47	0,00	23,9	1,07	7,07	0,74	1,87
44,8	2,55	0,00	24,06	1,11	7,31	0,98	1,87
45,0	2,61	0,00	24,05	1,14	7,47	1,19	1,87
45,1	2,68	0,00	24,04	1,18	7,75	1,4	1,87
45,3	2,77	0,00	24	1,23	7,94	1,62	1,9
45,5	2,87	0,00	24,11	1,3	8,15	1,9	1,92
45,6	2,99	0,00	24,18	1,36	8,52	2,18	1,94
45,8	3,11	0,00	24,15	1,42	8,82	2,43	1,99
46,0	3,20	0,00	24,13	1,48	9,09	2,73	1,98
46,1	3,33	0,00	24,11	1,52	9,45	3,03	2,03
46,3	3,44	0,00	24,08	1,56	9,72	3,36	2,05
46,5	3,52	0,00	24,11	1,59	9,92	3,68	2,07
46,6	3,62	0,00	23,91	1,62	10,31	3,97	2,07
46,8	3,73	0,00	23,85	1,64	10,68	4,31	2,09
47,0	3,82	0,00	23,72	1,67	10,96	4,6	2,1
47,1	3,91	0,00	23,43	1,69	11,29	4,96	2,09
47,3	3,98	0,00	23,27	1,71	11,52	5,26	2,08
47,5	4,05	0,00	23,11	1,72	11,72	5,58	2,08
47,6	4,11	0,00	23	1,73	12,12	5,63	2,08
47,8	4,22	0,00	22,67	1,73	12,4	6,22	2,08
48,0	4,30	0,00	22,48	1,74	12,77	6,55	2,05
48,1	4,37	0,00	22,4	1,75	13,09	6,8	2,04
48,3	4,44	0,00	22,27	1,75	13,34	7,09	2,04
48,5	4,48	0,00	22,07	1,76	13,57	7,31	2
48,6	4,51	0,00	21,86	1,76	13,77	7,39	1,99

