



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL FLUJO DE AIRE EN
EL PODER CALORÍFICO DEL GAS DE SÍNTESIS PRODUCTO DE LA
GASIFICACIÓN DE RSU Y BIOMASA DE UN REACTOR DE CORRIENTE
ASCENDENTE (UPDRAFT) MODIFICADO**

POR

Sebastián Fernando Yáñez Sepúlveda

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesora Guía:
Dra. Einará Blanco Machin

Marzo 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Sebastián Yáñez Sepúlveda

© 2023 Sebastián Yáñez Sepúlveda

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Comenzar agradeciéndote a ti Daniel, por tu apoyo, por el trabajo en equipo y por guiarme en este proyecto.

Quiero destacar a mi profesora guía, Dra. Einara Blanco Machin, no solo por sus enseñanzas, por sus consejos y por sus orientaciones en el proyecto. Agradecerle por su calidez humana, por su buena voluntad en todo momento y por siempre recibirme con una sonrisa a lo largo de este período.

Y por supuesto y más importante, las gracias infinitas a mis padres, por haberme dado todo lo que un joven podría necesitar, eso y mucho más...

Resumen

Actualmente, existe un constante incremento en la generación de residuos a nivel mundial como nacional debido al crecimiento del sector urbano. La mala gestión de los residuos genera graves impactos medio ambientales, sociales y económicos. Esto genera la necesidad de implementar un plan de acción para mitigar estos daños. Por lo anterior, se propone la gasificación de RSM como un método de valorización de residuos para mermar los impactos negativos provocados por esta problemática.

El objetivo de este proyecto es evaluar experimentalmente el PCI del gas de síntesis producto de la gasificación de RSU y biomasa en función del flujo de aire, utilizando un reactor de corriente ascendente modificado. Con esto, se busca poder establecer la viabilidad de utilizar energéticamente los RSM de la región. Lo anterior, bajo la hipótesis que mediante un procedimiento de acondicionamiento y bajo determinadas condiciones del proceso es posible valorizar energéticamente RSU mediante la gasificación.

La primera etapa del proyecto consiste en el estudio de antecedentes y de la literatura, para determinar los parámetros y eficiencias de la gasificación. En base a esto, se estima el potencial energético que implica el uso de RSM de la octava región y eventualmente, la viabilidad económica de una central de gasificación. En una segunda etapa experimental, se realizan los ensayos de gasificación. Para esto, se preparan diferentes muestras de combustible en base de RSU.

En la primera etapa, una estimación conservadora entrega un aporte del 11,74% del consumo eléctrico de los habitantes de la región y se demuestra que una central de gasificación es económicamente viable para una capacidad de tratamiento igual o superior a 150 ($\text{ton}_{\text{RSM}}/\text{día}$). En la etapa experimental, se logra gasificar los residuos, obteniendo un PCI acorde a lo estudiado en la literatura, con un valor promedio de 4,25 (MJ/Nm^3).

Finalmente, el análisis de resultados prevé que la gasificación de los RSU no se desarrolla por completo al interior del reactor durante los periodos estudiados, y se estima que es posible mejorar los resultados. Por ende, será necesario un rediseño del sistema de alimentación del reactor para mantener una carga constante y poder completar el proceso de gasificación durante el desarrollo de los próximos proyectos. Además, se recomienda la instalación de una placa de orificio en la salida de los gases para calcular la eficiencia del gas frío, y así realizar un estudio de la implementación del reactor a gran escala.

Abstract

Currently, there is a constant increase in the generation of waste worldwide and nationally due to the increase in the urban sector. The bad management of the waste generates serious environmental, social and economic impacts. This generates the need to implement an action plan to mitigate these damages. MSW gasification is proposed as a waste recovery method to solve and reduce the negative impacts caused by this problem.

The objective of this project is to experimentally evaluate the LCV of the synthesis gas product of the gasification of MSW and biomass as a function of the air flow, using a modified updraft reactor. With this, it seeks to establish the feasibility of using the MSW in the region for energy. The foregoing, under the hypothesis that through a conditioning procedure and under certain conditions of the process it is possible to valorize MSW energetically through gasification.

The first stage of the project consists of the background and literature study, in which the parameters and efficiencies of this process are determined. Based on this, the energy potential implied by the use of MSW from the eighth region is estimated, and eventually, the economic viability of a gasification plant. In a second experimental stage, the gasification tests are carried out. For this, different fuel samples are prepared based on MSW.

In the first stage, a conservative estimate provides a contribution of 11.74% of the electricity consumption of the inhabitants of the region and it is shown that a gasification plant is economically viable for a treatment capacity equal to or greater than 150 (ton_{MSW}/day). In the experimental stage, it is possible to gasify the waste, obtaining a LCV according to that studied in the literature, with an average value of 4.25 (MJ/Nm³).

Finally, the analysis of results predicts that the gasification of the MSW does not fully develop inside the reactor during the periods studied, and it is estimated that it is possible to improve the results. Therefore, a redesign of the reactor's feeding system will be necessary to maintain a constant load and be able to complete the gasification process during the development of the next projects. In addition, the installation of an orifice plate at the gas outlet is recommended to calculate the cold gas efficiency, and be able carry out a study of the implementation of the large-scale reactor.

Tabla de Contenidos

Resumen	i
Abstract	ii
Tabla de Contenidos	iii
Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	vii
Glosario	viii
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Descripción del Problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Hipótesis de trabajo	2
1.4 Metodología.....	2
CAPÍTULO 2: Contexto	4
2.1 Generación de residuos a nivel nacional	4
2.2 Generación de Residuos a nivel regional	6
2.3 Plan de Acción.....	6
2.4 Situación en la Región del Biobío	8
2.5 Oportunidades a nivel nacional	9
CAPÍTULO 3: Estado del Arte	10
3.1 Residuos a Energía (Waste to Energy)	10
3.2 Gasificación.....	11
3.3 Comparación de gasificación y combustión de RSM.....	15
3.4 Proyectos relevantes	15
CAPÍTULO 4: Estimación del Potencial Energético.....	18
4.1 Caracterización de los combustibles.....	18
4.2 Procedimiento de cálculo de la energía disponible en los residuos.....	20
4.3 Procedimiento de cálculo de la energía en el gas de síntesis.....	22
4.4 Procedimiento de cálculo de la Potencia Eléctrica disponible	22
4.5 Potencial Energético en la región del Biobío en base de RSM	22
CAPÍTULO 5: Etapa Experimental	24
5.1 Gasificador.....	24
5.2 Tratamiento de Residuos	26
5.3 Ensayos Experimentales	30

CAPÍTULO 6: Resultados de ensayos experimentales.....	34
6.1 Presentación de resultados.....	34
6.2 Análisis de resultados	43
6.3 Análisis del combustible auxiliar	49
CAPÍTULO 7: Análisis Económico Preliminar.....	50
7.1 Costo de Inversión.....	50
7.2 Costos de operación y mantención	51
7.3 Variables económicas	51
7.4 Caso de estudio.....	51
7.5 Análisis de Sensibilidad.....	52
CAPÍTULO 8: Conclusiones	55
8.1 Conclusiones.....	55
8.2 Perspectivas	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS.....	60

Lista de Figuras

Figura 2.1: Valorización de Residuos No peligrosos en 2019 (Fuente [2]).....	4
Figura 2.2: Valorización de residuos sólidos municipales por tipo, 2019. (Fuente [2])	5
Figura 2.3: Patrones actuales de la actividad económica lineal a nivel mundial. (Fuente [1])	7
Figura 4.1: Estimación de la Potencia Energética producto de la gasificación de RSM	18
Figura 4.2: Composición porcentual de los RSDyA de la comuna de Concepción (Fuente: [22]) ..	19
Figura 4.3: Plásticos presentes en los RSD de la región metropolitana.	20
Figura 5.1: Esquema del Sistema (Fuente [4]).....	24
Figura 5.2: Sistema en funcionamiento.....	25
Figura 5.3: Esquema del reactor del gasificador.	26
Figura 5.4: Tratamiento de residuos secos	28
Figura 5.5: Tratamiento de residuos de materia orgánica	29
Figura 5.6: Distribución de combustible para Ensayo N°1	30
Figura 5.7: Carga de combustible a base de residuos ensayo 1	30
Figura 5.8: Distribución de combustible para gasificación de residuos secos	31
Figura 5.9: Quemado del gas de síntesis generado en la gasificación de residuos secos.....	31
Figura 5.10: Carga de combustible a base de RSU para ensayos finales	32
Figura 5.11: Distribución de combustible para gasificación de RSU	33
Figura 5.12: Quemado del gas de síntesis generado en la gasificación de RSU.....	33
Figura 6.1: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°1.	34
Figura 6.2: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°2.	35
Figura 6.3: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 2.	35
Figura 6.4: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°3.	36
Figura 6.5: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 3.	36
Figura 6.6: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°4.	37
Figura 6.7: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 4.	37
Figura 6.8: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°5.	38
Figura 6.9: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 5.	39
Figura 6.10: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°6.	39
Figura 6.11: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 6.	40
Figura 6.12: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°7.	40
Figura 6.13: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 7.	41
Figura 6.14: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°8.	42
Figura 6.15: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 8.	42
Figura 6.16: Etapas del proceso de gasificación al interior del reactor.....	43
Figura 6.17: Comparación de la composición de los gases resultantes en ensayos finales	46
Figura 6.18: Volumen de aire durante los ensayos finales.....	47
Figura 7.1: Costos de Inversión para sistema de gasificación.....	50
Figura 7.2: Análisis de sensibilidad con respecto a la capacidad de tratamiento de RSM a diario. .	53

Figura 7.3: Análisis de sensibilidad con respecto a la CGE para una planta de capacidad 300 (ton/día).	53
Figura A.1: Resultados del cálculo del potencial energético	61
Figura A.2: Resultados del bance másico de Ensayo N°5.	64
Figura A.3: Periodos de cálculo de PCI en periodo de gasificación de RSU.	65
Figura A.4: Periodos de cálculo de PCI en periodo de gasificación de Pellet.	65
Figura A.5: Resultados del cálculo del Factor de Emisión.	68
Figura A.6: Resultados de cálculos para costos de inversión.	69

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Residuos municipales generados por región.....	6
Tabla 2.2: Residuos industriales generados por región.....	6
Tabla 3.1: Comparación de emisiones de plantas WTE y de combustibles fósiles (Fuente: [14])....	10
Tabla 3.2: Reacciones de Oxidación.....	12
Tabla 3.3: Reacciones de Gasificación con Vapor.....	12
Tabla 3.4: Reacciones de Gasificación con Hidrógeno.....	13
Tabla 3.5: Reacciones de Gasificación con Dióxido de Carbono.....	13
Tabla 3.6: Emisiones de gasificación de RSM (Fuente: [19]).....	14
Tabla 3.7: Análisis de la composición de los RSM en Brasil (Fuente:[20]).....	16
Tabla 3.8: Composición del gas de Síntesis en planta Piloto Brasil.....	16
Tabla 3.9: Emisiones de la combustión del gas de síntesis.....	16
Tabla 4.1: Análisis Elemental de los RSM de la región metropolitana.....	19
Tabla 4.2: Porcentaje de otros residuos en la composición de los RSM de Chile.....	19
Tabla 4.3: Caracterización del combustible auxiliar.....	20
Tabla 4.4: Poderes caloríficos de los residuos a gasificar.....	21
Tabla 4.5: Flujo de Combustible y su poder calorífico.....	22
Tabla 4.6: Potencia disponible por etapa del ciclo.....	23
Tabla 4.7: Consumo eléctrico región del Biobío.....	23
Tabla 5.1: Clasificación de los residuos secos.....	27
Tabla 5.2: Composición del combustible a base de RSU a gasificar en ensayos finales.....	32
Tabla 6.1: Flujo de aire para la gasificación de RSU.....	38
Tabla 6.2: Composiciones estudiadas en los ensayos finales.....	44
Tabla 6.3: Composición promedio del gas de síntesis durante los ensayos.....	45
Tabla 6.4: Razón de equivalencia en ensayos finales.....	45
Tabla 6.5: Comparación de resultados con proyecto en Brasil.....	48
Tabla 6.6: Factor de emisiones de CO ₂ tras la combustión del gas de síntesis.....	49
Tabla 6.7: Cálculo del PCI en el gas de síntesis producto de la gasificación de pellet.....	49
Tabla 7.1: Costos de instalación de gasificador y sistema de limpieza de gases.....	50
Tabla 7.2: Resultados análisis económico.....	52
Tabla A.1: Cálculo de moles de oxígeno necesarios para la combustión estequiometrica del combustible.....	66
Tabla A.2: Cálculo de masa de aire necesaria para la combustión estequiométrica.....	66

Glosario

CGE	:	Cold gas efficiency (eficiencia del gas frio)
CONAMA	:	Comisión Nacional del Medio Ambiente
GEI	:	Gases de efecto invernadero
LCV	:	Lower calorific value [MJ/Nm ³]
PCI	:	Poder calorífico inferior [MJ/Nm ³]
PEAD	:	Polietileno de alta densidad
PEBD	:	Polietileno de baja densidad
PET	:	Tereftalato de polietileno
PS	:	Poliestireno
PP	:	Polipropileno
PVC	:	Policloruro de vinilo
RE	:	Razón de equivalencia [%]
RSD	:	Residuos sólidos domiciliarios
RSM	:	Residuos sólidos municipales
RSU	:	Residuos sólidos urbanos
SEN	:	Sistema Eléctrico Nacional
TIR	:	Tasa interna de retorno [%]
USD	:	Dólar estadounidense
VAN	:	Valo actual neto [USD]
WTE	:	Waste to Energy

Simbolos

\dot{m}	:	Flujo másico [kg/s]
\dot{V}	:	Flujo volumétrico [m ³ /s]
\dot{W}	:	Potencia [MW]
y	:	Fracción volumétrica
X	:	Fracción másica

Subíndices

<i>comb</i>	:	Combustible
<i>elec</i>	:	Eléctrico
<i>syngas</i>	:	Gas de síntesis

Letras griegas

η	:	Rendimiento [%]
--------	---	-----------------

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Descripción del Problema

El ser humano en su interacción con el ambiente siempre se ha visto enfrentado al problema del manejo de sus residuos, siendo la generación de estos una acción que se desarrolla día a día, pasando desapercibido a primera instancia. Sin embargo, es un problema que se ha ido tornando más agudo debido a que su acumulación fue mayor con el paso de los años, llegando al día de hoy a tomar una elevada importancia tanto a nivel mundial como nacional. Para 2050, se espera que la generación de residuos sólidos aumente un 70 % a nivel mundial. Esto es preocupante, especialmente si se considera que en la actualidad, más del 90 % de los residuos todavía se vierten o se queman abiertamente [1]. En nuestro país la generación de residuos aumentó en un 8% desde el 2015 al 2019, alcanzando los 19,7 millones de toneladas generadas [2].

La mala gestión de los residuos genera daños medio ambientales, sociales y económicos. Entre los factores ambientales se presenta el daño de los suelos, incluyendo la filtración de lixiviados afectando la productividad y acabando con la microfauna que habita en ellos [3]. La contaminación de las aguas, desde bacterias que pueden generar acidificación hasta taponamientos o residuos en zonas de recreo [3]. Además, se produce la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) donde los rellenos sanitarios, vertederos y basurales generan emisiones de estos gases como resultado de degradación anaeróbica en la materia orgánica de los residuos sólidos. Para el año 2018, el 7,2% de las emisiones de GEI totales fue producto de los residuos, este porcentaje implica un aumento del 7,6 % con respecto al año 2016 y a un 354,7% comparado con 1990. De estas emisiones, el 72,2% corresponde solo a la disposición de los residuos sólidos y un 25,7% al tratamiento y descarga de aguas residuales [3].

En cuanto al impacto social, el paisaje es uno de los más afectados por la incorrecta disposición de los residuos sólidos, lo que afecta la salud humana tanto en el ámbito psicológico como en la propagación de enfermedades, esto a través de la proliferación de vectores debido a los residuos depositados en vertederos y basurales.

Por último, se presentan impactos económicos. Por ejemplo, se puede sufrir una devaluación de las propiedades de hasta un 70% al ser “colindante a un basural” [3]. Por otro lado, las comunidades deben afrontar los costos que implican los tratamientos de las aguas contaminadas para ser aptas para su consumo.

En este proyecto, se propone la gasificación de residuos sólidos como un método para enfrentar el problema de la generación y acumulación de estos, para ofrecer una opción de valorización de residuos que permita avanzar hacia una economía circular nacional, facilitar una estrategia óptima para la gestión de residuos y poder alcanzar metas de una economía sustentable, añadiendo una fuente de energía renovable a la matriz nacional. Para demostrarlo, se trabaja con un gasificador ascendente modificado, utilizando como combustible RSU pre tratados para simular la composición de los RSM de la octava región y se calcula el PCI del gas de síntesis obtenido en los ensayos experimentales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de este proyecto es evaluar experimentalmente el poder calorífico inferior del gas de síntesis producto de la gasificación de RSU y biomasa en un reactor de corriente ascendente modificado, en función del efecto del flujo de aire.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos a desarrollar en este proyecto se presentan a continuación:

- 1) Determinar la disponibilidad de Residuos Sólidos para ser usados como combustible y calcular el potencial energético de la utilización de RSU de la región del Biobío.
- 2) Diseñar y fabricar un molde para producir probetas en base de residuos y pre-tratar mezclas de residuos para su uso como combustible en el proceso de gasificación.
- 3) Determinar la composición del gas de síntesis obtenido en los ensayos de gasificación de RSU y calcular su PCI.
- 4) Evaluar las emisiones emisión de CO₂ producto de la combustión del gas de síntesis generado.
- 5) Determinar la viabilidad económica de una planta de gasificación de RSM en la región del Biobío.

1.3 Hipótesis de trabajo

La hipótesis bajo la cual se desarrolla este proyecto es la siguiente:

La valorización energética de RSU a través de la gasificación en un reactor de corriente ascendente, será técnicamente factible si previamente se les aplica a los residuos un pre-tratamiento que incluya el secado, trituración, compactación y homogenización de los mismos.

1.4 Metodología

La metodología que se emplea para el desarrollo del proyecto consta de una primera etapa de investigación de antecedentes para comprender el problema que se abordará. Se realiza un estudio de literatura sobre la gasificación, su funcionamiento y los productos generados en este proceso termoquímico. Se recopilan datos e información obtenida en estudios y proyectos anteriores poniendo

foco en los posibles resultados que se obtendrán al gasificar distintas mezclas de residuos y se realiza la caracterización de los residuos a utilizar en los ensayos experimentales.

A través de los datos obtenidos de la literatura y de la información recopilada se estimará el potencial energético al gasificar los residuos sólidos municipales de la región del Biobío. De la misma forma se estudiará la viabilidad económica de una central de gasificación analizando si los hipotéticos ingresos anuales permiten recuperar las inversiones que el proyecto implicaría.

Los ensayos experimentales serán realizados en el gasificador del laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción, variando el flujo de aire y analizando los efectos en el gas de síntesis. El gas será quemado a la salida del gasificador. Dado el diseño del reactor del reactor [4], será necesario tratar y compactar los residuos para aumentar la masa a gasificar en cada ensayo.

En el laboratorio se trabajará con los residuos, preparando las diferentes muestras que serán utilizadas en los ensayos experimentales. Para esto, se hará uso de una prensa hidráulica y se diseñará un molde mediante el software Autodesk Inventor para la producción de probetas a bases de residuos previamente tratados. Este molde será fabricado en el taller mecánico de la Universidad de Concepción. El secado de residuos se realiza en el horno de secado de muestras modelo LA-0881, ubicado en el laboratorio de Hormigones del departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Se analizará la composición de los gases producto de la gasificación utilizando un analizador portátil de syngas TY-6330P. Los datos obtenidos en los ensayos experimentales serán analizados en profundidad apoyado en hojas de cálculo de Microsoft Excel y la plataforma Matlab, con ello se estimará el PCI del gas de síntesis.

Para finalizar se calculará el factor de emisión de dióxido de carbono que se tendría para la generación de energía eléctrica a partir de la combustión del gas de síntesis en un ciclo Rankine.

CAPÍTULO 2: Contexto

2.1 Generación de residuos a nivel nacional

En el Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente, el Ministerio de Medio Ambiente detalla una generación total de 19,7 millones de toneladas de residuos en el país en el año 2019. De estos, el 96,9% corresponde a residuos no peligrosos, con un 55,6% de origen industrial y el 39,9% de origen municipal. En cuanto a su disposición final, el 63,2% de estos fue enviado a rellenos sanitarios, mientras que un 8,8% a vertederos [2].

Se define la valorización de residuos como el conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y/o el poder calorífico de los mismos, comprende la preparación para la reutilización, el reciclaje y la valorización energética.

Abarcando la totalidad de los residuos gestionados, la tasa nacional de valorización de residuos no peligrosos se ha mantenido entre 20% y 23% en los últimos años [2]. La Figura 2.1 muestra los métodos de valorización de residuos no peligrosos, el reciclaje es la modalidad más utilizada en nuestro país. De acuerdo a esto, no se aplican de una forma considerable procesos de termoconversión como un método de valorización de residuos en nuestro país.