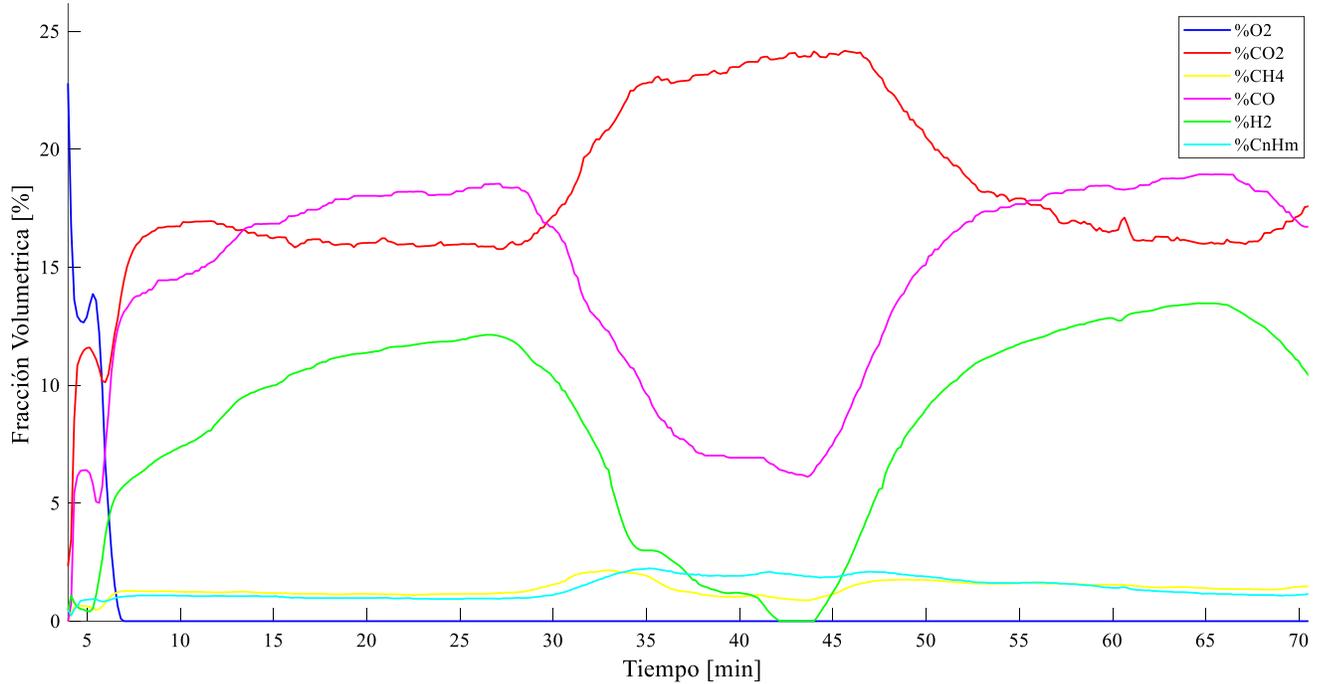


Figura 28. Análisis de gases para la quinta experiencia.

### ○ Post-procesamiento

Empleando la (15) se obtiene el PCI del gas generado durante todo el experimento. En la Figura 29 se muestra el PCI del gas generado en [MJ/m<sup>3</sup>]. La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

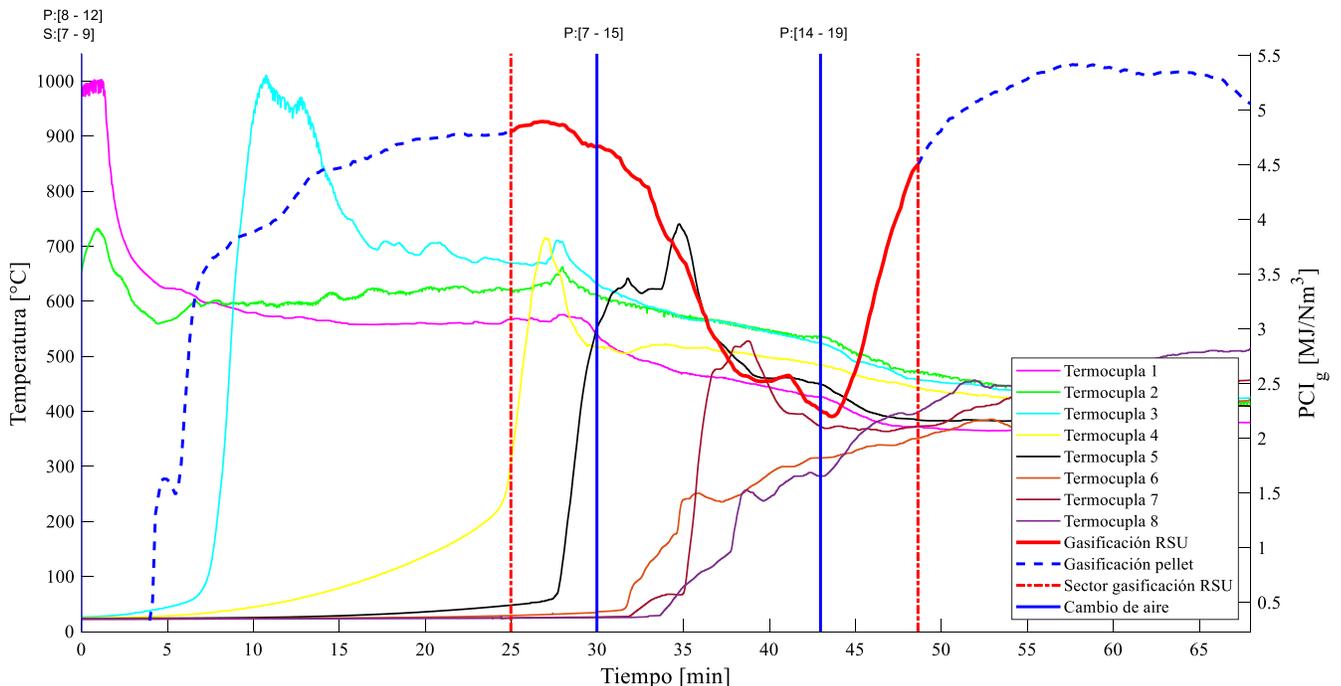


Figura 29. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 5.

- **Experiencia 6**

- **Mediciones**

En la Tabla 32 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor.

Tabla 32. Valores másicos para el sexto experimento.

Parámetro	Valor
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	3,3
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	3,0
Masa de materia orgánica [kg]	2,0
Masa de cartón [kg]	0,49
Masa de plástico [kg]	0,268
Masa de madera [kg]	0,135
Masa de goma [kg]	0,135
Masa de textiles [kg]	0,075

En la Tabla 33 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 33. Flujo de aire ingresados al gasificador para el sexto ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
10:52:00	Principal	12– 15
	Secundario	15 – 18,5
11:10:00	Principal	14 – 17
	Secundario	11 – 15
11:20:00	Principal	17– 19
	Secundario	0

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 34 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 30 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 34. Análisis de gases en intervalo estable para la sexta experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
29,73	3,37	0,00	17,50	0,90	13,90	6,48	0,77
29,90	3,38	0,00	17,55	0,91	13,90	6,48	0,77
30,07	3,38	0,00	17,66	0,91	13,90	6,47	0,77
30,23	3,37	0,00	17,66	0,91	13,91	6,42	0,77
30,40	3,37	0,00	17,66	0,91	13,91	6,37	0,78
30,57	3,37	0,00	17,68	0,92	13,91	6,31	0,79
30,73	3,37	0,00	17,80	0,93	13,91	6,27	0,78
30,90	3,34	0,00	17,94	0,94	13,68	6,23	0,78
31,07	3,34	0,00	18,01	0,94	13,65	6,22	0,79
31,23	3,34	0,00	18,02	0,95	13,65	6,18	0,80

31,40	3,33	0,00	18,03	0,97	13,52	6,15	0,81
31,57	3,32	0,00	18,05	0,97	13,43	6,09	0,82
31,73	3,30	0,00	18,18	0,98	13,40	5,96	0,81
31,90	3,27	0,00	18,23	0,98	13,30	5,81	0,81
32,07	3,25	0,00	18,23	0,98	13,27	5,67	0,82
32,23	3,21	0,00	18,35	0,98	13,08	5,47	0,83
32,40	3,15	0,00	18,41	0,99	12,80	5,27	0,83
32,57	3,10	0,00	18,47	0,99	12,58	5,07	0,83
32,73	3,07	0,00	18,60	1,01	12,42	4,88	0,85
32,90	3,04	0,00	18,63	1,03	12,31	4,69	0,84
33,07	2,97	0,00	18,81	1,08	11,92	4,52	0,82
33,23	2,96	0,00	18,83	1,13	11,75	4,34	0,84
33,40	2,96	0,00	18,93	1,19	11,55	4,20	0,87
33,57	2,97	0,00	19,03	1,26	11,48	4,02	0,89
33,73	2,98	0,00	19,22	1,33	11,43	3,86	0,92
33,90	2,98	0,00	19,36	1,39	11,27	3,67	0,95
34,07	3,00	0,00	19,37	1,45	11,20	3,50	1,00
34,23	3,00	0,00	19,54	1,49	11,12	3,29	1,04
34,40	3,00	0,00	19,57	1,53	11,02	3,13	1,07
34,57	3,02	0,00	19,77	1,60	10,86	2,89	1,13
34,73	3,04	0,00	19,77	1,64	10,83	2,73	1,19
34,90	3,07	0,00	19,93	1,68	10,78	2,58	1,26
35,07	3,06	0,00	19,94	1,70	10,72	2,47	1,27
35,23	3,09	0,00	20,10	1,73	10,47	2,27	1,39
35,40	3,06	0,00	20,18	1,72	10,32	2,11	1,42
35,57	3,05	0,00	20,35	1,71	10,09	1,97	1,49
35,73	3,00	0,00	20,37	1,67	9,93	1,81	1,51
35,90	2,95	0,00	20,37	1,64	9,68	1,68	1,52
36,07	2,90	0,00	20,55	1,60	9,45	1,56	1,54
36,23	2,84	0,00	20,57	1,56	9,16	1,43	1,55
36,40	2,79	0,00	20,62	1,52	8,95	1,31	1,57
36,57	2,75	0,00	20,78	1,48	8,83	1,23	1,58
36,73	2,70	0,00	20,82	1,44	8,62	1,15	1,57
36,90	2,66	0,00	20,94	1,41	8,45	1,08	1,58
37,07	2,62	0,00	20,82	1,38	8,40	1,02	1,56
37,23	2,60	0,00	20,70	1,35	8,35	0,97	1,57
37,40	2,56	0,00	20,73	1,33	8,08	0,95	1,58
37,57	2,56	0,00	20,74	1,31	8,06	0,93	1,59
37,73	2,53	0,00	20,76	1,30	7,86	0,93	1,59
37,90	2,53	0,00	20,62	1,30	7,77	0,97	1,60
38,07	2,53	0,00	20,62	1,30	7,64	1,02	1,62
38,23	2,56	0,00	20,67	1,32	7,66	1,08	1,65