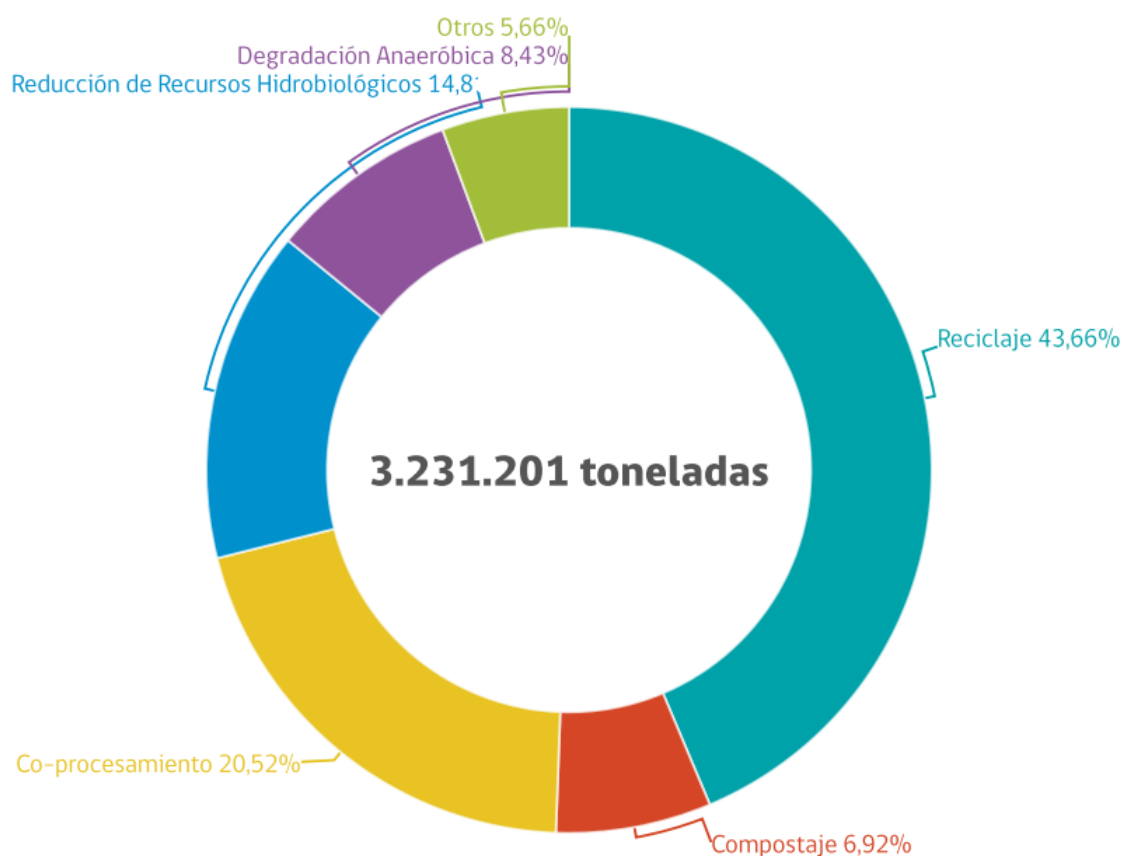


Figura 2.1: Valorización de Residuos No peligrosos en 2019 (Fuente [2])

Sin embargo, analizando en detalle la información declarada por los municipios, de un total aproximado de 7,86 millones de toneladas de residuos municipales, solo 69.507 toneladas fueron parte de un proceso de valorización, lo que no alcanza a completar un 0,9% de la totalidad de estos [2]. Los tipos de valorización aplicados para los residuos municipales para el año 2019 en nuestro país se detallan en la Figura 2.2. De acá, se puede notar que el reciclaje del vidrio seguido del co-procesamiento son los procesos de valorización más utilizados. Por otro lado, pese al gran consumo de plásticos, podemos notar un bajo porcentaje de valorización de este tipo de residuos, los cuales incluyen el reciclaje y pretratamiento de plásticos, que juntos no alcanzan un 3,46%.

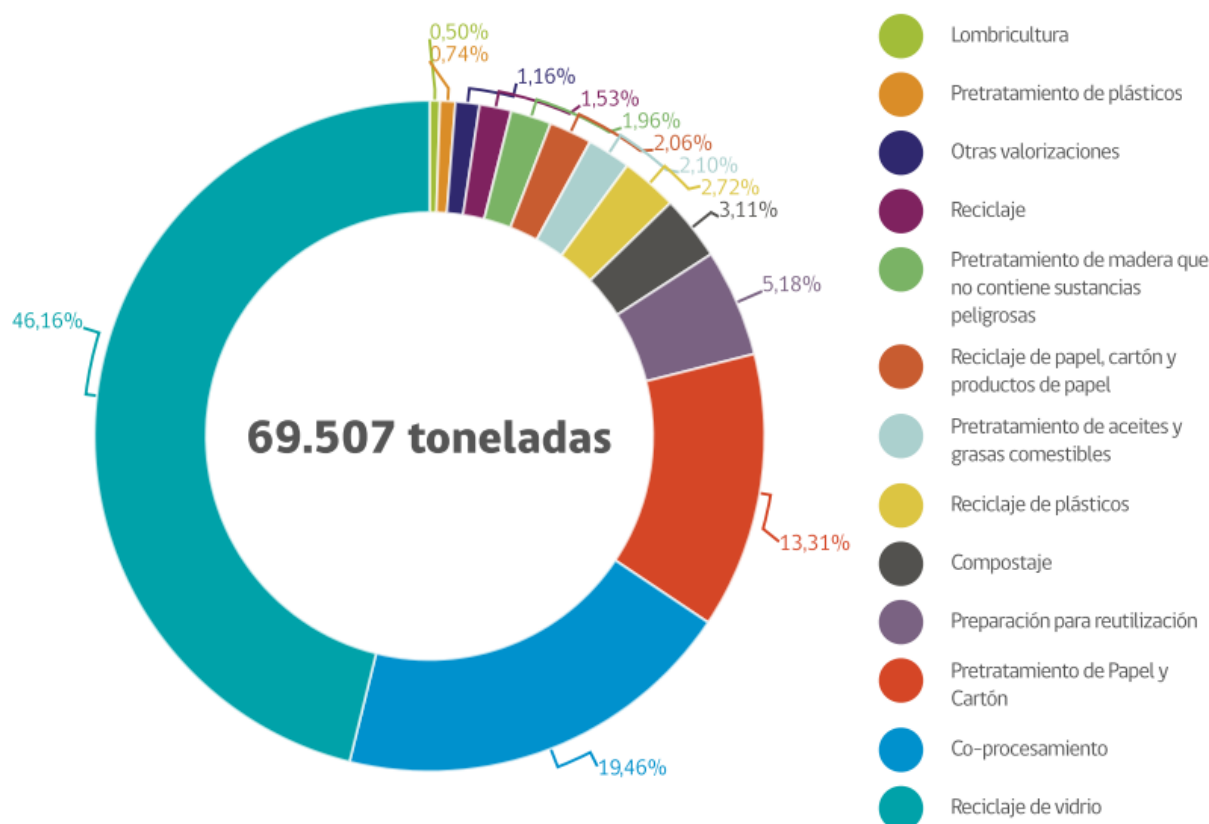


Figura 2.2: Valorización de residuos sólidos municipales por tipo, 2019. (Fuente [2])

Se distingue en cuanto al tratamiento de los residuos domiciliarios que en su mayoría se dirige a rellenos sanitarios con un 80,5%, el 13,6% a vertederos y en menores cantidades a rellenos de seguridad (2,2%).

De lo anterior, es evidente que la mayor valorización se concentra en los residuos sólidos de origen en las industrias. En cuanto al tratamiento de los residuos industriales, no se presenta en detalle información en cuanto a los tipos de valorización. No obstante, es de conocimiento la cantidad de residuos generados en base a una clasificación de los sectores industriales [2]. Entre estos cabe destacar las tasas de generación aproximadas de 1.200.000 y 600.000 toneladas de residuos de los sectores de “Fabricación de pasta de madera, papel y cartón” y “Actividades de apoyo a la ganadería” respectivamente.

2.2 Generación de Residuos a nivel regional

2.2.1 Residuos Municipales

Según la información del Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER). En 2019 se generaron 7.860.784 toneladas de residuos municipales, con una población proyectada de 19.107.216 habitantes, lo que significa un promedio de 1,13 kilos al día por habitante. La Tabla 2.1 cuantifica la generación de residuos de este tipo, de aquí, las regiones con mayor generación, corresponde a Metropolitana, seguida de Valparaíso, Biobío y Coquimbo [2]

Tabla 2.1: Residuos municipales generados por región

Región	Porcentaje del Total Nacional generado	Toneladas de residuos
Metropolitana	45,7 %	3.592.378
Valparaíso	10,1 %	739.939
Biobío	8,7 %	683.888
Coquimbo	4,3 %	338.014

2.2.2 Residuos Industriales No peligrosos

Para el caso de los residuos industriales no peligrosos, la generación alcanza aproximadamente los 10,9 millones de toneladas. La Tabla 2.2 cuantifica la generación de residuos de este tipo, al igual que para los residuos municipales, la cifra más alta corresponde a la Región Metropolitana, seguida por las regiones de Antofagasta, Biobío y Valparaíso.

Tabla 2.2: Residuos industriales generados por región

Región	Porcentaje del Total Nacional generado	Toneladas de residuos
Metropolitana	38,8 %	4.229.200
Antofagasta	11,4 %	1.242.600
Biobío	11,1 %	1.209.900
Valparaíso	7,3 %	795.700

2.3 Plan de Acción

La mala gestión de los residuos y su continuo aumento en cantidades generadas conlleva numerables efectos ambientales, sociales y económicos.

A nivel mundial, para mitigar dichos impactos, la Comisión Europea plantea bases y aplica medidas para liderar al mundo hacia una economía circular. Enfocado en esta temática, la denominada “Economía Circular” es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. Este nuevo modelo desea modificar el la economía lineal que se desarrolla en la actualidad, la cual se detalla en la Figura 2.3. De esta figura, se observa que el porcentaje a nivel mundial de los recursos extraídos que no se emite o envía a una disposición final es menor a un 10%.

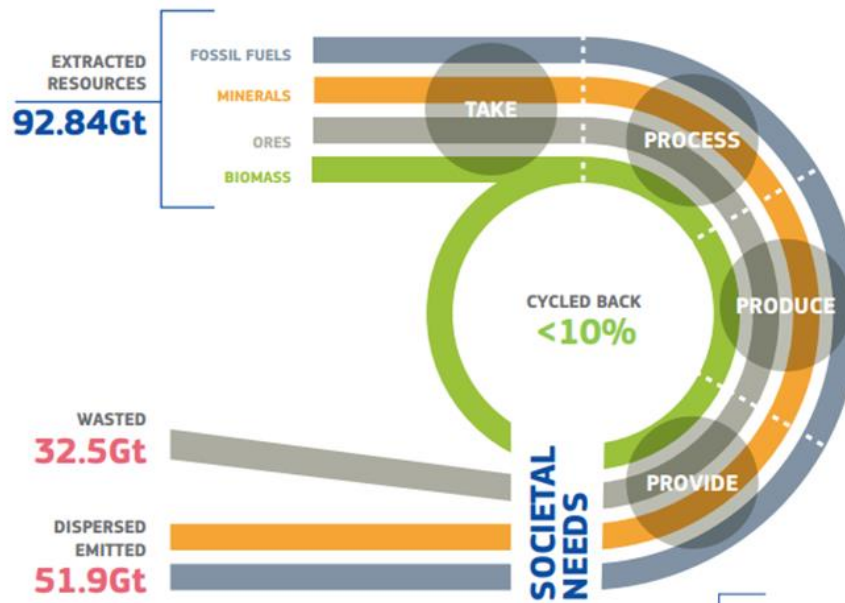


Figura 2.3: Patrones actuales de la actividad económica lineal a nivel mundial. (Fuente [1])

En base a esto, la gestión de residuos desempeña un papel crucial en la economía circular. Este es el primer problema que debe abordarse para iniciar la transición a este nuevo sistema. La reducción de los residuos generados, el reciclado y las conversiones de los residuos en un recurso exigirán inversiones en infraestructuras de prevención, reutilización, recogida y reciclado de residuos [1].

El modelo de Economía Circular ya está siendo desarrollado en nuestra nación, según el Ministerio de Medio Ambiente; “el alcance de la Economía Circular va más allá del reciclaje, impacta en toda la cadena productiva, y tiene efectos económicos, sociales y ambientales”. Para ello se han diseñado diversas líneas de trabajo como lo es la implementación de la Ley REP, el Fondo para el Reciclaje o la adhesión de Chile al “Compromiso Global por la Nueva Economía de Plásticos” [3].

La ley 20.920, conocida como la Ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor), establece obligaciones a los generadores de residuos, los cuales deberán entregarlos a un gestor autorizado para su tratamiento o manejarlos por sí mismo. Mientras que los residuos sólidos domiciliarios y asimilables deberán ser entregados a la municipalidad correspondiente o a un gestor autorizado para su manejo. Los gestores de residuos deberán contar con autorizaciones, además de declarar la información correspondiente a través del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Por otro lado, la superintendencia se encargará de la fiscalización, pudiendo establecer multas de hasta 10 mil unidades tributarias anuales frente ante infracciones gravísimas [5].

2.4 Situación en la Región del Biobío

La octava región de nuestro país tiene cuatro rellenos sanitarios: Hidronor en Copiulemu, Cemarc en Penco, Laguna Verde en Los Ángeles y el de administración municipal en Arauco-Curanilahue.

En Biobío se comienza a desarrollar una crisis, esto, debido a que los dos principales rellenos sanitarios se encuentran próximos a superar el acopio permitido [6]. El relleno sanitario correspondiente a Cemarc S.A., tiene autorizada la recepción de 4 millones 12 mil 800 toneladas, y ya posee el 67% de su capacidad ocupada. En el caso de Hidronor Zona Sur, este fue autorizado para recibir 3 millones 195 mil 798 toneladas de la cual resta una disponibilidad del 3% [6]. Este último recibe los residuos de Talcahuano y Hualpén y tiene una proyección de funcionamiento de sólo 7 meses, mientras que Cemarc, receptora de los desechos de once comunas, solo dos años.

El relleno sanitario de Copiulemu inició sus operaciones en el año 2002, con una vida útil de 30 años. El proyecto contemplaba una inversión de 5300 millones de pesos, abarcando una superficie de 28 hectáreas. Esta primera etapa constaba con 1,7 millones m³ de capacidad que se utilizarían para recibir desechos sólidos de origen domiciliario y en el depósito de seguridad se proyectaba recibir 180 mil m³ de desechos sólidos de origen industrial. Sin embargo, en su cuarta etapa de expansión dispone de más de 6 millones de m³ de desechos. A lo largo de los años, Hidronor ha recibido numerosas multas por daños ambientales debido a filtración de lixiviados, contaminación de aguas cercanas, escurrimiento de sedimentos y por disponer residuos al descubierto. En 2022 se rechazó un proyecto consistente en la quinta etapa del relleno, que consideraba intervenir 31 hectáreas e invertir 8.243 millones de pesos para disponer de un volumen adicional de 2,1 millones de m³, con el objetivo de poder recibir por 12 años los RSD de Florida, Lota, Hualpén y Cabrero [7].

La situación del relleno sanitario de Hidronor genera problemas para municipalidades como la de Hualpén, la cual tenía un contrato para la disposición final de sus residuos en Copiulemu hasta 2033, el cual no se cumplirá cuando este cese su funcionamiento el próximo año. En el caso de Florida, este año se les negó el depósito de sus RSU, los cuales ahora son enviados a la región de Ñuble.

Para el caso del relleno sanitario de Penco, Cemarc recibe mensualmente 24 mil toneladas de residuos sólidos domiciliarios. En este relleno se genera energía eléctrica mediante una producción estimada de biogás de 1500 m³/h en la instalación Bioenergía los Pinos, una potencia nominal de 2,8 kW [8]. La empresa en su búsqueda de alcanzar una economía circular planea una ampliación del relleno, permitiendo extender su vida útil y duplicar su producción eléctrica [9].

La importancia de combatir estos problemas es evidente, al no existir un relleno sanitario autorizado para operar en la zona, la opción es depositar la basura en otra región del país, lo que significaría un aumento de costos. Se debe mencionar que la región de Ñuble consta de un solo relleno sanitario, Ecobio en Chillán. De otra forma, puede implicar la aparición de algún basural, vertedero o en el mejor de los casos la creación de otro relleno sanitario, sin embargo, además de los impactos, sociales y ambientales también comenzamos a rodear la región de sitios de disposición de residuos, donde se pueden presentar problemas como lo sucedido con Hidronor.

2.5 Oportunidades a nivel nacional

En la actualidad, existe una búsqueda constante de estrategias para la disminución de los residuos. Pese a ello, las estadísticas mencionadas en las secciones anteriores no presentan resultados positivos. De un total de 7.860.300 toneladas de RSM, solo 69.507 toneladas experimentan un proceso de valorización. Ante esto, la aplicación de nuevas estrategias para la valorización de RSM comienza a ser evidente. Por ejemplo, la reducción de los residuos plásticos es una prioridad mundial como nacional, sin embargo, entre los tipos de valorización de RSM apenas un 2,72% corresponde a reciclaje de plásticos. Estas cifras se deben a que su reciclaje y reúso es muy difícil dado a su composición química y, en algunos casos, los aditivos tóxicos que contiene, siendo un ejemplo claro de un residuo para el que se debe estudiar nuevas estrategias de valorización.

Ante lo descrito en los párrafos anteriores, la gasificación de residuos sólidos aparece como una opción viable para enfrentar el problema de la generación y acumulación de estos. Esta oportunidad nace de la capacidad de este método para valorizar energéticamente los residuos, permitiendo avanzar hacia una economía circular nacional y facilitar una estrategia óptima para los gestores de residuos que actúan bajo la ley REP.

La gasificación es un proceso termoquímico que ha sido analizado durante años, estudios anteriores han demostrado que este tipo de procesos de valorización tienen un buen impacto ambiental, reduciendo en las emisiones de CO₂ [10]. En estudios previos, evaluaciones de las emisiones producto de la combustión de gases provenientes de gasificación de RSM entregan una fuente de energía cuyas emisiones de contaminantes son inferiores a los valores establecidos por la legislación brasileña [11].

La gasificación de residuos puede requerir de un combustible auxiliar. Para el año 2020 la biomasa significó una oferta total energética de 78.882 Teracalorías, de las cuales un 53,85 % fue destinado hacia la generación de electricidad, un 23,23% hacia el sector industrial y el restante para el sector comercial, público y residencial, donde en su mayoría es utilizado como calefacción en residencias [12]. La utilización de la biomasa se basa en su uso como combustible o para la formación de biogás mediante biodigestores, ante esto, la gasificación de biomasa como un combustible auxiliar puede erigir como un nuevo método para aumentar el aporte de este combustible para un desarrollo más sustentable. Ahora, si se considera la adición de residuos sólidos adecuados a los residuos de biomasa, se ha demostrado que puede mejorar la eficiencia energética del proceso de gasificación de biomasa forestal, como es el caso del aserrín y, al mismo tiempo, lograr la utilización residuos sólidos provenientes de procesos industriales [13].

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

3.1 Residuos a Energía (Waste to Energy)

Los procesos de tratamiento de RSU conocidos como “Waste to Energy (WTE)” corresponden a la combustión controlada de los residuos y generación de electricidad mediante turbinas a vapor. Estudios en base a las plantas de WTE en Estados Unidos han demostrado los siguientes beneficios de este tipo de tratamiento [14]:

3.1.1 Producción de energía y reducción de gases de efecto invernadero

En promedio, la combustión de 1 tonelada métrica de RSU en una planta de energía WTE moderna genera una red de 600 kWh de electricidad [14]. En cuando a la disposición final de los residuos en vertederos, la basura en descomposición genera dióxido de carbono y metano, un potente gas de efecto invernadero, del cual al menos el 25% se escapa a la atmósfera incluso en los rellenos sanitarios modernos que cuentan con una red de recolección de biogás con utilización de motores o turbinas.

Teniendo en cuenta la electricidad generada y las emisiones de metano evitadas, varios estudios independientes concluyeron que WTE reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en aproximadamente 1 tonelada de dióxido de carbono por tonelada de basura quemada en lugar depositada en vertederos o rellenos sanitarios. En la Tabla 3.1 se comparan las emisiones a la atmósfera de centrales WTE y de combustibles fósiles.

Tabla 3.1: Comparación de emisiones de plantas WTE y de combustibles fósiles (Fuente: [14])

Combustible	Emisiones al aire (kg/MWh)		
	CO ₂	SO ₂	Óxidos de Nitrógenos
RSM	379,66	0,36	2,45
Carbón	1020,13	5,90	2,72
Petróleo	758,41	5,44	1,81
Gas Natural	514,83	0,04	0,77

3.1.2 Reciclaje

Las plantas WTE permiten la recuperación de metales ferrosos in situ, la mayoría se recupera a partir de las cenizas de fondo después de la combustión. Por otro lado, en las centrales donde los residuos son previamente tratados, permite el reciclaje de otros tipos de residuos previo a la etapa de combustión como metales no ferrosos, plásticos o vidrio. Las cenizas pueden ser utilizadas en construcción. Esto hace que una central WTE permita una valorización completa de los RSM de la

región del Biobío, cuya composición es detallada en el capítulo 4.2 , de esta composición, la parte de residuos que no es gasificada podrá ser reciclada en la misma planta.

3.1.3 Cuidado de tierras verdes

Las plantas WTE pueden durar más de 30 años. En cuanto a la superficie requerida, una planta WTE que procesa 1 millón de toneladas por año requiere menos de 100.000 m² de terreno. En comparación, el vertido de 30 millones de toneladas de RSU requeriría unos 3.000.000 m². Además, se podría construir una nueva planta en el sitio de la planta WTE existente, reduciendo así a cero el costo de capital para la tierra en la nueva instalación. Por otro lado, el vertedero no se puede usar para nada más, nunca, y se requiere de nuevos campos verdes para convertirlos en vertederos. Este es un factor muy importante a considerar, la instalación de una planta WTE es una solución para la crisis en la octava región del país debido a la saturación de los rellenos sanitarios. Donde se necesitan constantes ampliaciones en los rellenos, la creación de un nuevo relleno o el traslado de residuos a otras regiones.

3.2 Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que se transforma una materia prima, en estado sólido o líquido, en un gas con un poder calorífico moderado, gracias a la aplicación de calor y de un agente gasificante. La materia prima que puede ser empleada en procesos de gasificación es muy diversa, siempre y cuando estos tengan un contenido en humedad inferior al 40 % [15].

La composición química del gas producido variará en función del agente gasificante empleado [15]. En el caso específico de la gasificación de residuos sólidos, puede utilizarse un combustible auxiliar para mantener la temperatura alta en el gasificador y convertir las cenizas en escoria.