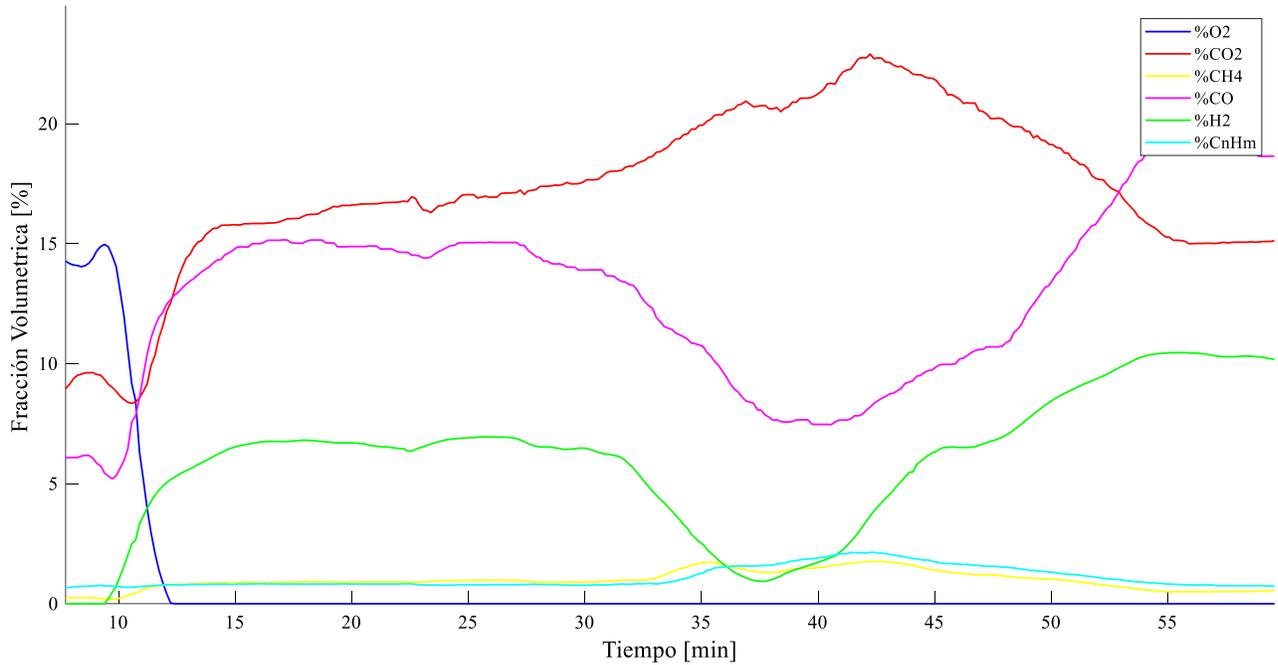


Figura 30. Análisis de gases para la sexta experiencia.

### ○ Post-procesamiento

Empleando la (15) se obtiene el PCI del gas generado durante todo el experimento. En la Figura 31 se muestra el PCI del gas generado en  $[MJ/m^3]$ . La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