3.2.1 Etapas de la Gasificación

Un proceso de gasificación típico generalmente sigue la secuencia de etapas correspondientes al secado, pirolisis, oxidación y la gasificación. Aunque estos pasos usualmente son modelados como un proceso en serie, no existe un límite definido entre ellos, y frecuentemente se superponen [16].

- Secado:

En la primera etapa, el calentamiento de las partículas de combustible hace que la humedad contenida en el mismo se libere en forma de vapor, con una temperatura promedio de 105°C, esta etapa se representa con la ecuación (1) [17].

$$\text{Combustible Sólido} + \text{Calor} = \text{Combustible Seco} + \text{agua} \quad (1)$$

- Pirólisis:

En esta etapa, en la que la temperatura puede llegar hasta los 700°C, la materia sólida comienza a devolatilizarse, produciendo un residuo sólido carbonoso o carbonizado denominado “char”, gases condensables (hidrocarburos pesados) y gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂, N₂, hidrocarburos ligeros y H₂O). La distribución de los distintos productos depende de la velocidad de calentamiento, la temperatura, la naturaleza del sólido y el tamaño de partícula del combustible. Los gases condensables del proceso de pirolisis pueden considerarse como alquitranes [18]. La pirólisis puede ser representada por la ecuación (2) [17].



- Oxidación:

Las reacciones con oxígeno son exotérmicas y suministran la energía necesaria para el secado, la pirolisis y las reacciones de gasificación por medio de la combustión parcial de los volátiles y el carbonizado generados. La cantidad de oxígeno añadida al gasificador depende de la tecnología utilizada, para gasificación directa, ésta se encuentra comprendida entre un 15 y un 40% del oxígeno teórico necesario para la combustión completa [18]. En la Tabla 3.2 se presentan las principales reacciones de oxidación [10].

Tabla 3.2: Reacciones de Oxidación

Oxidación parcial del carbono	$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$
Oxidación del monóxido de carbono	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$
Oxidación del Carbono	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
Oxidación del Hidrógeno	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$
Oxidación de Hidrocarburos	$C_nH_m + n/2 O_2 \rightarrow nCO + m/2 H_2$

- Gasificación:

La producción de gas inicia en la fase de oxidación por combustión incompleta del char, y evoluciona en calidad, dependiendo del agente gasificador y de las condiciones de reacción, cuando ya se han alcanzado 600°C. En la Tabla 3.3, Tabla 3.4 y Tabla 3.5 se presentan las principales reacciones de gasificación [10].

Tabla 3.3: Reacciones de Gasificación con Vapor

Reacción agua-gas	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$
Reacción de desplazamiento agua-gas	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
Reformado de Metano con vapor	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2$
Reformado con Vapor	$C_nH_m + n H_2O \leftrightarrow nCO + (n + m/2) H_2$

Tabla 3.4: Reacciones de Gasificación con Hidrógeno

Hidrogasificación	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$
Metanización	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$

Tabla 3.5: Reacciones de Gasificación con Dióxido de Carbono

Reacción de Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$
Reformado en Seco	$C_nH_m + n CO_2 \leftrightarrow 2nCO + m/2 H_2$

3.2.2 Productos de la Gasificación

Existen diferentes tipos de gasificación de residuos, los cuales se pueden clasificar en función del medio de oxidación. Los productos obtenidos de la gasificación no solo dependen del tipo de proceso, además influyen variables como la temperatura en el reactor y las diferentes reacciones que se llevan a cabo, las cuales se enunciaron en el capítulo 3.2.1.

Además, los rendimientos se ven afectados por las propiedades específicas de los RSU. Las propiedades más importantes para la gasificación son: composición elemental, poder calorífico inferior (PCI), contenido de cenizas (y composición), contenido de humedad, contenido de materia volátil, otros contaminantes (como N, S, Cl, álcalis, metales pesados, etc.), densidad aparente y tamaño. El pretratamiento está principalmente orientado a limitar adecuadamente la naturaleza altamente heterogénea de los residuos y reducir su tamaño, así como su contenido de cenizas y humedad [10].

Todo lo anterior no permite una estimación certera de la composición del gas resultante al final del proceso. En consecuencia, la gasificación de residuos y su potencial aplicación como una fuente de energía requiere de ensayos experimentales y un profundo estudio del proceso que pueda comprobar la utilidad de este. En este proyecto se planea realizar una oxidación parcial con aire, estudios estiman que este tipo de gasificación aplicada a residuos sólidos genera un gas diluido por el nitrógeno atmosférico, obteniéndose gases con un poder calorífico que oscila entre los 4-7 MJ/m³ [10], de este gas las componentes principales que aportan la energía calorífica corresponden al CO, H₂, y CH₄. Además, la eficiencia del gas frío varían entre 50-80% con una razón de equivalencia entre 0,25-0,35 (estos parámetros se definen en el capítulo 4.3).

3.2.3 Tecnologías de gasificación

Las tecnologías WTE basadas en gasificación pueden funcionar como aplicaciones independientes o como parte de sistemas integrados o modulares que combinan procesos de pirólisis, gasificación y/o combustión.

Se han desarrollado 2 posibles configuraciones del sistema de gasificación de conversión de residuos en energía. El gasificador de potencia (Power Gasifier), donde el gas productor primero se limpia y luego se quema, aquí, la sección de limpieza es la interfaz entre las características del gas de síntesis y las requeridas por el dispositivo de uso final específico que puede ser una turbina o motores a gas [10].

La otra opción es el gasificador de calor (Heat Gasifier), donde el gas de síntesis crudo se quema en una caldera para alimentar un ciclo externo (que en la práctica es casi siempre un ciclo de vapor Rankine), es la configuración más utilizada actualmente. Luego de la combustión, el gas pasa al sistema de control de la contaminación del aire para la limpieza de los gases de combustión.

Si bien existen múltiples tipos de gasificadores como de lecho fluidizado burbujeante y circulante, de flujo arrastrado, de horno rotatorio y de plasma, gran número de las plantas de tratamiento de RSM en funcionamiento a nivel mundial corresponden a gasificadores de lecho fijo o móvil del tipo updraft y downdraft. Este último tipo de gasificador posee las características de poseer altas eficiencias, pueden ser implementadas a baja y gran escala sin mayor dificultad, y su mayor ventaja con respecto al resto de los reactores es su simplicidad, lo cual limita los costos de inversión.

En este ámbito de gasificación, existen múltiples industrias a nivel mundial, como lo es Nippon Steel DMS en Japón, reconociendo que el espacio para vertederos era mínimo, esta industria ha instalado 28 plantas que procesan más de 1,9 millones de toneladas de residuos municipales al año, implementando gasificación a altas temperaturas utilizando como combustible auxiliar coque de carbón. OE Gasification posee 40 plantas en Corea del Sur que tratan 18.000 toneladas de residuos diarios, basados en un sistema de gasificador, caldera y sistema de limpieza de gases de combustión. Así también existen industrias que tratan otros tipos de residuos y mediante distintos procesos de termoconversión [19].

3.2.4 Emisiones de la gasificación de RSM

Con la finalidad de analizar los resultados que se han obtenido a nivel mundial en cuanto a emisiones, la Tabla 3.6 presenta las mediciones de tres plantas y su comparación con los estándares establecidos.

Tabla 3.6: Emisiones de gasificación de RSM (Fuente: [19])

Emisiones	A	B	C	S1	S2	S3
Material Particulado	14,1	8,6	7,5	20	14	15,4
HCL	<12,5	<27,4	25,3	40,6	14	126
NO _x	31,2	105	59	308	281	320
SO _x	<21,9	37,5	18,7	85,7	70	225
Hg	-	<0,007	<0,007	50	14	-
Dioxinas/Furanos	0,045	0,0561	0,0983	13	0,14	0,14

Donde las emisiones se miden en (mg/N-m³) a 7% de Oxígeno. A excepción de las dioxinas y furanos, medidos en (ng/N-m³). En cuanto a las plantas y estándares se tiene:

- A: Nippon Steel DMS. Kazusa, Japón, 200 toneladas diarias de RSM.
- B: OE Gasification. Heanamm Korea, 20 toneladas diarias de RSM.
- C: OE Gasification. Bosung Korea, 45 toneladas diarias de RSM.
- S1: Estándar de agencia de protección ambiental Estados Unidos.
- S2: Estándar Comisión Europea 2000/76
- S3: Estándar Japonés

3.3 Comparación de gasificación y combustión de RSM

La gasificación de RSM posee las siguientes ventajas con respecto a la combustión directa o incineración de estos [10]:

- La gasificación produce un producto intermedio, que es adecuado para su uso en una amplia gama de aplicaciones, como la generación de energía o los procesos de fabricación de combustibles líquidos y productos químicos. Por el contrario, las unidades WTE convencionales queman directamente materia prima residual.
- Existe un potencial para una conversión de mayor eficiencia cuando el gas combustible se quema en motores alternativos de gas, turbinas de gas o, ciclos combinados, en comparación con los sistemas de energía de ciclo de vapor de Rankine convencionales.
- La gasificación puede ser aplicada para la generación de energía en pequeña escala.
- El material inerte y no combustible se recoge en el fondo del reactor, con metales principalmente en forma no oxidada.
- Debido a la atmósfera reductora, la emisión de dioxinas y furanos está fuertemente limitada.
- Las llamas premezcladas pueden producir una reducción sustancial de las emisiones de NO_x.
- La limpieza del gas de síntesis previo a la caldera puede reducir la corrosión y permitir mayores temperaturas y por ende, mayores eficiencias.
- La oxidación gas-gas homogénea es más fácil de controlar que la sólido-gas heterogénea que tiene lugar en una planta WTE convencional, esto permite reducir el exceso de aire y posiblemente realizar llamas premezcladas. El déficit de aire (en lugar de un exceso) reduce las pérdidas de calor en la chimenea y, por lo tanto, aumenta la eficiencia de recuperación de energía.

3.4 Proyectos relevantes

3.4.1 Gasificación de RSM en Paraná, Brasil

En este estudio, se evaluó las emisiones de contaminantes generadas por la combustión de gas de síntesis en la gasificación de Residuos Sólidos Municipales en Brasil. Los experimentos de

gasificación se realizaron en un gasificador piloto instalado en la Empresa Energia Limpa do Brasil (ELBRA), ubicada en la ciudad de Araucária, Paraná [11].

Los RSM gasificados fueron proporcionados por un vertedero, los cuales no recibieron ningún tipo de segregación, se utilizó aire como agente gasificante. El análisis de la composición de los residuos se presenta en la Tabla 3.7.

La composición del gas de síntesis generado en porcentaje molar promedio y su respectivo PCI se presentan en la Tabla 3.8, por otro lado, se monitoreó las emisiones generadas por la combustión del gas de síntesis, cuyos resultados fueron comparados con la legislación brasileña, observar Tabla 3.9.

Considerando el alto contenido de SO_2 que se emite durante la gasificación y combustión de los gases, se hace necesaria la implantación de un sistema de tratamiento que puede ser por vía húmeda a través de lavadores de gases alcalinos que son comunes para el tratamiento de este tipo de emisiones atmosféricas.

Tabla 3.7: Análisis de la composición de los RSM en Brasil (Fuente:[20])

Composición gravimétrica (%)		Características de RSM (% masa)	
Residuos orgánicos	47,9	C	25,95
Papeles y cartón	18,5	H	3,21
Plásticos	16,1	N	0,10
Textiles y madera	4,7	S	0,15
Absorbentes	5,4	O	18,11
Goma, neumáticos, etc	0,6	Cl	0,03
Total de residuos combustibles	93,2	H_2O	49,08
Materia inorgánica	6,8	Cenizas	3,36

Tabla 3.8: Composición del gas de Síntesis en planta Piloto Brasil.

Componente	H_2 (% molar)	CH_4 (% molar)	CO (% molar)	CO_2 (% molar)	PCI(MJ/kg)
Promedio	3,81	3,43	4,20	13,39	7,30

Tabla 3.9: Emisiones de la combustión del gas de síntesis

Gases	Emisión Promedio (mg/Nm^3)	Estándar (mg/Nm^3)
CO	83,04	125
NO_x	9,18	560
SO_2	1599,60	280

3.4.2 Cogasificación de RSM y biomasa en instalación de investigación de plantas de residuos a energía

Unas 50 instalaciones en funcionamiento construidas por JFE Engineering Corporation y Nippon Steel Corporation en Japón tienen una capacidad total para tratar unas 12.400 toneladas de residuos al día. Suponiendo un consumo de coque de carbón de aproximadamente el 5 % de la entrada total de residuos, las emisiones directas de CO₂ debidas a este combustible fósil son de 1870 toneladas/día.

Debido a que el coque de carbón no es sostenible, se busca el desarrollo de combustibles auxiliares sostenibles, que puede reemplazar al coque de carbón como un material de formación de lecho fijo estable y denso en energía.

Este estudio se centró en el rendimiento de la sustitución del coque de carbón por carbón de biomasa como combustible auxiliar en la Instalación de Investigación de Residuos en Energía (WTERF) [21].

En datos generales, el combustible auxiliar debe tener un alto valor calorífico, alto contenido de carbono fijo, bajo contenido de materia volátil y bajo contenido de cenizas. Un alto contenido de carbono fijo y un bajo contenido de materia volátil son cruciales para garantizar una capa de fusión de cenizas estable, el alto poder calorífico y el bajo contenido de cenizas conducen a un menor consumo de combustible auxiliar. Del análisis de los combustibles auxiliares, se observó que el carbón vegetal de biomasa tiene ventajas considerables sobre el coque de carbón en términos de mayor poder calorífico, menor contenido de cenizas y menor contenido de metales pesados, mientras que el coque de carbón tiene un contenido menor de materia volátil.

En cuanto al proceso, al reemplazar el coque de carbón por la biomasa, el reactor mantuvo una temperatura de funcionamiento estable y similar. En cuanto a emisiones, el escenario de operación con carbón de biomasa redujo las emisiones de CO₂ equivalente en un 22 % diario.

Las emisiones de SO₂ fueron un 78 % más bajas y se consumió un 32 % menos de absorbente de gases de combustión. El menor consumo de adsorbente de gases de combustión condujo a una disminución del 22 % en la generación de cenizas volantes durante las condiciones de operación del carbón de biomasa. La reducción de la cantidad de cenizas volantes disminuye los gastos operativos, ya que también se reducen los costos de disposición. Por lo tanto, los resultados no solo concluyen un beneficio ambiental sino también económico.

CAPÍTULO 4: Estimación del Potencial Energético

En este capítulo se procederá a estimar el potencial energético al utilizar el gas de síntesis obtenido de la gasificación de residuos sólidos en Chile. Para ello se realizará el procedimiento representado en la Figura 4.1, comenzando por el cálculo de la energía disponible en los residuos sólidos municipales de la región del Biobío, para que sean utilizados como combustibles. Luego, se estimará la energía obtenida en el gas de síntesis producto de la gasificación considerando las eficiencias obtenidas de la literatura, para finalizar estimando la energía térmica disponible y la potencia eléctrica que se podría generar mediante un ciclo Rankine, con el objetivo de realizar un cálculo conservativo.

Para el cálculo de la energía disponible se considerarán los residuos sólidos municipales, esto, en base a que los datos entregados en el capítulo 2.1 demostraron que esta fracción de los residuos posee un porcentaje bajísimo de valorización, además, el hecho de que sean gestionados por las municipalidades facilitaría la recolección y tratamiento de estos.

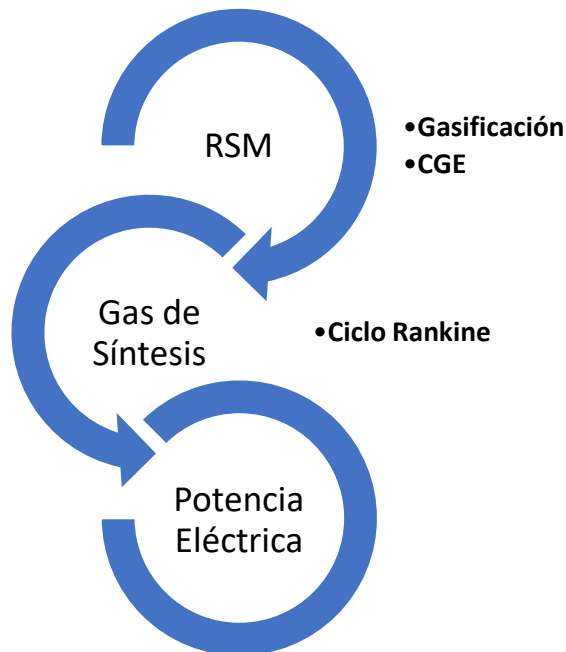


Figura 4.1: Estimación de la Potencia Energética producto de la gasificación de RSM

4.1 Caracterización de los combustibles

Para la caracterización de los residuos se procedió a la búsqueda de datos y estudios en la literatura.

La composición de los residuos sólidos domiciliarios de la región del Biobío fue obtenida del informe 1 de la sub secretaria de desarrollo regional y administrativo [22], presentado en la Figura 4.2.

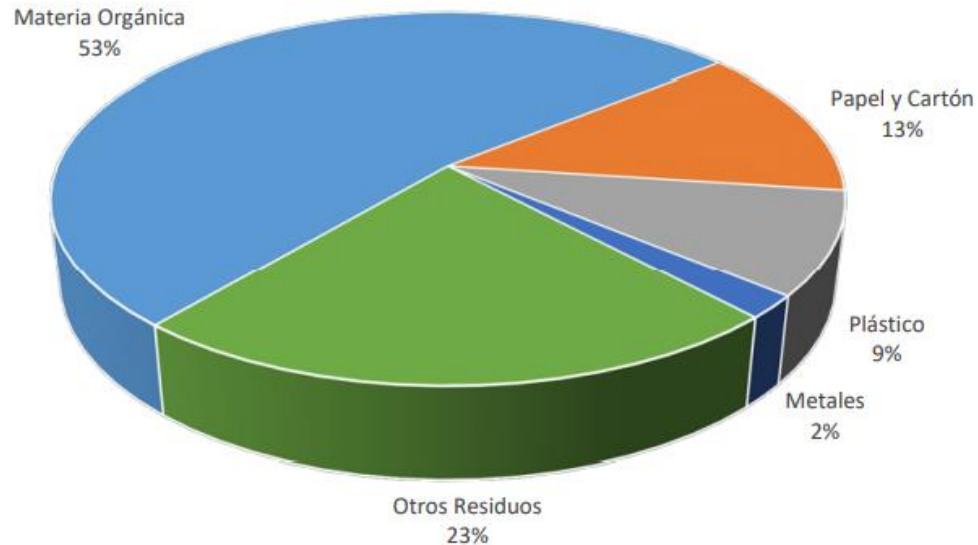


Figura 4.2: Composición porcentual de los RSDyA de la comuna de Concepción (Fuente: [22])

En cuanto al análisis elemental de los residuos, se considera una caracterización realizada a los residuos de la región metropolitana [23]. Esta se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Análisis Elemental de los RSM de la región metropolitana

Elemento	Contenido (% masa)
C	42,24
H	5,44
N	0,97
S	0,21
O	28,57
Ceniza	22,57

Para detallar más la composición de los residuos y estimar un PCI más exacto es que se acude a un estudio realizado por la Comisión Nacional del medio Ambiente [24], la cual entrega la composición en porcentaje de masa de los residuos a nivel nacional para el año 2009, de las cuales se destaca los presentados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Porcentaje de otros residuos en la composición de los RSM de Chile

Tipo de Residuo	Composición (%)
Textiles	2,0
Vidrios	6,6

Los restantes componentes de los residuos se consideran como aceite, gomas, restos de madera y desechos de construcción.

Por último, se toma en cuenta un estudio realizado por la CONAMA de la composición de los RSD del sector residencial de la región Metropolitana [25] para catalogar los diferentes tipos de plásticos que componen el 9% del total de RSM. Los resultados se muestran en la Figura 4.3.

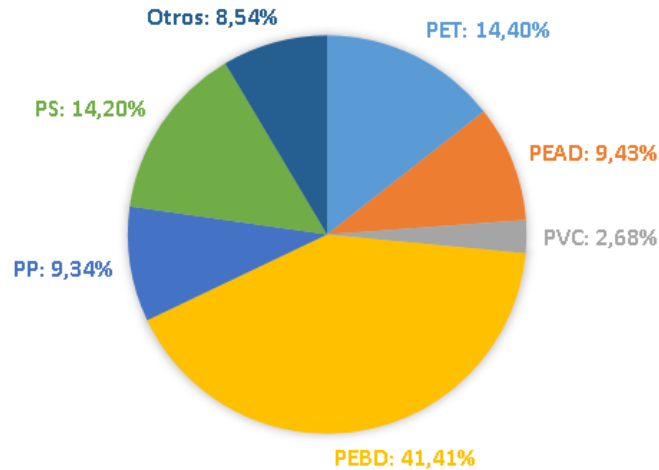


Figura 4.3: Plásticos presentes en los RSD de la región metropolitana.

Para el desarrollo de este proyecto se plantea utilizar biomasa como combustible auxiliar, estos combustibles corresponden a pellets de madera, un producto de la empresa ECOMAS [26] cuyas propiedades se adjuntan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Caracterización del combustible auxiliar

Parámetro	Resultado ECOMAS
Durabilidad mecánica	98,5 %
Humedad	6,3 %
Contenido de Cenizas 550°	0,16%
PCI	17,3 [MJ/kg]

4.2 Procedimiento de cálculo de la energía disponible en los residuos

Se procederá a calcular el poder calorífico del combustible a través de su composición porcentual y el poder calorífico de cada una de sus partes. Para el caso de los residuos se realizó la búsqueda en la literatura de sus respectivos poderes caloríficos, sus propiedades junto con la composición final estimada de cada residuo se presentan en la Tabla 4.4.

En base a esto se desestimarán el tereftalato de polietileno, polietileno de alta densidad, vidrios, los metales y los desechos de construcción, los cuales no serán considerados en el proceso de gasificación. En el caso del vidrio, esto se debe a que es el residuo con mayor valorización, esto corresponde al reciclaje del vidrio (Figura 2.2), de forma similar se considera el PET y PEAD como los plásticos con alto porcentaje de reciclaje en Chile, lo que sumado a la política de reciclaje de los plásticos se espera su reciclaje aumente en el futuro. Para el caso del metal y los desechos de construcción, su composición y comportamiento no lo hacen viable para el proceso.

Tabla 4.4: Poderes caloríficos de los residuos a gasificar

Residuo	Composición (%)	PCI (kJ/kg)
Materia Orgánica	53	14.615 [27]
Cartón y papeles	13	15.843 [27]
Plásticos (total)	9	
PET	1,2896	-
PEAD	0,8487	-
PVC	0,2412	20.920 [28]
PEBD	3,7269	38.036 [29]
PP	0,8402	43.687 [30]
PS	1,2780	40.000 [31]
Otros	0,7686	32.777 [28]
Vidrios	6,6	-
Textiles	2,0	16.556 [27]
Metales	2,0	0
Restos de madera	3,6	17.811 [27]
Goma	3,6	31.170 [28]
Aceites	3,6	39.748 [28]
Desechos de construcción	3,6	0

El PCI del combustible se calcula mediante la ecuación (3) ocupando los datos de la Tabla 4.4.

$$PCI_{combustible} = \sum (y_{residuo} * PCI_{residuo}) \quad (3)$$

Posteriormente es necesario calcular el flujo de combustible que se tendría. Para esto se utiliza un factor de planta de un 70%, esto quiere decir que se considera que la central estará en funcionamiento el 70% de las horas del año.

La cantidad de combustible anual disponible en la región se obtiene de la Tabla 2.1, cantidad que se divide por las horas consideradas de funcionamiento.

El procedimiento de cálculo se especifica en el anexo A.1.

4.3 Procedimiento de cálculo de la energía en el gas de síntesis

Para determinar la potencia térmica disponible en el gas de síntesis obtenido de la gasificación de los RSM, se utilizará un valor de la eficiencia del gas frío (CGE, por sus siglas en inglés). La CGE se calcula mediante la expresión (4) experimentalmente, para este proceso de cálculo se utilizará el valor mínimo de la eficiencia mínima obtenida del estudio de casos anteriores de gasificación de residuos [10] para obtener una estimación energética conservativa.

$$CGE = \frac{\dot{V}_{syngas} * PCI_{syngas}}{\dot{m}_{combustible} * PCI_{combustible}} = 0,50 \quad (4)$$

4.4 Procedimiento de cálculo de la Potencia Eléctrica disponible

Por último, para el cálculo de la potencia eléctrica se considerarán las eficiencias típicas de un ciclo de Rankine, siendo esta la configuración menos eficiente y de las más utilizadas. Se considera un 22% de eficiencia total para el ciclo Rankine [32] completo, desde la transformación de energía térmica a mecánica, y luego de mecánica a eléctrica a través de un generador. El rendimiento es expresado en la ecuación (5):

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_{elec}}{\dot{V}_{syngas} * PCI_{syngas}} \quad (5)$$

4.5 Potencial Energético en la región del Biobío en base de RSM

Los resultados de la estimación de energía disponible en el combustible a base de los RSM de la región del Biobío se presentan en la Tabla 4.5. El procedimiento de cálculo se adjunta en el anexo A.1.

Luego de calcular el flujo de energía aportado por los residuos se determina la energía disponible en el gas de síntesis resultante, y la potencia eléctrica que se genera utilizándolo en un ciclo Rankine convencional, los resultados son tabulados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.5: Flujo de Combustible y su poder calorífico

Combustible [ton/año]	Horas de Funcionamiento	Flujo de Combustible [kg/s]	PCI [kJ/kg]	PCI [MJ/kg]
624.127,815	6.132	28,27	17.454	17,454

Tabla 4.6: Potencia disponible por etapa del ciclo

Etapa	Potencia Disponible [MW]
Combustible Sólido	493,5
Gas de Síntesis	246,7
Potencia Eléctrica (ciclo Rankine)	54,28

En la región del Biobío se tiene una capacidad instalada de generación de 270 [MW] [33]. Se puede apreciar el potencial energético si se aplica este tipo de valorización a los RSM de la región, donde la potencia estimada aplicando un ciclo Rankine corresponde a un 20,10 % de la capacidad instalada en la región. Lo que además de aportar energéticamente y solucionar el problema de la gestión de los residuos implica la posibilidad de disminuir con la parte de la matriz energética no renovable.

En cuanto al consumo energético anual en la región, observar la Tabla 4.7, con las consideraciones que se estimaron en este capítulo, se obtiene un aporte del 11,74 % del consumo eléctrico total de los habitantes de la región.

Tabla 4.7: Consumo eléctrico región del Biobío

Ítem	Valor
Población de la Región [habitantes]	1.663.696
Consumo eléctrico residencial por cliente [kWh/mes]	142
Consumo eléctrico residencial mensual en la región [kWh]	236.244.832
Consumo eléctrico residencial anual en la región [kWh]	2.834.937.984
Potencia Eléctrica central de gasificación de RSM [kW]	54280
Factor de operación	0,7
Energía eléctrica anual de la central de gasificación [kWh]	332.844.960
Aporte al consumo total de la región anualmente [%]	11,74

CAPÍTULO 5: Etapa Experimental

En este capítulo se detalla el funcionamiento del sistema, el tratamiento de los residuos y el proceso experimental llevado a cabo. A partir de lo obtenido en los ensayos fue necesario adaptar y añadir procesos en el tratamiento de los residuos. Cada ensayo es presentado en este capítulo para los cuales se preparó cargas de combustible con composiciones y flujos específicos de aire.

5.1 Gasificador

5.1.1 Funcionamiento del sistema

El sistema de gasificación está compuesto por un reactor de corriente ascendente modificado, diseñado y construido en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Universidad de Concepción [4].

En la Figura 5.1 se muestra el esquema del sistema instalado en el laboratorio de Termofluidos. El gasificador posee una tolva (1) de 190 litros donde se almacena combustible. El combustible es impulsado mediante un tornillo sin fin (2) hasta la parrilla (3). Previo a esto el reactor también es cargado con combustible, se destapa el reactor (10) y se realiza un encendido manual utilizando alcohol. El agente gasificante corresponde a aire, se tiene una entrada principal de aire (8) y una entrada secundaria (9), ubicadas al inferior y por sobre la parrilla respectivamente. Cuando ya se realiza la gasificación, el gas de síntesis se dirige por el tubo de salida del reactor (4) pasando por un ciclón (5) para extraer las partículas más pesadas.

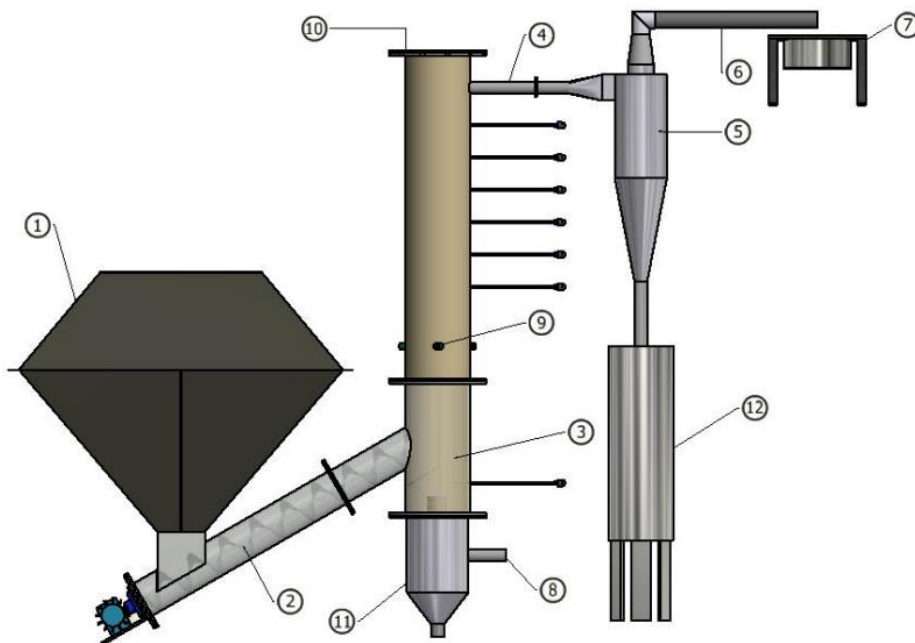


Figura 5.1: Esquema del Sistema (Fuente [4])

Por último, el gas generado es combustionado empleando un quemador de gas natural (7). 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).

5.1.2 Sistema de Medición

El reactor consta de diversos instrumentos de medición. En la Figura 5.2 se muestra el sistema en funcionamiento. Para el perfil de temperaturas el reactor cuenta con 7 termocuplas, además hay 1 ubicada en la salida de los gases desde el reactor hacia el ciclón y otra bajo la parrilla. Estas se conectan a un sistema de adquisición de datos (datalogger) (1), el cual muestra en pantalla las temperaturas y grafica las mediciones registradas por el equipo, almacenando esta información en su memoria.

Para medir la composición del gas, a la salida del ciclón una fracción del gas se desvía (2), observar Figura 5.2. El gas es enfriado con agua (3) para luego pasar al analizador portátil de syngas TY-6330P (4), este posee un dispositivo de acondicionamiento de gas para eliminar polvo, alquitrán y vapor de agua del gas de muestra (5).

Es necesario medir el flujo de aire que se envía al reactor, para la entrada primaria se instala una válvula de mariposa de ½" y junto a la válvula se instala un flujómetro que entrega el caudal suministrado en litros por minuto (6). Del mismo modo se realiza en la entrada secundaria, aquí se instala una válvula de bola ½" (7).

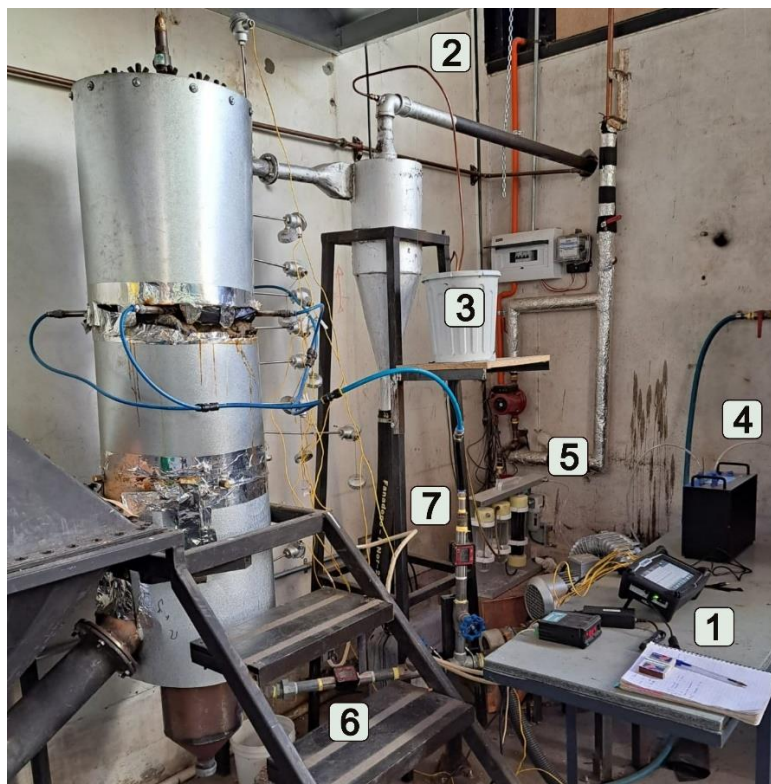


Figura 5.2: Sistema en funcionamiento

Por último, la cantidad de combustible utilizado es pesado antes de cada ensayo para conocer su composición exacta y la masa a gasificar. Para ello, se utiliza una balanza que posee una exactitud de 1 gramo y tiene un rango máximo de 100 kg.

5.2 Tratamiento de Residuos

Para los ensayos experimentales se detectó problemas en el sistema de alimentación, por lo que en la práctica se realizaron utilizando únicamente la carga obtenida al llenar el reactor.

Para ello, se analiza el reactor del gasificador, en la Figura 5.3 se muestra un esquema de este. Las termocuplas son enumeradas desde el número 1 hasta el 8, esto es necesario para evaluar el comportamiento del proceso posteriormente. La carga de combustible requiere estar a una altura inferior a la tubería de salida de los gases, ante esto, se decide cargarlo desde la parrilla hasta la termocupla número 2. La separación entre cada sensor de temperatura es 10 cm mientras que la altura entre la parrilla y la termocupla número 8 es de 47 cm, con un diámetro interno de 18 cm, el volumen disponible para la carga de combustible corresponde a aproximadamente a 27 litros.

Dado lo anterior y la baja densidad de los residuos sólidos municipales es que se hace necesario reducir el volumen de estos con el objetivo de aumentar la masa de combustible a gasificar en cada ensayo.

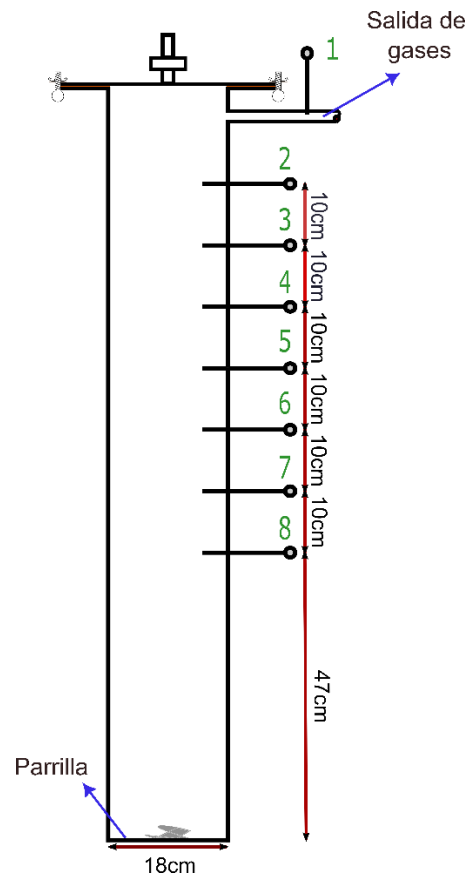


Figura 5.3: Esquema del reactor del gasificador.

5.2.1 Tratamiento de residuos secos

Con la finalidad de diferenciar los distintos tipos de residuos a gasificar, es que en este proyecto se clasifica como residuos secos a todos los componentes de los RSM a excepción de la materia orgánica, la cual contiene el mayor porcentaje de humedad de los residuos. En los ensayos no se trabajó con PVC por motivos del cuidado del reactor (contenido de cloro).

Los residuos secos fueron separados en dos clases, las cuales se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Clasificación de los residuos secos

Clase	A	B
Características	Residuos secos con un elevado porcentaje en la composición total de los RSM. Poseen una baja densidad.	Residuos secos con un bajo porcentaje en la composición total de RSM. Poseen una densidad mayor que los residuos clase A.
Componentes	Cartón, polietileno de baja densidad.	Polipropileno, poliestireno, textiles, madera, goma.

El proceso se lleva a cabo en el laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción.

- Clase A:

Para este tipo de residuos se fabricaron probetas comprimidas con cartón y PEBD. Para la fabricación de estas se hace uso de la prensa hidráulica del laboratorio de Termofluidos.

El proceso consta de un cercenado de los residuos, el cartón es remojado y luego triturado para ser mezclado con el plástico. Esta mezcla se realiza con la proporción del cartón y PEBD presentes en los RSM (para 1 kg de PEBD se tiene 3,488 kg de cartón) para mantener una mezcla homogénea y acorde a lo estudiado previamente.

En la prensa son compactadas hasta una presión de 4,7 MPa, para ello se diseñó un molde para las probetas usando el software Autodesk Inventor y su fabricación fue realizada en el taller mecánico de la Universidad de Concepción. Por otro lado, se diseñó un colector para los líquidos liberados en el proceso de compactar y recuperar el agua. Los planos del molde y colector se presentan en los anexos.

- Clase B:

Para este tipo de residuos fueron cercenados y compactados manualmente a partes de un pequeño tamaño para permitir una mezcla bien distribuida con el resto de los residuos y presentar una composición homogénea a lo largo del reactor.

La Figura 5.4 presenta el tratamiento y la disposición de los residuos secos listos para ser gasificados.



(a) Cartón y PEBD cercenados



(b) Residuos triturados



(c) Sistema molde-colector-prensa



(d) Briquetas de residuos secos Clase A



(e) Residuos secos a gasificar

Figura 5.4: Tratamiento de residuos secos

5.2.2 Tratamiento materia orgánica

A primera instancia, la materia orgánica era reunida días previos al ensayo por temas de salubridad e higiene. Luego, se concluyó que era necesario reducir el contenido de humedad en esta parte de los residuos, por lo que se tuvo que añadir una etapa de secado. Ante esto, el tratamiento de la materia orgánica constaba de la acumulación de residuos, cercenado, mezclado y secado. Esta última etapa se llevó a cabo en el horno de secado de muestras modelo LA-0881, designado por la compañía The Grieve Corporation, ubicado en el laboratorio de Hormigones del departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Una vez trasladados los residuos secos al laboratorio de Termofluidos, estos fueron compactados haciendo uso de la prensa y molde mencionados en el capítulo 5.2.1 para reducir su volumen. Las etapas del proceso se muestran en la Figura 5.5.



(a) Residuos orgánicos



(b) Secado en horno



(c) Materia Orgánica seca



(d) Materia Orgánica compactada

Figura 5.5: Tratamiento de residuos de materia orgánica

5.3 Ensayos Experimentales

5.3.1 Ensayo inicial

Para la fracción correspondiente a materia orgánica no se realizó tratamiento previo, en los residuos secos el detallado en el capítulo 5.2.1. Para asegurar el encendido y alcanzar las temperaturas necesarias para la gasificación se carga una primera capa con pellet y una capa sobre la parrilla para asegurar un quemado y mantener las temperaturas, como muestra la Figura 5.6. La Figura 5.7 muestra la carga de combustible a base de residuos. El combustible auxiliar lograba encender, pero al avanzar, el reactor se apaga. Se optó con una distribución alternativa, sin embargo, ambas distribuciones fallaron. Se concluyó que era necesario reducir el contenido de humedad en los residuos.

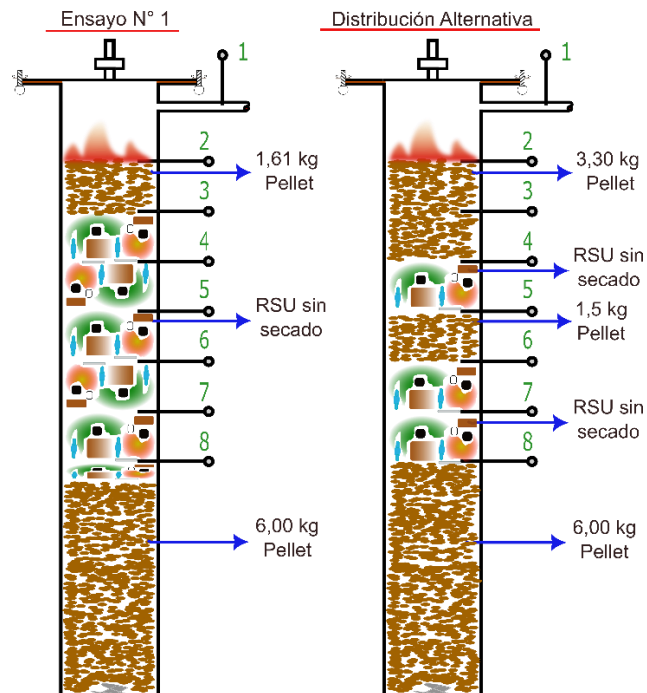


Figura 5.6: Distribución de combustible para Ensayo N°1



Figura 5.7: Carga de combustible a base de residuos ensayo 1

5.3.2 Gasificación de residuos secos

Se realizaron los Ensayos N°2 y N°3 con el objetivo de estudiar el comportamiento de los residuos secos. Se añadieron las capas superior e inferior de combustible auxiliar como muestra la Figura 5.8. En el Ensayo N°2 se comprobó la combustión y gasificación exitosa de los residuos secos, el gas quemado a la salida se muestra en la Figura 5.9. Al completarse el ensayo solo restan cenizas por lo que se decide reducir la capa de combustible auxiliar inferior para aumentar la cantidad de residuos secos en el reactor y estudiar en detalle la gasificación de estos en el Ensayo N°3.

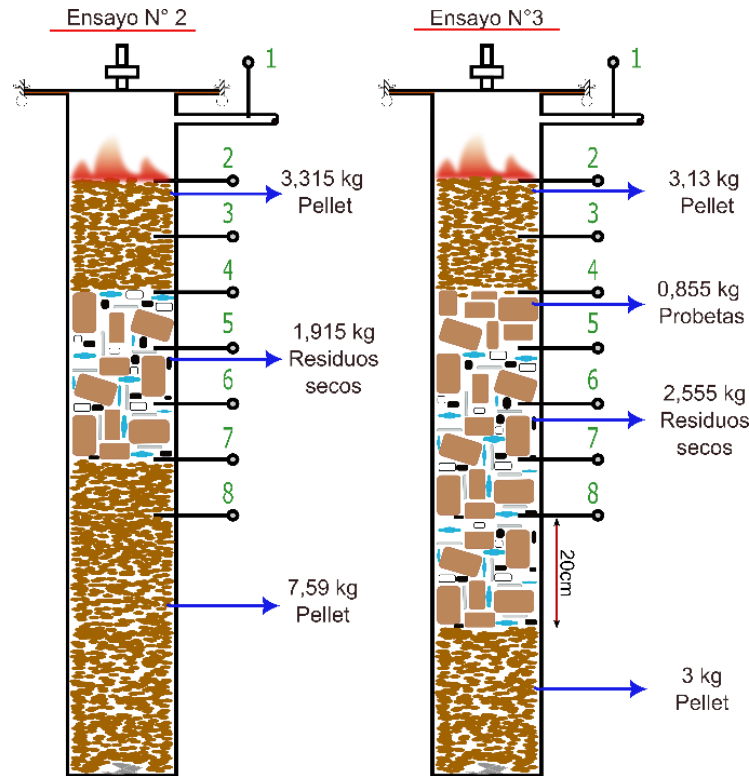


Figura 5.8: Distribución de combustible para gasificación de residuos secos



(a) Ensayo N°2



(b) Ensayo N°3

Figura 5.9: Quemado del gas de síntesis generado en la gasificación de residuos secos

5.3.3 Gasificación de residuos sólidos urbanos

Verificada la gasificación de los residuos secos se procedió a realizar los ensayos finales con residuos sólidos urbanos. Para ello se introdujo un combustible cuya composición másica se diseñó para representar la composición de los RSM de la región del Biobío, presentada en la Tabla 4.4.