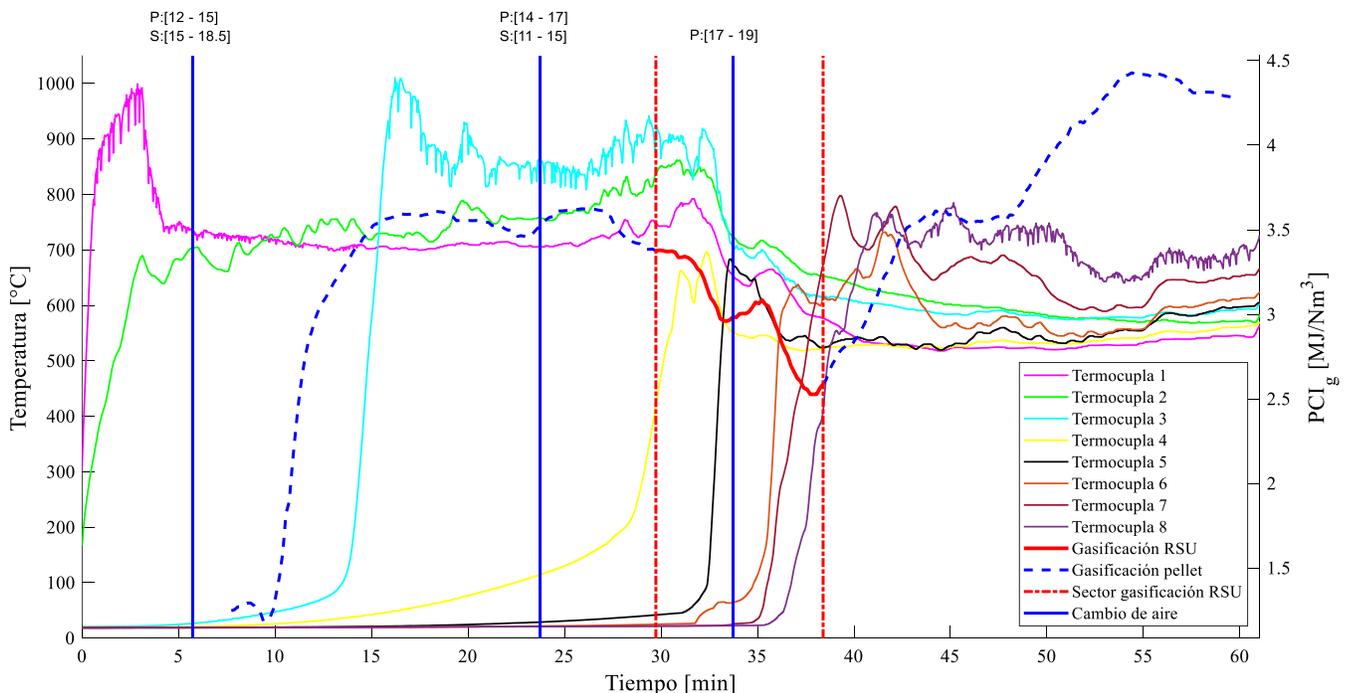


Figura 31 PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 6.

- **Experiencia 7**

- **Mediciones**

En la Tabla 35 se muestra el contenido másico que ingreso al reactor.

Tabla 35. Valores másicos para el séptimo experimento.

Parámetro	Valor
Masa de pellet parte inferior del reactor [kg]	3,3
Masa de pellet parte superior del reactor [kg]	3,0
Masa de materia orgánica [kg]	2,0
Masa de cartón [kg]	0,49
Masa de plástico [kg]	0,268
Masa de madera [kg]	0,135
Masa de goma [kg]	0,135
Masa de textiles [kg]	0,075

En la Tabla 36 se muestra el aire implementado y el tiempo el cual se aplicó. El intervalo de flujo de aire mostrado en la tabla es debido a que el instrumento de medición presenta muchas variaciones en el rango de tiempo de medición.

Tabla 36. Flujo de aire ingresados al gasificador para el séptimo ensayo.

Tiempo de cambio de flujo	Cauce	Intervalo de flujo* [-]
13:03:00	Principal	14– 15
	Secundario	13 – 17
13:13:00	Principal	14 – 15
	Secundario	13 – 15
13:17:00	Principal	14 – 15
	Secundario	12 – 15

\*Los valores mostrados son referenciales y son utilizados con fines de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de manera práctica.

En la Tabla 37 se muestra los datos cuando se logra estabilizar el gas y en la Figura 32 se muestran el registro de la composición del gas generado para toda la experiencia.

Tabla 37. Análisis de gases en intervalo estable para la séptima experiencia.