Se excluyen las componentes que no serán consideradas para la gasificación mencionadas previamente, queda la composición másica presentada en la Tabla 5.2 y visualizada en la Figura 5.10.

Tabla 5.2: Composición del combustible a base de RSU a gasificar en ensayos finales

Componente	Porcentaje del total de la muestra
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 %



Figura 5.10: Carga de combustible a base de RSU para ensayos finales

Para asegurar la completa realización del proceso de gasificación, quemando de la escoria y asegurando la limpieza del reactor es que para el Ensayo N°4 se introdujo una capa inferior mayor de combustible auxiliar. Se comprobó que el proceso era desarrollado con éxito y se disminuyó el volumen de la capa inferior obteniéndose la distribución final a estudiar en los Ensayos N°5, 6,7 y 8. Ambas distribuciones son presentadas en la Figura 5.11. La carga en los ensayos finales se mantuvo

constante para estudiar el efecto del flujo de aire en la eficiencia del proceso. Se logra la gasificación de los RSU, donde el gas de síntesis es quemado a la salida, como se muestra en la Figura 5.12.

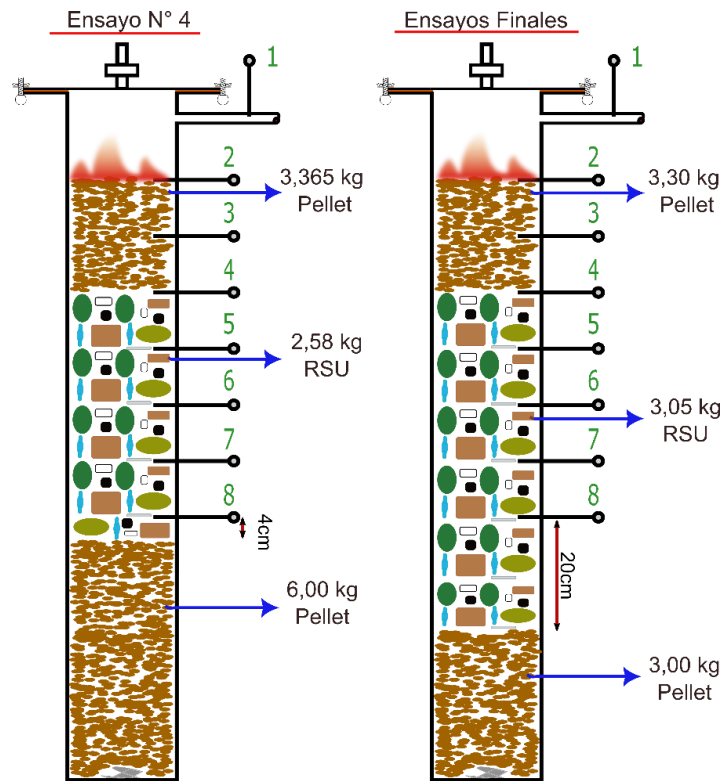


Figura 5.11: Distribución de combustible para gasificación de RSU



(a) Ensayo N°4



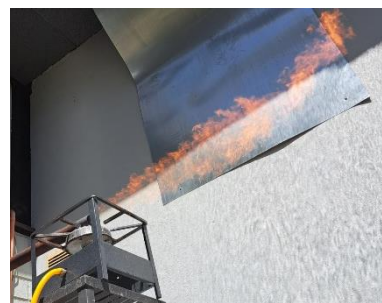
(b) Ensayo N°5



(c) Ensayo N°6



(d) Ensayo N°7



(e) Ensayo N°8

Figura 5.12: Quemado del gas de síntesis generado en la gasificación de RSU

CAPÍTULO 6: Resultados de ensayos experimentales

6.1 Presentación de resultados

Para los perfiles de la temperatura, las mediciones del datalogger fueron ordenadas en una hoja de Excel para luego ser graficadas utilizando Matlab, el código para las gráficas se presenta en el anexo A.2. Para el caso de la composición del gas de síntesis, los datos extraídos del analizador fueron traspasados y graficados en una hoja de Excel.

6.1.1 Ensayo N°1

En la Figura 6.1 se presentan las temperaturas medidas durante el Ensayo N°1, como se observaba en la Figura 5.6, inicialmente la carga de combustible se encontraba en la termocupla 3, sin embargo el reactor se apaga antes que esta carga haga combustión.

Ante eso, sin detener la medición, se abre el reactor y se retira una carga de residuos. Se aplica la distribución alternativa, para ver si una mayor cantidad de combustible auxiliar lograba secar los residuos y que estos logran gasificar, agregando también una capa intermedia de pellet con el objetivo de asegurar altas temperaturas entre ambas capas de residuos.

El reactor se apaga antes que los residuos ubicados en la termocupla 4 comiencen un proceso de combustión debido a la alta humedad en esa zona.

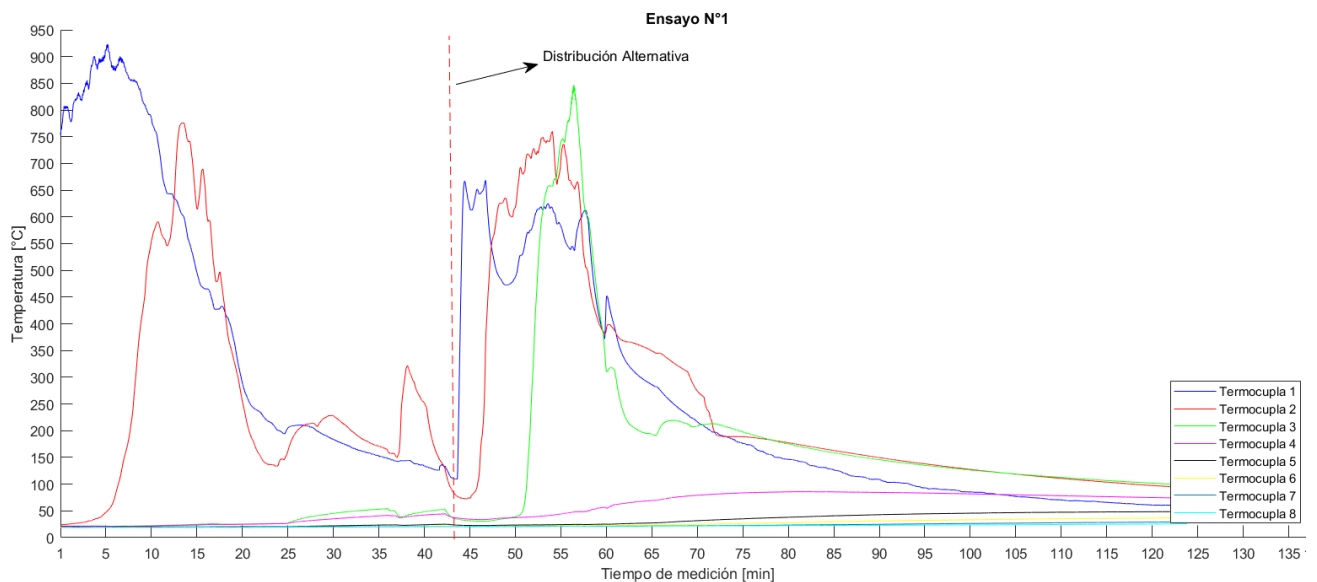


Figura 6.1: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°1.

6.1.2 Gasificación de residuos secos

La Figura 6.2 muestra el perfil de temperaturas en el reactor durante el Ensayo N°2. Se observa que el tiempo entre que se eleva la temperatura entre las termocuplas 3 y 4 es de aproximadamente 15 minutos, mientras que el tiempo entre que las termocuplas 4 y 7 elevan sus temperaturas es de aproximadamente 12 minutos. La Figura 6.3 muestra la composición del gas de síntesis a lo largo del ensayo, se puede observar una disminución del PCI desde un rango de 12 (MJ/Nm³) hasta un rango de 4 (MJ/Nm³) en los minutos en que se elevan las temperaturas en la zona del reactor donde se ubican los residuos secos (entre las termocuplas 4 y 8).

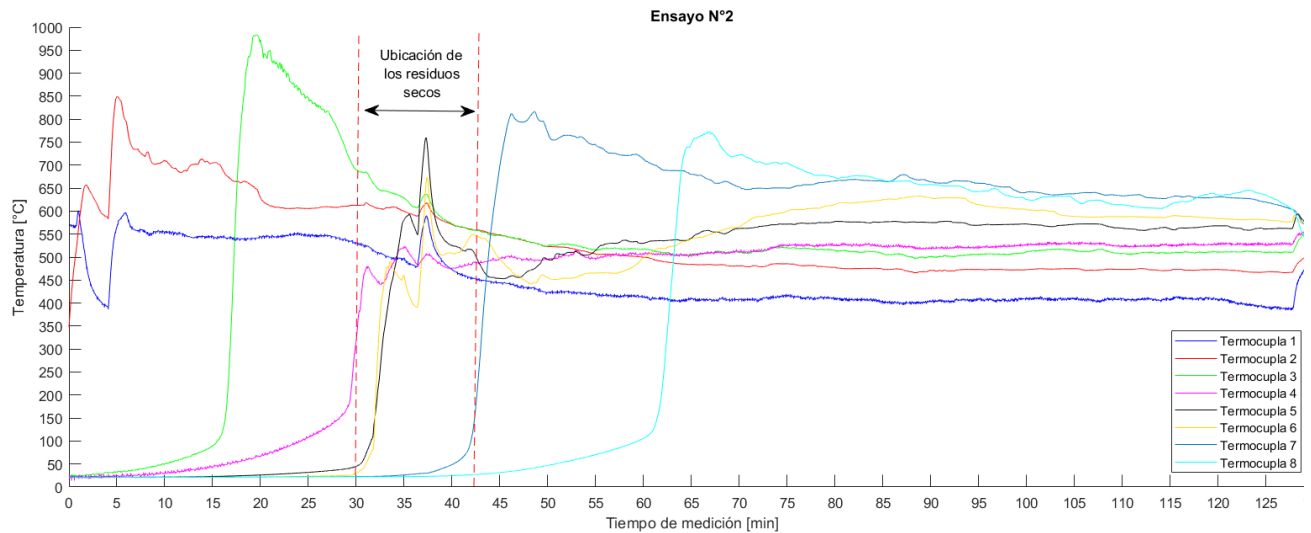


Figura 6.2: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°2.

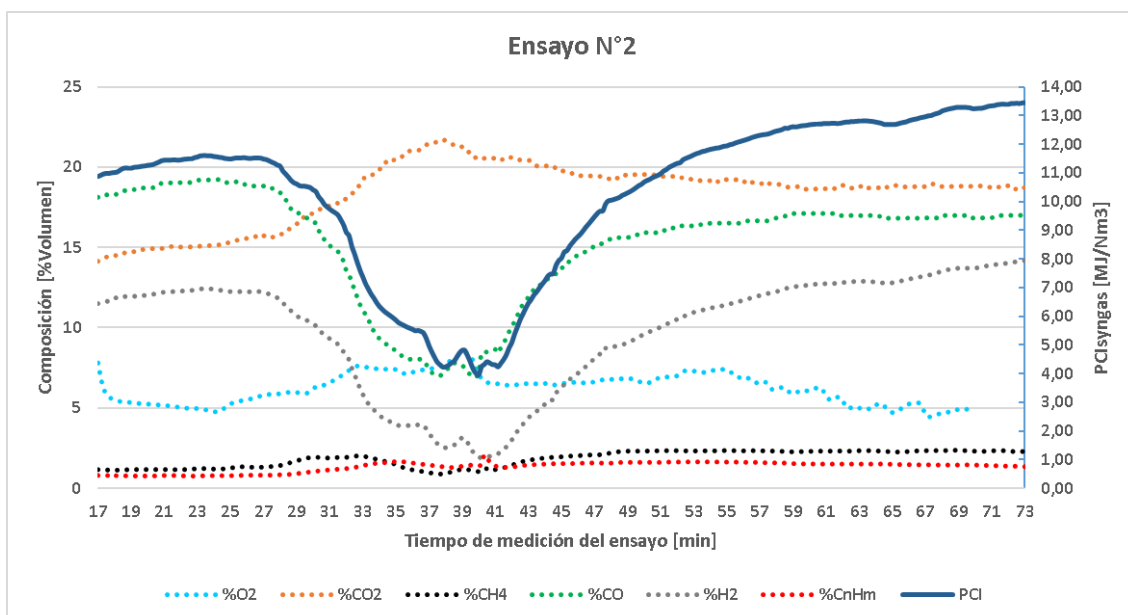


Figura 6.3: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 2.

Durante el Ensayo N°3, al notar la velocidad con la que aumentaba la temperatura en las termocuplas N°4 y N°5, se redujo la entrada de aire, lo cual provocó una disminución en las temperaturas desde un rango entre 550 y 650°C hasta 350 y 500°C, como se puede observar en la Figura 6.4. Con ello, el tiempo entre el aumento de temperatura entre las termocuplas 7 y 8 se incrementó aproximadamente 1 minuto con respecto al tiempo entre las termocuplas 4 y 5. La Figura 6.5 muestra el PCI obtenido de la gasificación de residuos secos, al igual que el ensayo anterior, el PCI disminuye en el periodo en que aumenta la temperatura en la zona de los residuos secos.

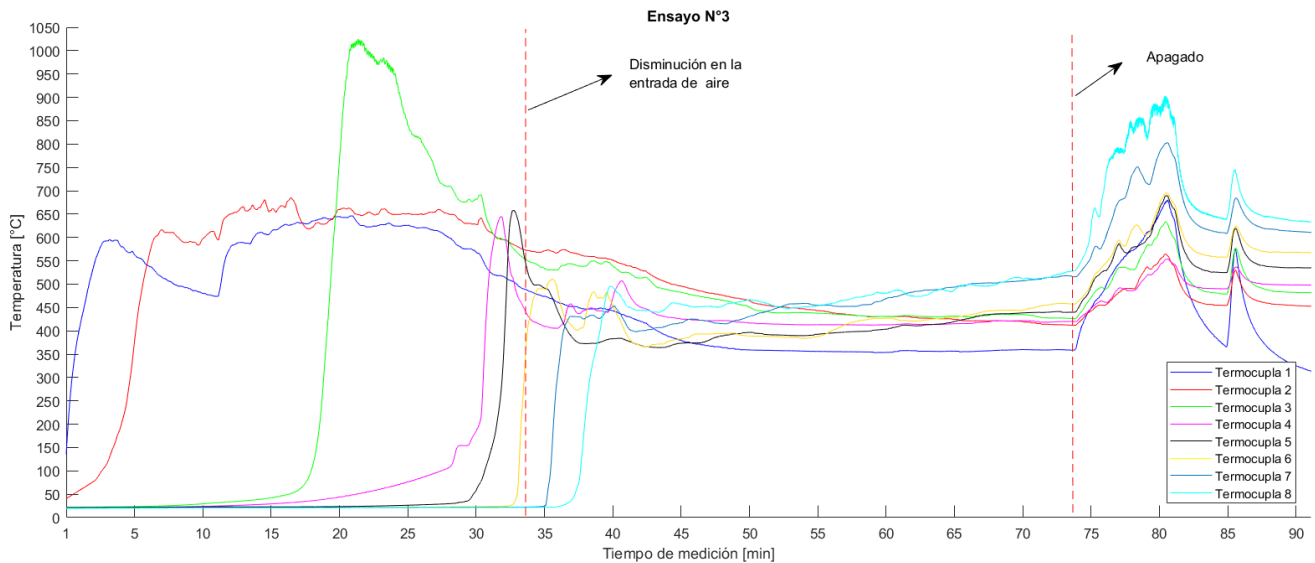


Figura 6.4: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°3.

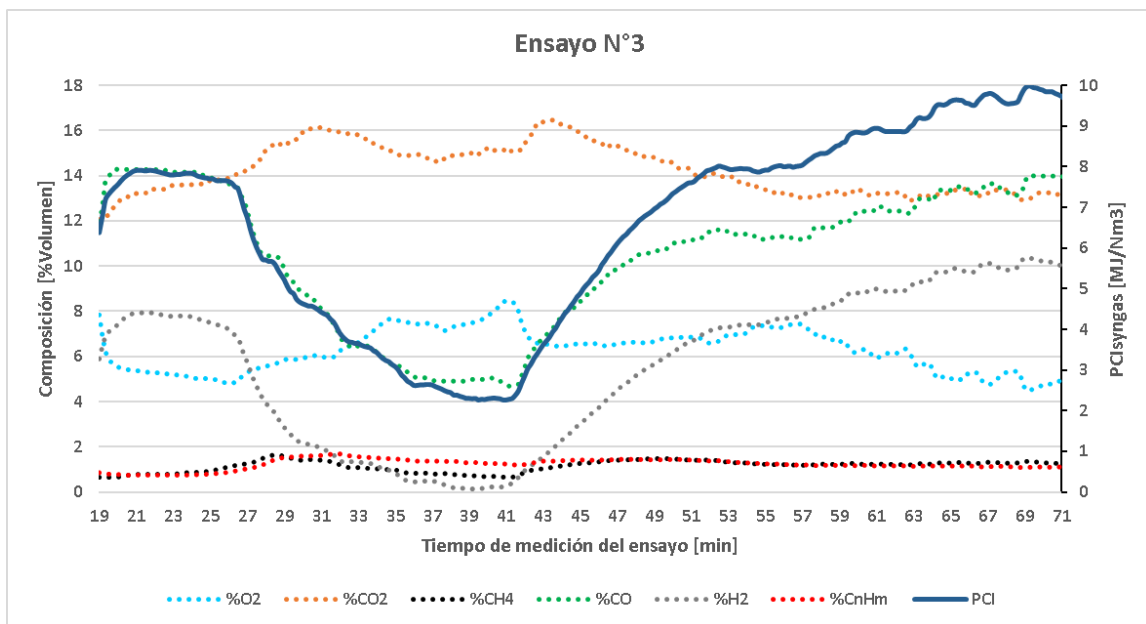


Figura 6.5: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 3.

6.1.3 Gasificación de RSU

La Figura 6.6 presenta el perfil de temperaturas del ensayo N°4, en esta se analiza la velocidad con la que se consumen los residuos, siendo un periodo aproximado de 6 minutos. Al observar la Figura 6.7, debido a que el tiempo de estancia de los RSU en el reactor es bajo, no se permite analizar cambios en la composición del gas de síntesis al variar el flujo de aire en un mismo ensayo. Ante esto, se planifica realizar ensayos por separado con flujos de aire permanentes en cada uno de estos, así poder estudiar la composición del gas de síntesis en función de la cantidad de agente gasificante.

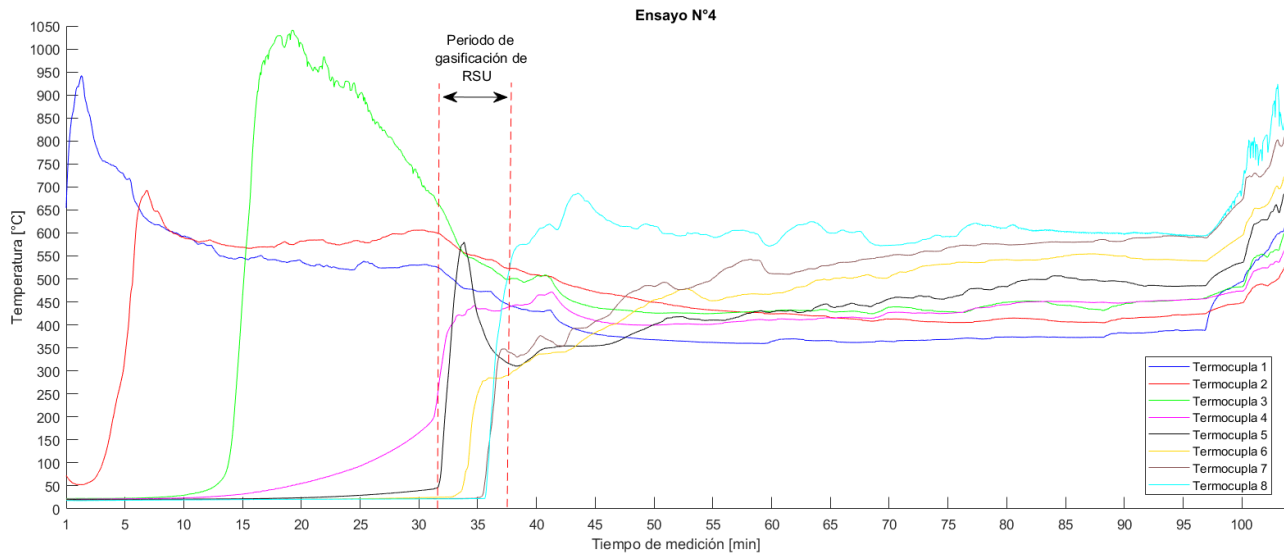


Figura 6.6: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°4.

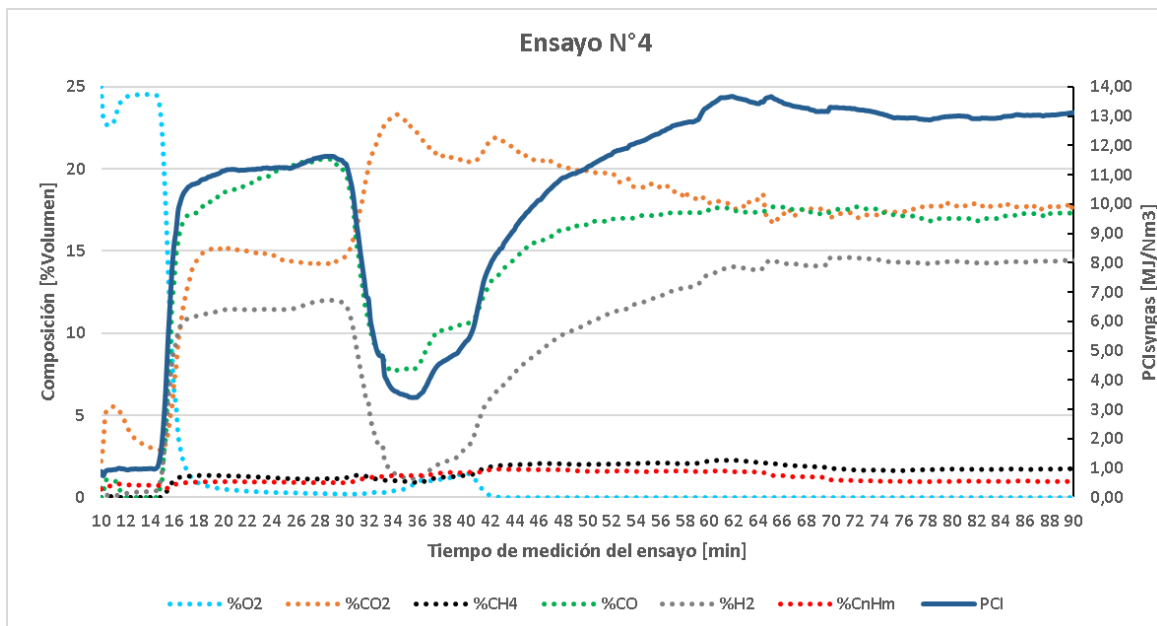


Figura 6.7: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 4.

La etapa final corresponde a la gasificación de los residuos sólidos urbanos. Tras estudiar el desarrollo del proceso en los ensayos previos se realizaron cuatro ensayos utilizando la distribución final presentada en la Figura 5.11. Los flujos de aire para cada ensayo se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Flujo de aire para la gasificación de RSU

Parámetro	Ensayo			
	N°5	N°6	N°7	N°8
Flujo instantáneo de aire entrada primaria [l/min]	11-17	7-15	16-18	14-15
Flujo instantáneo de aire entrada secundaria [l/min]	0	0	0	12-15

La Figura 6.8 entrega el perfil de temperatura para el ensayo N°5. Los periodos de gasificación de RSU que se presentan en la gráfica son calculados en el capítulo 6.2.2.

En la Figura 6.9 se observa la variación en la composición del gas de síntesis durante el periodo de gasificación de RSU. En esta, el PCI oscila entre 3 (MJ/Nm³) y 5,5 (MJ/Nm³).

Tras lo analizado en el Ensayo N°5, con el objetivo de estabilizar el PCI del gas de síntesis producto de los RSU se procedió reducir el flujo de aire, con el objetivo disminuir la velocidad con la que aumentan las temperaturas y así aumentar el periodo de gasificación de RSU.

Sin embargo, durante el ensayo N°6 las temperaturas disminuyeron a tal punto que las mediciones de la termocupla 6 no presentaban un aumento marcado de temperatura, como lo fue en las termocuplas 4 y 5. Del mismo modo, la termocupla 8 no aumentaban de temperatura como se observa en la Figura 6.10.

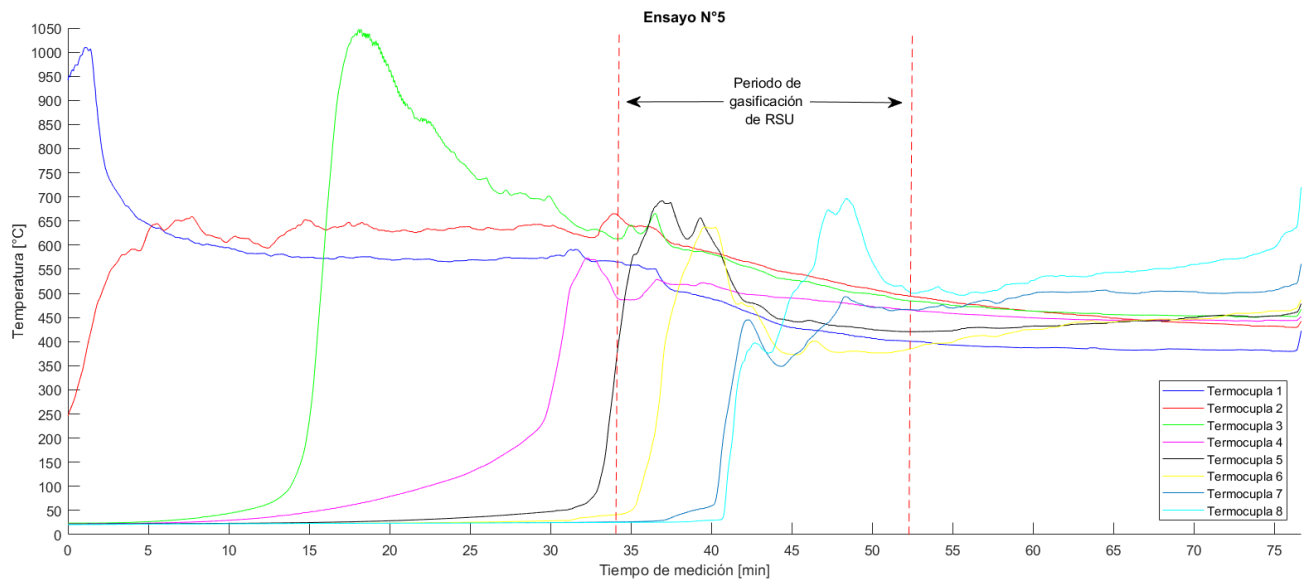


Figura 6.8: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°5.

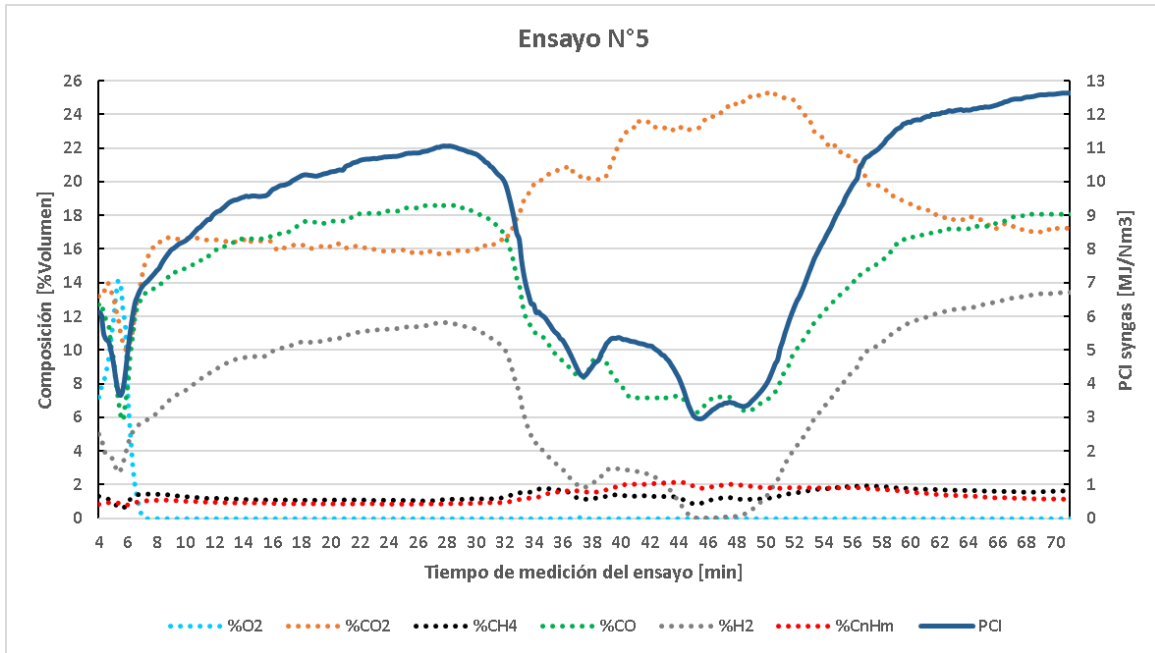


Figura 6.9: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 5.

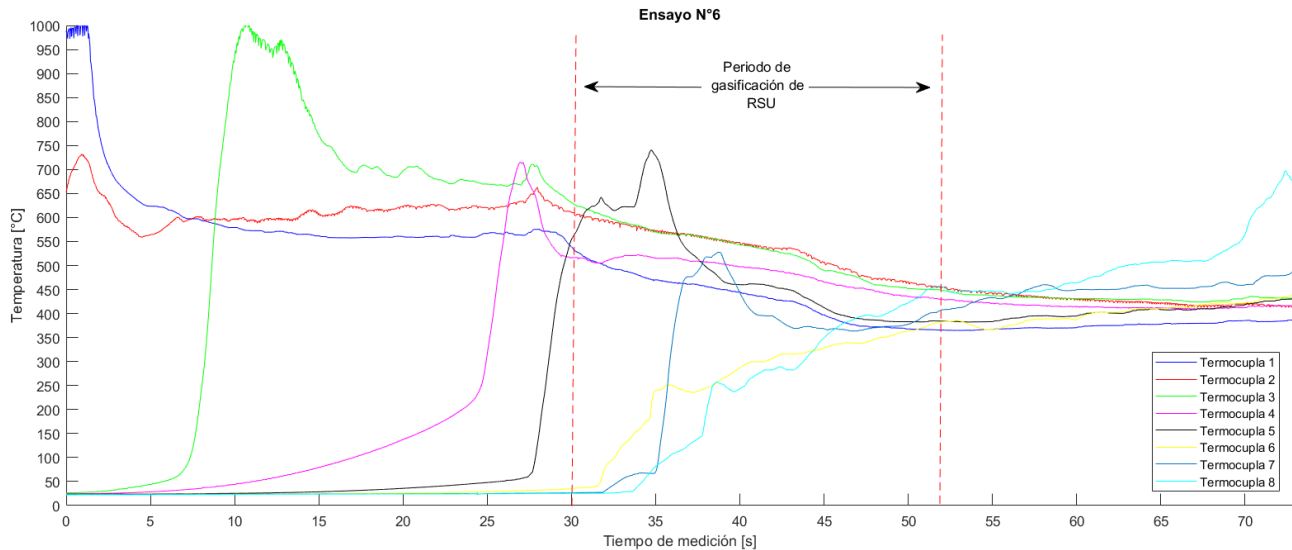


Figura 6.10: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°6.

Por otro lado, al analizar la Figura 6.11, se observa la composición de los gases durante el Ensayo N°6, el PCI continuaba disminuyendo evidenciándose en la llama a la salida de los gases de la Figura 5.12.

Se aumentó el flujo de aire, para evitar que se apagara el reactor. Con la posibilidad que al continuar disminuyendo el flujo de aire el reactor se apagara se planteó analizar el comportamiento al incrementar los flujos de aires en los ensayos siguientes.

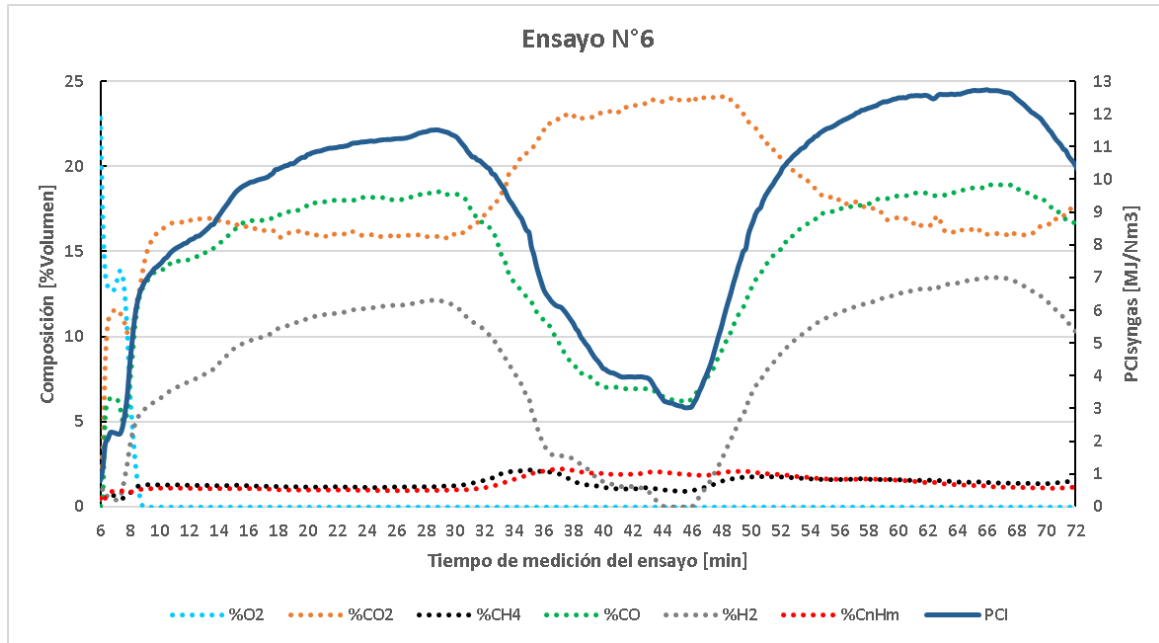


Figura 6.11: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 6.

La Figura 6.12 y Figura 6.13 presentan el perfil de temperaturas y la composición del gas de síntesis para el ensayo N°7 respectivamente. En el perfil de temperatura se evidencia un aumento en la magnitud de las mediciones en las zonas del reactor donde se ubican los RSU, llegando hasta los 700°C. Por otro lado, el tiempo de estancia disminuye a 11,67 minutos. El PCI aumenta con respecto al Ensayo N°6, manteniendo en todo momento una magnitud superior a los 3 (MJ/Nm³).

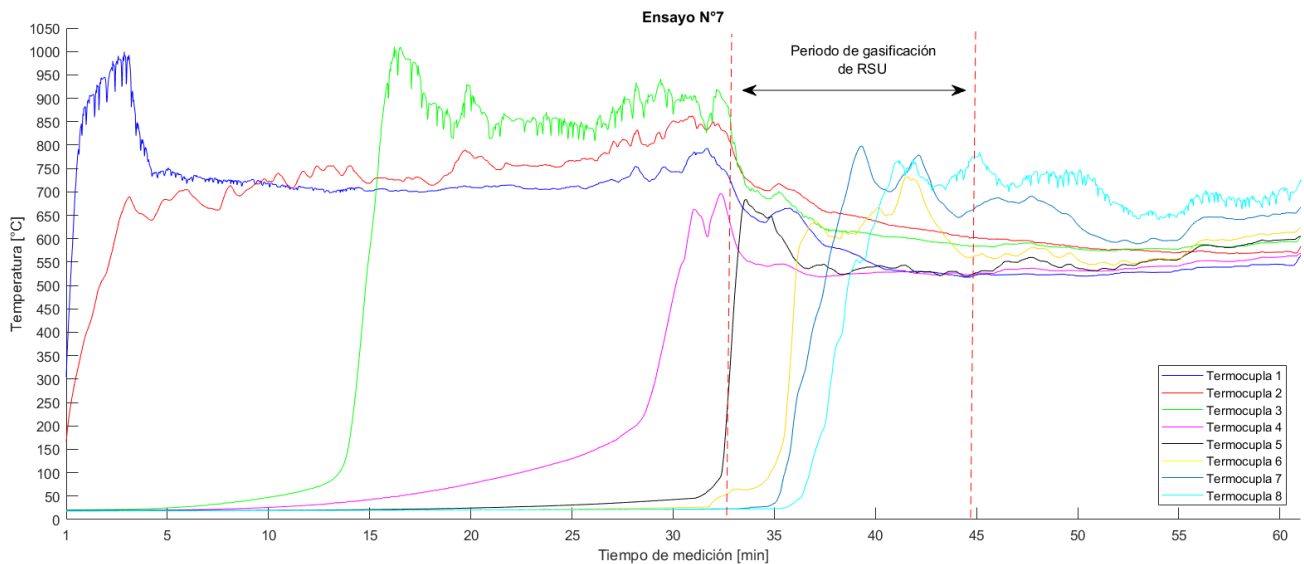


Figura 6.12: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°7.

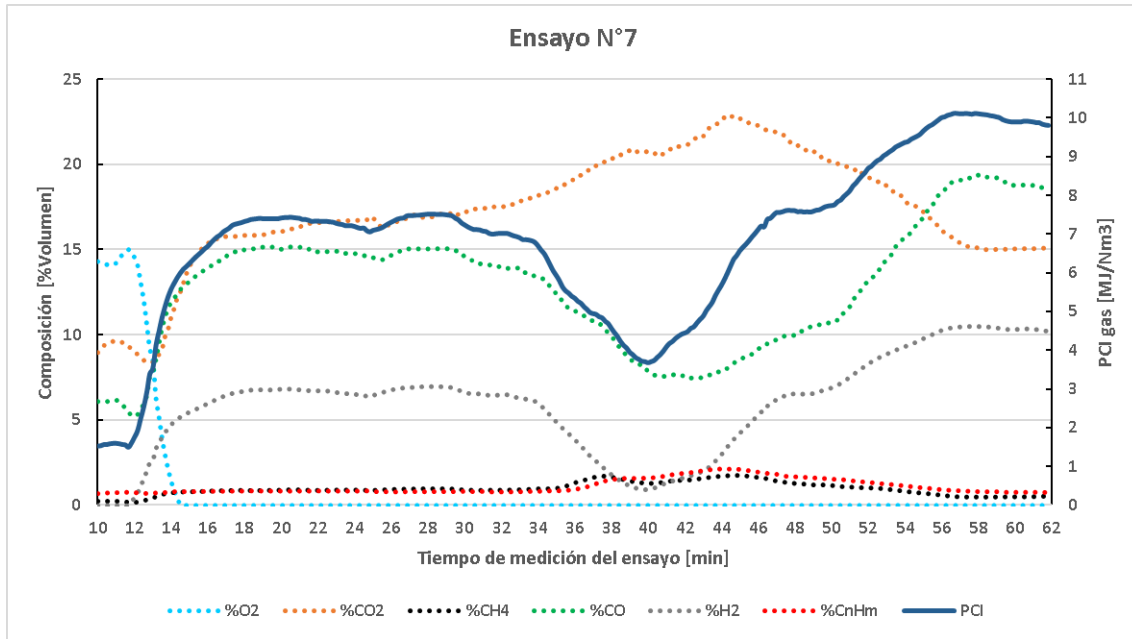


Figura 6.13: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 7.

El ensayo final corresponde al Ensayo N°8. De los ensayos previos se pudo notar la tendencia a una proporcionalidad directa entre la velocidad con que aumentaba la temperatura a lo largo del reactor con el flujo de aire que ingresaba. Aumentar el agente gasificante provocaba un aumento en la temperatura del proceso.

Ante esto, se decidió aumentar una vez más el flujo de aire durante el Ensayo N°8, pero esta vez mediante la apertura de la válvula de entrada de aire secundaria. Con el objetivo de observar el comportamiento del proceso frente a una entrada del agente gasificante mas distribuida alrededor de la carga de RSU.

En el perfil de temperaturas del ensayo N°8 presentado en la Figura 6.14 se puede observar que la velocidad con la que se consumen los residuos aumenta a tal punto, que las termocuplas 4 y 5 no alcanzan a los 500°C. Luego, en las termocuplas 6, 7 y 8 se eleva las temperaturas hasta los 600°C.

Sin embargo, al momento de quemar el gas a la salida se obtuvo la llama más estable de los 5 ensayos realizados con RSU, como se observa en la Figura 5.12.

Por último, al observar la composición de los gases en la Figura 6.15 se observa que el PCI alcanza el valor más elevado de los 4 ensayos, con una magnitud máxima durante el periodo de gasificación de RSU de 5,96 (MJ/Nm³).

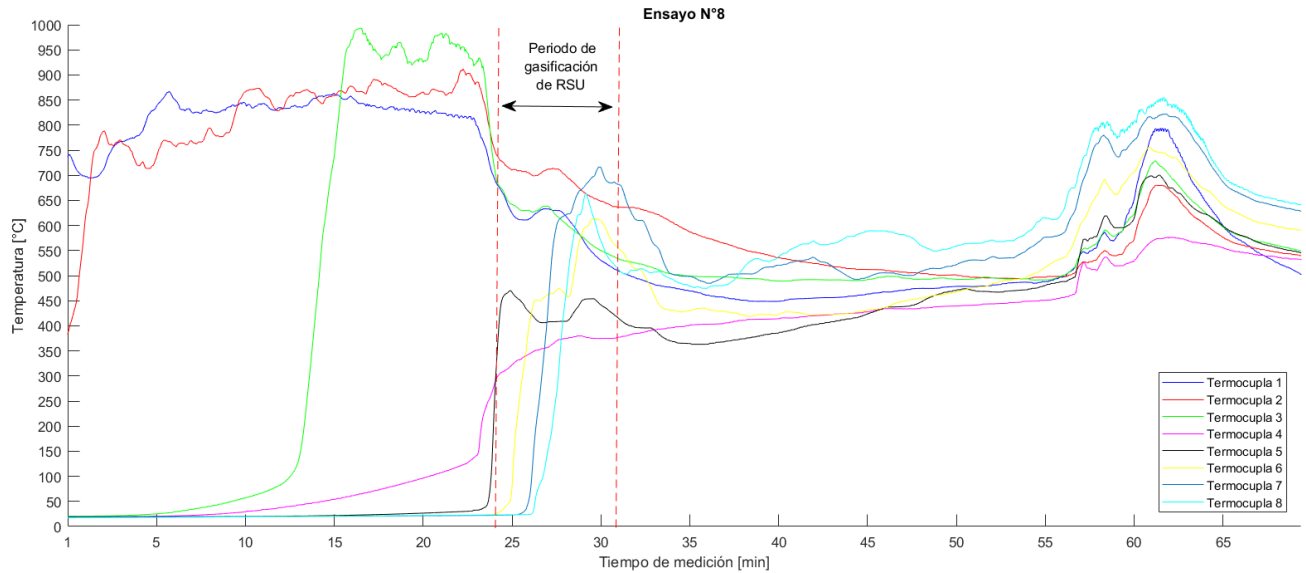


Figura 6.14: Perfil de temperaturas en el reactor durante Ensayo N°8.