Time [min]	PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> [%]
23,00	2,28	0,00	19,84	0,82	10,13	2,71	0,74
23,17	2,29	0,00	19,70	0,89	9,98	2,59	0,76
23,33	2,31	0,00	19,87	0,97	9,90	2,45	0,80
23,50	2,36	0,00	19,89	1,07	9,90	2,34	0,84
23,67	2,46	0,00	20,15	1,22	10,03	2,25	0,91
23,83	2,53	0,00	20,12	1,29	10,16	2,20	0,97
24,00	2,68	0,00	20,35	1,41	10,49	2,18	1,08
24,17	2,77	0,00	20,28	1,53	10,66	2,20	1,13
24,33	2,86	0,00	20,28	1,56	10,84	2,21	1,22
24,50	3,00	0,00	20,34	1,73	11,08	2,29	1,30

24,67	3,15	0,00	20,35	1,82	11,40	2,35	1,43
24,83	3,27	0,00	20,65	1,90	11,61	2,41	1,52
25,00	3,36	0,00	20,69	1,95	11,80	2,46	1,61
25,17	3,45	0,00	20,68	2,03	11,85	2,52	1,69
25,33	3,51	0,00	20,88	2,06	11,84	2,57	1,76
25,50	3,58	0,00	20,89	2,10	11,84	2,60	1,86
25,67	3,61	0,00	21,08	2,16	11,84	2,59	1,88
25,83	3,68	0,00	21,10	2,17	11,84	2,53	2,00
26,00	3,67	0,00	21,10	2,16	11,81	2,42	2,03
26,17	3,68	0,00	21,10	2,14	11,70	2,33	2,09
26,33	3,58	0,00	21,16	2,04	11,32	2,08	2,12
26,50	3,52	0,00	21,04	1,98	11,08	1,90	2,14
26,67	3,43	0,00	21,03	1,87	10,72	1,70	2,16
26,83	3,26	0,00	20,95	1,76	10,11	1,51	2,11
27,00	3,15	0,00	20,98	1,64	9,66	1,35	2,11
27,17	2,97	0,00	20,89	1,49	9,11	1,18	2,05
27,33	2,80	0,00	20,95	1,40	8,44	1,06	1,97
27,50	2,65	0,00	20,91	1,29	7,91	0,93	1,92
27,67	2,51	0,00	20,88	1,19	7,48	0,78	1,86

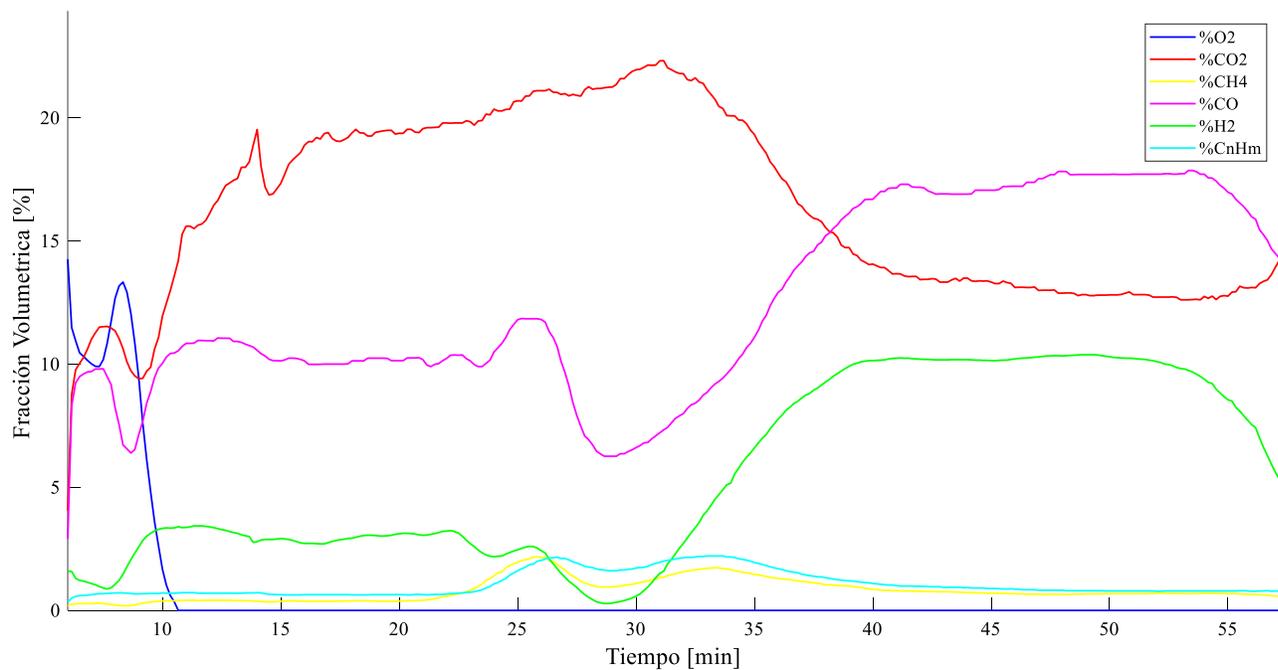


Figura 32. Análisis de gases para la séptima experiencia.

#### ○ Post-procesamiento

Empleando la (15) se obtiene el PCI del gas generado durante todo el experimento. En la Figura 33 se muestra el PCI del gas generado en  $[MJ/m^3]$ . La curva roja continua presenta la gasificación de los RSU en el intervalo de tiempo durante ocurre la gasificación de RSU y la curva azul segmentada cuando se da a lugar la gasificación del pellet. Las líneas verticales rojas segmentadas indican el intervalo de la gasificación de los RSU y las líneas verticales azules indican cuando se cambia el aire al interior del reactor.

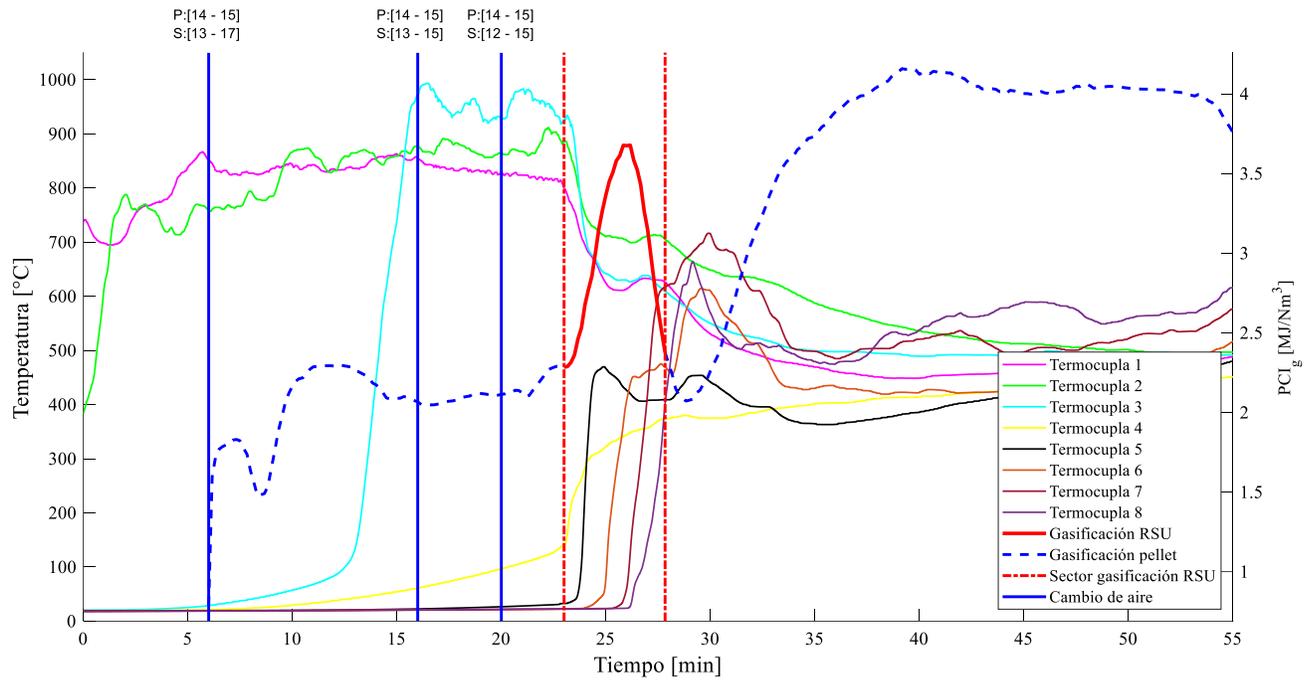


Figura 33. PCI del gas y temperatura al interior del equipo para el experimento 7.