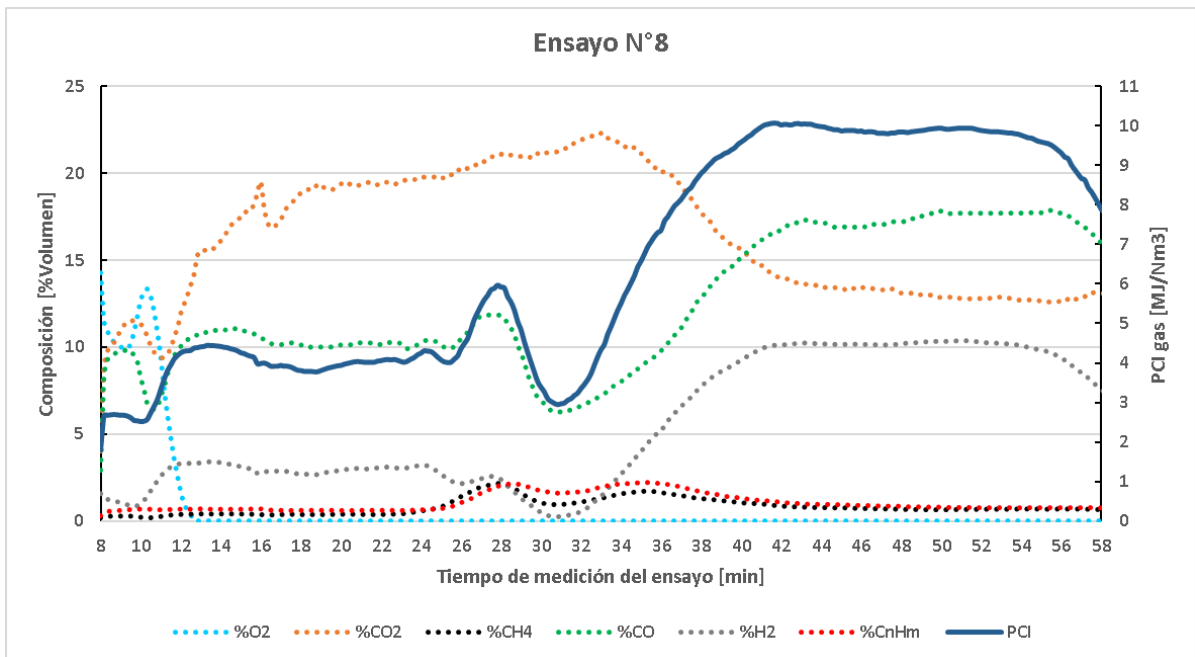


Figura 6.15: Composición del gas de síntesis en Ensayo N° 8.

Si bien el foco de los ensayos está puesto en la gasificación de los RSU, en la Figura 6.15 se nota una disminución en el PCI del gas generado por la capa superior del combustible auxiliar. Luego, finalizado el período de gasificación de RSU, el PCI se incrementa al alcanzar la capa inferior de pellet.

6.2 Análisis de resultados

6.2.1 Desarrollo del proceso en el reactor

De los resultados obtenidos en los capítulos 6.1.1 y 6.1.2 se infiere un comportamiento lineal del proceso de gasificación a lo largo del reactor. Estudiando el perfil de temperaturas obtenido por las termocupas y la llama al quemar el gas vemos como el combustible auxiliar y los residuos combustionan y gasifican desde la capa superior avanzando hasta la capa inferior, esto es evidenciado en la Figura 6.1, donde el pellet comienza a gasificar, y a medida que la llama descende por el reactor hace contacto con la capa de residuos y se apaga. Debido a la forma de propagación ascendente del calor en el reactor, se concluye que no es capaz de realizar el secado de los residuos con alto contenido de humedad, lo que obligó a realizar un secado de la materia orgánica mediante un tratamiento previo.

Posteriormente se analizó la gasificación de los residuos secos, en esta se pudo observar como el comportamiento mencionado anteriormente se mantiene. Se observa un cambio en el PCI del gas de síntesis en la Figura 6.3 y la Figura 6.5 el cual coincide con el aumento de temperaturas en las termocupas donde se ubican los residuos. De lo anterior, es que se atribuye el desarrollo del proceso de la gasificación en las etapas detalladas en el esquema de la Figura 6.16. En base a estas etapas que del proceso al interior del reactor se desarrollará el análisis de los resultados en la gasificación de RSU.

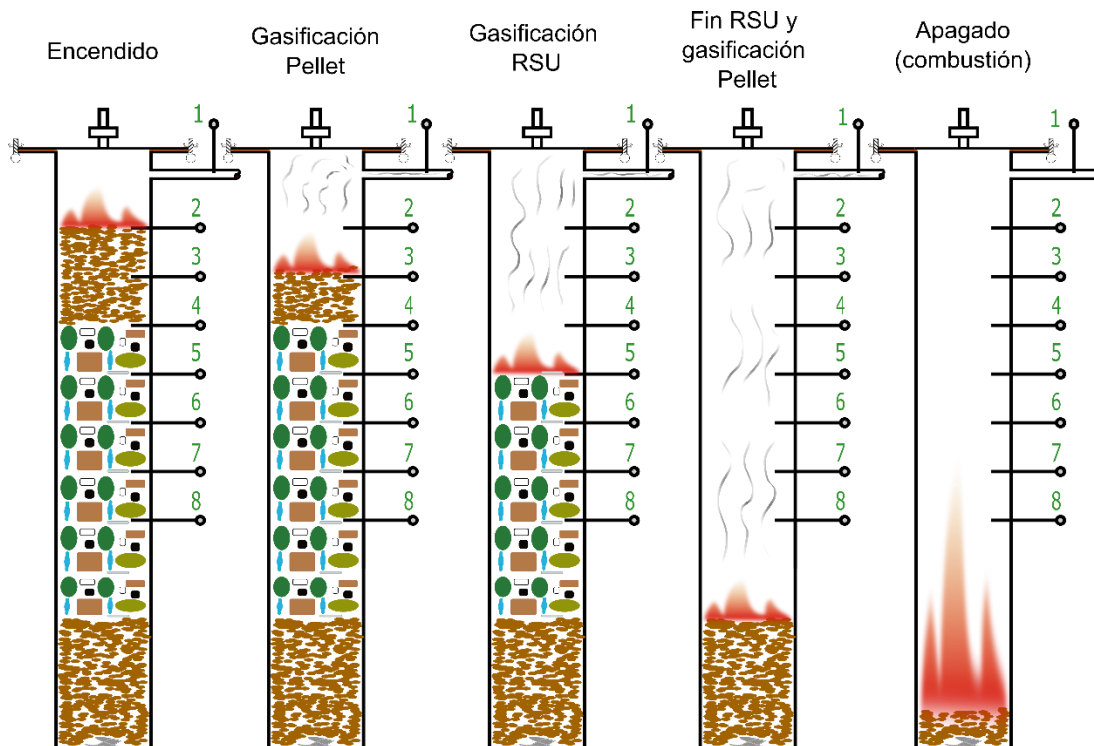


Figura 6.16: Etapas del proceso de gasificación al interior del reactor.

6.2.2 Periodo de gasificación de residuos

Basado en el análisis del capítulo 6.2.1 se considera periodos de medición donde se asume una gasificación pura de RSU como se muestra en la Figura 6.16. Para los ensayos finales este periodo corresponde a los RSU ubicados desde la termocupla 5 hasta la capa inferior de combustible auxiliar.

Para una mezcla de residuos homogénea se asume una proporcionalidad directa entre la masa de residuos y la altura que esta ocupa en el reactor. Del mismo modo una proporcionalidad directa entre el tiempo en el que se consumen los RSU a un flujo determinado de aire y la altura que estos ocupan en el reactor. De la distribución presentada en la Figura 5.10 y visualizando las mediciones experimentales del tiempo en el que las temperaturas en las termocuplas 5 y 8 se elevaron hasta los 400°C se obtienen las siguientes proporciones directas:

- Masa de RSU gasificada:

$$\begin{aligned} 3,05 \text{ kg}_{RSU} &\rightarrow 60 \text{ cm}_{altura} \\ X \text{ kg}_{RSU} &\rightarrow 50 \text{ cm}_{altura} \end{aligned}$$

- Período de tiempo para el consumo de los RSU:

<i>Ensayo N°5</i>	<i>Ensayo N°6</i>	<i>Ensayo N°7</i>	<i>Ensayo N°8</i>
30 $\text{cm}_{altura} \rightarrow 11 \text{ min}$	30 $\text{cm}_{altura} \rightarrow 13 \text{ min}$	30 $\text{cm}_{altura} \rightarrow 7 \text{ min}$	30 $\text{cm}_{altura} \rightarrow 4 \text{ min}$
50 $\text{cm}_{altura} \rightarrow x \text{ min}$	50 $\text{cm}_{altura} \rightarrow x \text{ min}$	50 $\text{cm}_{altura} \rightarrow x \text{ min}$	50 $\text{cm}_{altura} \rightarrow x \text{ min}$

Para completar los cálculos se realiza el balance másico del reactor para determinar la masa de gas síntesis producto del proceso de gasificación. El balance se muestra en la ecuación (6), donde el contenido de ceniza se obtiene del análisis elemental de los residuos de la Tabla 4.1.

$$\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{combustible} = \dot{m}_{syngas} + \dot{m}_{ceniza} \quad (6)$$

Los periodos de tiempo que se consideran para la gasificación de RSU en los ensayos finales y los resultados obtenidos para el balance de masa se presenta en la Tabla 6.2. El PCI del combustible es calculado usando la ecuación (3). El procedimiento de cálculo se adjunta en el anexo A.3.

Tabla 6.2: Composiciones estudiadas en los ensayos finales.

Parámetro	Ensayo N° 5	Ensayo N°6	Ensayo N°7	Ensayo N°8
Tiempo de medición [min]	18,33	21,67	11,67	6,67
Flujo de aire promedio [l/min]	14	11	17	28
Flujo total de aire [l]	256,62	238,37	198,39	186,76
$m_{combustible}$ [kg]	2,542	2,542	2,542	2,542
$PCI_{combustible}$ [MJ/kg]	17,517	17,517	17,517	17,517
m_{aire} [kg]	0,309	0,287	0,23892	0,2249
m_{syngas} [kg/s]	2,277	2,255	2,207	2,193

6.2.3 Composición del gas de síntesis

El analizador TY6330P entrega la composición porcentual en volumen del CH₄, CO, CO₂, H₂, C_nH_m y del O₂ en el gas de síntesis producido. Además, entrega el PCI del gas en unidades de energía por volumen total de gas (MJ/Nm³). Sin embargo, en el gasificador no se mide el flujo volumétrico de gas generado, por lo que no es posible calcular la eficiencia del gas frío definida en el capítulo 6.2.2.

De los resultados experimentales se conoce la composición en porcentaje de volumen medida por el analizador para las componentes presentadas en la Tabla 6.3. Para ello, se consideró el lapso de tiempo donde se tenía un PCI con menores oscilaciones, dentro del periodo de gasificación de RSU definido en el capítulo 6.2.2. Estos cálculos se adjuntan en el anexo A.4.

Tabla 6.3: Composición promedio del gas de síntesis durante los ensayos

Medición	Ensayo N°5	Ensayo N°6	Ensayo N°7	Ensayo N°8
Periodo del ensayo considerado [min]	36-50	40-46	38-42	25-29
T° media salida de los gases [°C]	459,8	416,7	549,3	616,5
Media CH ₄ [% volumen]	1,23	1,01	1,43	1,69
Media CO [% volumen]	7,53	6,71	8,21	10,94
Media CO ₂ [% volumen]	22,90	23,67	20,74	20,58
Media H ₂ [% volumen]	1,48	0,70	1,28	2,27
Media C _n H _m [% volumen]	1,90	1,96	1,65	1,53
Media O ₂ [% volumen]	0,00	0,00	0,00	0,00
Media PCI [MJ/Nm ³]	4,27	3,65	4,06	5,02

6.2.4 Análisis de las reacciones de gasificación

La Figura 6.17 presenta la comparación entre las distintas composiciones en los ensayos finales determinadas en el capítulo 6.2.3.

Se calcula la razón de equivalencia (RE) en cada ensayo, la cual corresponde a la razón entre el aire utilizado en el proceso de gasificación con el aire necesario para la combustión estequiométrica del combustible a base de RSU. Los resultados se presentan en la Tabla 6.4 mientras que los cálculos de la masa de aire necesaria para la combustión estequiométrica y la RE se presenta en el anexo A.5.

Tabla 6.4: Razón de equivalencia en ensayos finales

Parámetro	Ensayo N°5	Ensayo N°6	Ensayo N°7	Ensayo N°8
Masa aire para combustión estequiométrica [kg]	12,992	12,992	12,992	12,992
RE [%]	2,38	2,21	1,84	1,73

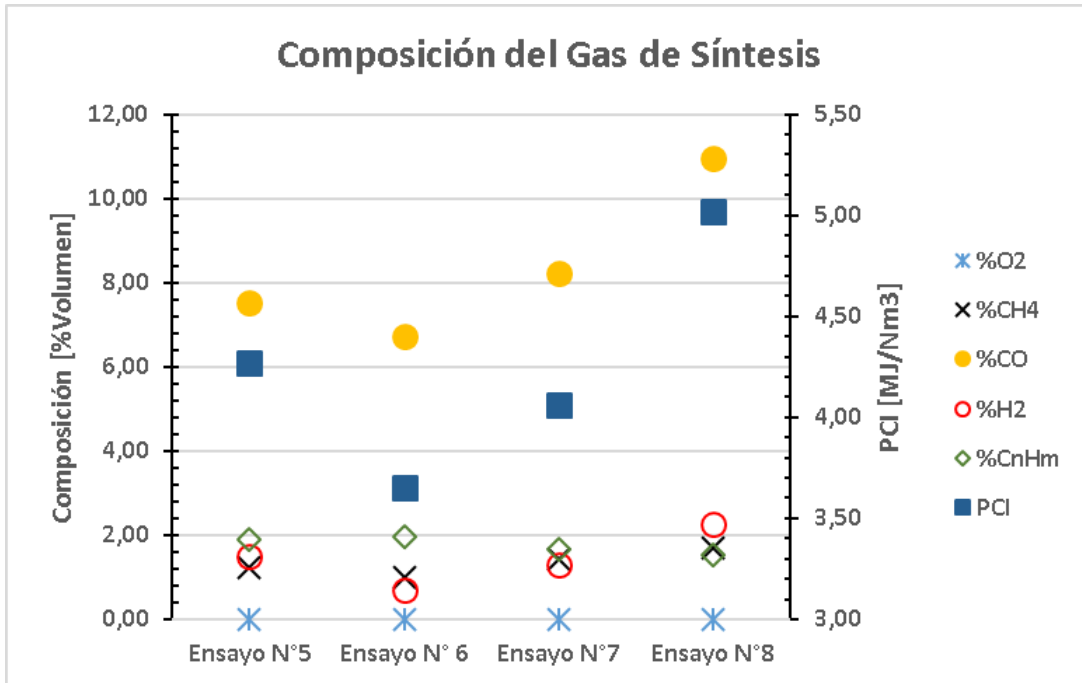


Figura 6.17: Comparación de la composición de los gases resultantes en ensayos finales

El PCI obtenido en el gas de síntesis en los ensayos finales se mantiene dentro del rango esperado de la gasificación de RSM utilizando como agente gasificante aire acorde a lo explicado en el capítulo 3.2.2, a excepción del Ensayo N°3, donde el PCI se encuentra bajo los 4 (MJ/Nm³). En este, se asume que el bajo flujo de entrada de aire disminuye las reacciones de gasificación.

Al analizar la relación entre el PCI y la concentración de sus componentes, podemos notar que el aumento del poder calorífico del gas de síntesis se debe al aumento en las concentraciones de H₂, en menor cantidad al aumento de la concentración de CH₄ y al aumento del CO, el cual experimenta un aumento de hasta un 4,2% en la composición del volumen total de gas. De forma inversa, al aumentar el PCI, el volumen de hidrocarburos presentes tiende a disminuir al igual que el CO₂.

De acuerdo a la información estudiada en la literatura, a temperaturas inferiores a los 600°C, el carbono y el oxígeno tienden a permanecer en forma de CO₂ y como "Char", disminuyendo la conversión de este último. Por otro lado, al aumentar las temperaturas y al estar en presencia de exceso de carbono, el oxígeno tiende a reaccionar con el carbono antes que el hidrógeno (para formar H₂O), rompiéndose el CO₂ y aumentando la formación de CO, de esta forma también aumenta la formación de H₂. Cuando las temperaturas superan los 600°C, el CH₄ como otros hidrocarburos tienden a descomponerse [10].

Lo anterior es evidenciado en los ensayos experimentales, donde para los ensayos N°5, N°7 y N°8 se presentaron temperaturas sobre los 600°C. Lo que aumentó las concentraciones de CO, H₂ y disminuye la concentración de hidrocarburos y CO₂.

Al analizar las reacciones al interior del gasificador, la disminución del flujo de aire implicó la reducción de las temperaturas en el reactor, de ahí se asume que se generan las reacciones de hidrogasificación y metanización, presentadas en la Tabla 3.4, lo que termina en la disminución del CO y H₂, aumentando la concentración del metano.

Por otro lado, cuando se aumentó el flujo de aire, aumentaron las temperaturas, y esto termina por desencadenar las reacciones de gasificación de la Tabla 3.5, donde el reformado en seco y la reacción de Boudouard descomponen los hidrocarburos e incrementan la formación de CO y H₂. Del mismo modo ocurre con la oxidación de hidrocarburos presentada en la Tabla 3.2.

Por último, al momento de analizar los resultados se puede notar que la razón de equivalencia es baja con respecto a lo estudiado en la literatura, donde las más altas eficiencias para la gasificación de RSM se encuentran para un rango de RE entre 0,25-0,35 (25-35% del aire necesario para la combustión estequiométrica) [10]. Esto se puede evidenciar en la ausencia de oxígeno en el gas.

Durante los ensayos, cuando se intentó aumentar el flujo de aire, resultó en un consumo más rápido de los residuos como se puede ver en la Figura 6.18, lo que implicó incluso la disminución de la RE. Por el contrario, cuando se disminuyó el flujo de entrada, aumentó el tiempo, sin embargo, el reactor disminuyó considerablemente su temperatura dando indicios de un posible apagado.

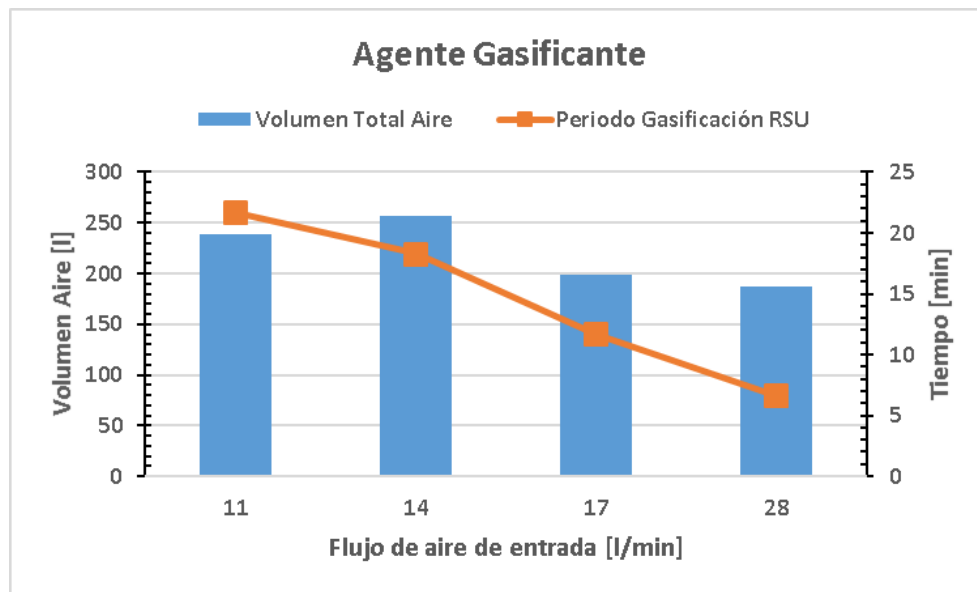


Figura 6.18: Volumen de aire durante los ensayos finales.

6.2.5 Comparación con proyectos previos

Para completar el análisis de la composición del gas de síntesis generado, los resultados serán comparados con los resultados obtenidos en el proyecto presentado en el capítulo 3.4.1, para ello, la Tabla 6.5 presenta el promedio de la composición obtenida en los ensayos finales comparada con la composición del proyecto de gasificación en Paraná [11].

Tabla 6.5: Comparación de resultados con proyecto en Brasil.

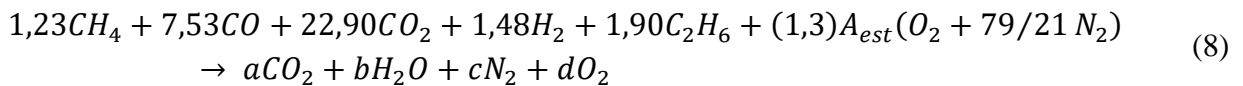
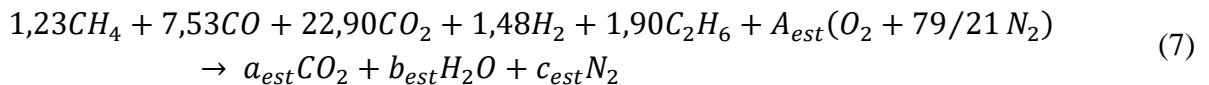
Promedio Ensayo	Composición componentes [% Volumen]			
	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
Universidad de Concepción	1,43	1,34	8,35	21,97
Energia Limpa do Brasil Company	3,81	3,43	4,20	13,39

Al comparar los resultados se observa que la diferencia radica principalmente en las elevadas concentraciones de monóxido de carbono y dióxido de carbono. Los ensayos llevados a cabo en Brasil fueron realizados a una temperatura promedio en el reactor de 740°C. A diferencia de los ensayos experimentales realizados en la Universidad de Concepción, donde no se pudo estabilizar una temperatura, y la mayor parte del tiempo fue inferior a los 740°C. A estas diferencias de temperatura se puede adjudicar la menor concentración de H₂ generado.

Sin embargo, la elevada concentración de CO₂ y también de CO apuntan a una presencia mayoritaria de las reacciones de oxidación presentadas en la Tabla 3.2, cuyos productos son el monóxido y dióxido de carbono.

6.2.6 Análisis de emisiones por combustión del gas de síntesis

En base a los cálculos anteriores se determinará las emisiones de CO₂ producto de la combustión del gas de síntesis. La ecuación (7) representa la combustión estequiométrica del gas mientras que la ecuación (8) la combustión con exceso de aire, para esta se ocupa un 30% de exceso de aire. Como en este proyecto no se calculó la CGE, se considera los resultados del Ensayo N°5, ya que esta posee la RE de mayor magnitud. En cuanto a la composición correspondiente a hidrocarburos se consideró C₂H₆ para estimar las emisiones CO₂.



El procedimiento de cálculo completo se presenta en el anexo A.6. Los resultados para la combustión con exceso de aire se presentan en la Tabla 6.6 donde se comparan con el factor de emisión promedio del sistema eléctrico nacional [34]. Para obtener los resultados más conservadores se utiliza la eficiencia eléctrica considerada al momento de calcular el potencial energético de la región en el capítulo 4.

Tabla 6.6: Factor de emisiones de CO₂ tras la combustión del gas de síntesis

Ítem	Valor
Factor de emisiones por gasificación de RSU [t_{CO_2eq}/MWh]	0,591
Factor de emisión promedio SEN [t_{CO_2eq}/MWh]	0,3006

6.3 Análisis del combustible auxiliar

La última etapa de análisis corresponde al comportamiento del combustible auxiliar. Sin enfocarse en la composición y poder calorífico del pellet, se estudió el PCI en el gas de síntesis generado durante los periodos de gasificación del combustible auxiliar establecidos en la Figura 6.16.

De las curvas de PCI de la Figura 6.9, Figura 6.11 y Figura 6.13 se puede notar un aumento en el PCI cuando se gasifica la capa inferior de pellet, con respecto al poder calorífico calculado mientras se gasifica la capa superior del combustible auxiliar. La Tabla 6.7 muestra el incremento del poder calorífico del gas de síntesis calculando un PCI promedio para ambos periodos, no se consideró el Ensayo N°8 por la elevada diferencia, la cual puede requerir un análisis en profundidad que escapa de los objetivos de este proyecto.

Tabla 6.7: Cálculo del PCI en el gas de síntesis producto de la gasificación de pellet.

Variable	Ensayo N° 5	Ensayo N° 6	Ensayo N° 7
Periodo de gasificación capa superior [min]	15-28	15-30	18-30
PCI promedio al gasificar la capa superior [MJ/Nm ³]	10,45	10,85	7,35
Periodo de gasificación capa inferior [min]	58-70	54-67	50-60
PCI promedio al gasificar la capa inferior [MJ/Nm ³]	12,12	12,30	9,39
Incremento del PCI promedio por capa [MJ/Nm ³]	1,67	1,75	2,04
Incremento del PCI promedio por capa [%]	15,98	13,36	27,76

Finalmente, se observa a una tendencia en el aumento del poder calorífico entre ambas capas de un porcentaje entre 15-28%. En el anexo A.4 se presenta el cálculo de los PCI para el Ensayo N°5.

Ante esto se analiza la posibilidad de que el combustible no se gasifica por completo en los distintos periodos mencionados en la Figura 6.16, reduciendo su tamaño y acumulándose en el fondo del reactor, por lo que el aumento en el PCI pueda deberse a una gasificación en conjunto de pellet y residuos.

CAPÍTULO 7: Análisis Económico Preliminar

En este capítulo se realiza un análisis económico preliminar para la instalación de una planta de gasificación de RSM en la región del Biobío para analizar si un proyecto de esta magnitud es económicamente viable.

En nuestro país, esta tecnología no ha sido desarrollada aún, por lo que no se posee índices económicos ni proyectos previos que se puedan considerar. Se analizaron los siguientes aspectos económicos:

7.1 Costo de Inversión

Un análisis técnico-económico realizado en Brasil [35] estima los costos de inversión para un sistema de gasificación considerando una CGE de 75% para el proceso térmico. Para realizar los cálculos en función de las toneladas de residuos tratadas se calcula el flujo de combustible para el cual se obtendría dicha generación de energía térmica, el cálculo es presentado en el anexo A.7. El costo de inversión por tonelada de residuo al día se presenta en la Tabla 7.1, luego, la Figura 7.1 presenta la curva para estimar las inversiones en función de las toneladas tratadas por día.

Tabla 7.1: Costos de instalación de gasificador y sistema de limpieza de gases

Generación de energía térmica [35] [kW/h]	Costo [USD] [35]	Flujo de Residuos [ton/d]
500	111.111	3,3
1000	191.111	6,6

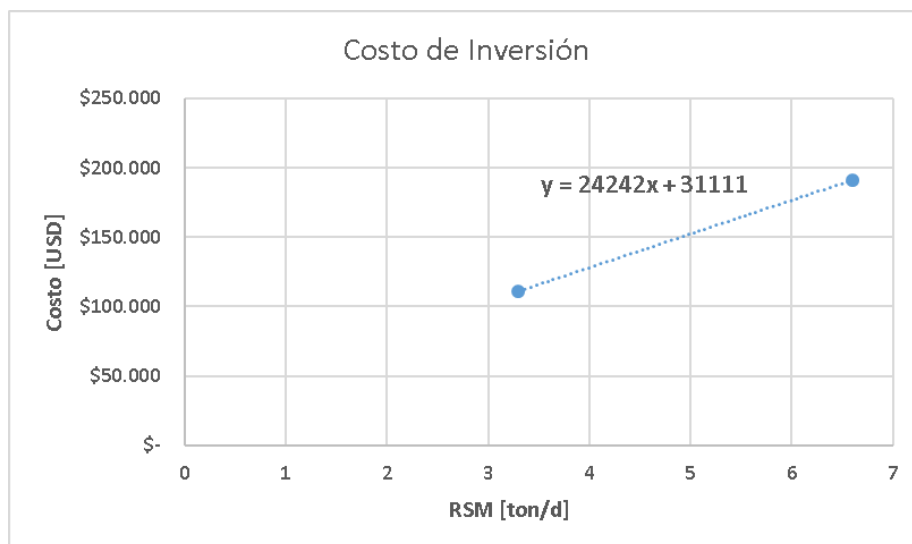


Figura 7.1: Costos de Inversión para sistema de gasificación

Por otro lado, se debe considerar la inversión necesaria para el ciclo a vapor, a través de los estudios realizados por la Comisión Nacional de Energía [36] para los costos en nuestro país, se considera la inversión unitaria para sistema de ciclo abierto de 725 (USD/kW).

7.2 Costos de operación y mantención

Para los costos por mantención de una central de gasificación se consideran una estimación de 3.849 (USD) por día de operación [35].

Para los costos de operación y mantenimiento de una central térmica de ciclo abierto de un 2,5% de la inversión [36].

En cuanto a los costos variables no combustibles se consideró 3,5 (USD/MWh) [36].

7.3 Variables económicas

Las variables económicas que se tomarán en cuenta en este análisis económico serán el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación (payback). El flujo de caja y los cálculos serán realizados a través de una planilla de Excel y utilizando las funciones VNA y TIR de la hoja de cálculo. Para el caso del payback se calculará con la ecuación (9):

$$payback = a + \frac{b}{c} \quad (9)$$

Donde:

a: Periodo del ultimo flujo acumulado negativo.

b: Valor absoluto del último flujo acumulado negativo.

c: Valor del flujo de caja en el periodo siguiente al último flujo acumulado negativo.

Por último, se considera una tasa de recuperación para el inversionista “*i*” de 10%, siendo este el valor superior para analizar las inversiones en instalaciones de transmisión de acuerdo a lo calculado por la Comisión Nacional de Energía [37]. El periodo de vida útil de 20 años.

7.4 Caso de estudio

De la Tabla 4.5 se observa la posibilidad de tratar hasta 2442 toneladas de RSM al día. Al considerar que la planta estará en funcionamiento el 70% de los días del año. Sin embargo, analizando los

proyectos de gasificación a nivel global, el rango de capacidad en centrales en funcionamiento abarca desde 80 hasta las 630 toneladas por día [10,38].

Para el análisis económico, se evaluará la instalación de una planta con capacidad de 300 toneladas de RSM al día. Para el análisis económico se considera una CGE conservadora, de 50%.

Para el caso del inversionista, se considerará la opción (a), haciendo uso de un préstamo con el 50% de la inversión, con un interés comercial de 15,73% anual por 5 años [39], y la opción (b), en el que este cubra la totalidad de la inversión.

Para obtener las ganancias que se tendrían por la venta de la energía eléctrica se considera el Precio Medio de Mercado Sistema Eléctrico Nacional (PMM SEN) de 96,041 (CLP/kWh) [40]

Los resultados se presentan en la Tabla 7.2 mientras que los flujos de caja se presentan en el anexo A.8. Los cálculos fueron realizados usando como moneda el dólar americano, con un valor del dólar de 791,25 pesos chilenos.

Tabla 7.2: Resultados análisis económico

Parámetro Económico	Opción (a)	Opción (b)
VAN [USD]	8.324.885	8.554.688
TIR [%]	22,46	19,70
Payback [años]	5,87	4,94

Se obtiene 2 VAN similares, con una variación menor a un 3% a favor de la opción (b), sin embargo, se posee una TIR mayor en la opción (a), con aproximadamente 1 año más necesario en el periodo de recuperación. Debido a que no siempre un inversionista contará con el 100% del capital, se selecciona la opción (a) para los siguientes estudios.

7.5 Análisis de Sensibilidad

En base a la selección del capítulo 7.4, se estudiará la influencia en cuanto a la cantidad de toneladas de RSM tratadas por día en los parámetros económicos. La Figura 7.2 muestra la variación del VAN en valor del % del VAN obtenido en la opción (a) del capítulo 7.4 correspondiente a 8.324.885 (USD), la TIR y el periodo de recuperación.

Del mismo modo que con la cantidad de toneladas tratadas a diario. Ahora, se realizará un análisis de sensibilidad con respecto a la variación de la CGE y el efecto que podría tener en la rentabilidad del proyecto, para una capacidad fija de 300 (ton/día), los resultados se presentan en la Figura 7.3.

Los cálculos se presentan en el anexo A.9.

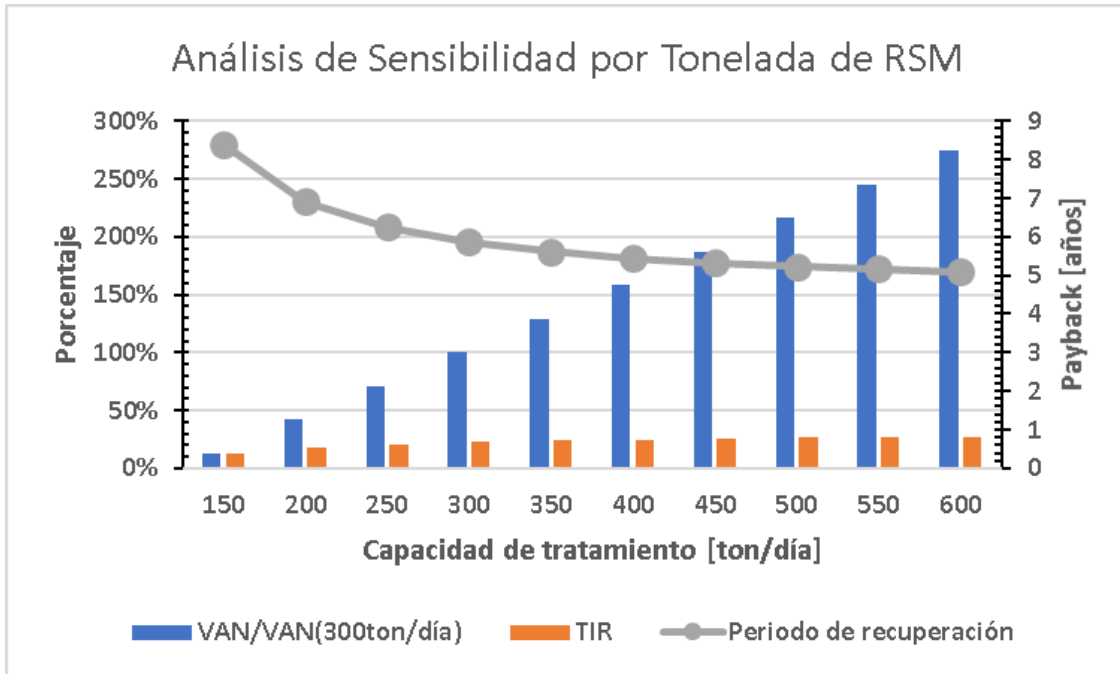


Figura 7.2: Análisis de sensibilidad con respecto a la capacidad de tratamiento de RSM a diario.

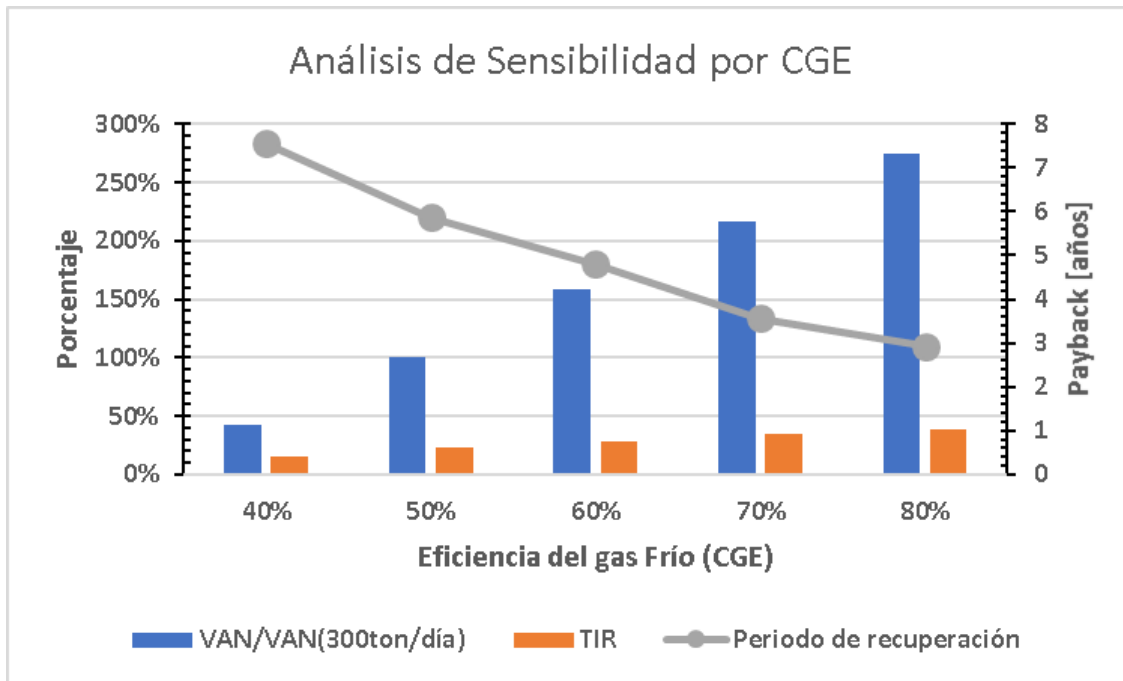


Figura 7.3: Análisis de sensibilidad con respecto a la CGE para una planta de capacidad 300 (ton/día).

Se nota una proporcionalidad directa entre el aumento de capacidad y los beneficios económicos. Del mismo modo con la CGE en el proceso, con aumentar la eficiencia del proceso a un 80% se obtiene

un VAN de 22.816.228 (USD), similar al VAN de 22.803.004 (USD) obtenidos al duplicar la capacidad de tratamiento instala en la opción (a). Sin embargo, el periodo de retorno es de 2,93 años y 5,09 años respectivamente, y la TIR de 38,97% y 27,25% respectivamente. Esto hace notar que la eficiencia del proceso es fundamental, más allá de la capacidad tratamiento instalada.

Se debe especificar que este análisis económico corresponde a estudio para estimar si un proyecto de estas dimensiones es económicamente viable a primera instancia, bajo un punto de vista conservador. Sin embargo, el análisis económico total escapa de este proyecto, ya que debe incluir un diseño completo de la planta a construir, incluyendo el análisis de posibles mejoras para aumentar la eficiencia en el ciclo completo, obteniendo mayores eficiencias en el ciclo eléctrico total.

CAPÍTULO 8: Conclusiones

8.1 Conclusiones

La cantidad de RSM generados en la región del Biobío y su composición poseen un potencial energético que permite, mediante un ciclo de gasificación conservador, un aporte del 11,74% del consumo eléctrico de los habitantes de la región. Por lo tanto, la gasificación es un método que además de mermar las diversas problemáticas asociadas a la generación y disposición de los residuos en la región del Biobío, puede sustituir la utilización de combustibles fósiles al aprovechar el potencial energético asociado a la combustión del gas de síntesis generado.

Durante la etapa experimental se observó que sin el pretratamiento de residuos no es posible gasificar RSU, lo que hace que esta etapa previa a la gasificación sea obligatoria.

Fue necesario realizar 8 ensayos, donde en cada uno de ellos se fue adaptando la carga para lograr obtener una gasificación exitosa de RSU. De estos, los 4 ensayos finales emulan la composición de los RSM de la región que, al ser gasificados, demuestran que es posible la gasificación de los RSM de la región.

Los resultados obtenidos son acordes a lo esperado en la literatura, con un PCI promedio de 4,25 (MJ/Nm³). En cuanto a las composiciones, al aumentar las temperaturas aumentó el PCI obtenido, favoreciendo la formación de CO y H₂, a temperaturas menores la concentración de estos disminuyó, aumentando el metano y el porcentaje de CO₂ en el gas de síntesis. En base a esto, las condiciones de temperatura más favorables para la gasificación de los RSM se logran al estabilizar las temperaturas sobre 700°C al interior del reactor.

Finalmente, los cálculos numéricos demuestran que una central de generación eléctrica mediante la gasificación de los RSM de la región es económicamente viable para diversas capacidades de tratamiento diaria. El parámetro más importante es la eficiencia del gas frío, más allá de las toneladas de residuos tratadas, es primordial encontrar las condiciones que garanticen una eficiencia del gas frío sobre el 50%. Esto aumenta considerablemente la generación de energía eléctrica y permite seguridad económica desde el punto de vista del inversionista, aumentando aproximadamente en un 50% el VAN (considerado para 300ton/d y 50% de CGE) por cada 10% de incremento en la CGE.

Se concluye que es posible gasificar RSU en el gasificador Updraft modificado mediante un tratamiento previo de los residuos. El análisis de los resultados es alentador, ya que el PCI del gas de síntesis se encuentra dentro del rango esperado. Se concluye además que el proceso de gasificación no se completó en el periodo estudiado, las elevadas concentraciones de CO₂ apuntan a la formación de reacciones de oxidación al interior del reactor y el incremento en el PCI del gas de síntesis producto de la gasificación de la capa inferior de combustible señala la presencia de una mezcla de residuos y pellet. Sumado a eso, la baja razón de equivalencia calculada da indicios de un proceso que no ha sido completado, de lo cual se concluye que queda carbono por ser gasificado, este acumula como char y se mezcla con el pellet.

8.2 Perspectivas

Se estima que es necesario extender el periodo de tiempo de gasificación de los RSU, aumentando el volumen total de aire para así lograr incrementar la razón de equivalencia, lo que favorecerá la reacción de Boudouard y el reformado en seco, incrementando el PCI y disminuyendo las concentraciones de CO₂ en el gas de síntesis. Por su parte, esto disminuirá el factor de emisión calculado inicialmente. De la misma forma, si se analiza una mejora en el rendimiento del ciclo eléctrico, como puede ser la implementación de un ciclo combinado, colaborará en la disminución del factor de emisiones de CO₂ y permitirá acercarse a los valores promedios del SEN.

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

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea, Dirección General de Medio Ambiente. Liderar el camino hacia una economía circular mundial : situación actual y perspectivas. Oficina de Publicaciones; 2020: p.4-25. Disponible en: <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/31079d7e-3a96-11eb-b27b-01aa75ed71a1>
- [2] Ministerio de Medio Ambiente. Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente (REMA). 2021.
- [3] Ministerio de Medio Ambiente. Informe del Estado del Medio Ambiente (IEMA). 2020.
- [4] D. Cuevas. Gasificación de biomasa y RSU en un reactor de gasificación Updraft modificado. Universidad de Concepción; 2021.
- [5] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Ley 20920. 2016.
- [6] P. Carrasco. Rellenos Sanitarios: La crisis que puede ser la oportunidad para el reciclaje. Diario Concepción; 04 de Julio de 2022 [revisado 20 de Julio 2022]. Disponible en: <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2022/07/04/rellenos-sanitarios-la-crisis-que-puede-ser-la-oportunidad-para-el-reciclaje.html>
- [7] F. Díaz. El silencioso auge de Hidronor: como es vivir junto al principal relleno sanitario de Concepción. BBCL; 09 de Julio de 2021 [Revisado 20 de Julio 2022]. Disponible en: <https://www.biobiochile.cl/especial/reportajes/2021/07/09/el-silencioso-auge-de-hidronor-como-es-vivir-junto-al-principal-relleno-sanitario-de-concepcion.shtml#etapav>
- [8] Ministerio de Energía. Registro de Plantas de Biogás. 2020. Disponible en: https://autoconsumo.minenergia.cl/wp-content/uploads/2017/08/Registro-Plantas-Bioga%CC%81s-web_MARZO-2020.pdf
- [9] J. Ochoa. Rellenos Sanitario Cemarc busca extender su vida útil por 20 años más. Diario Concepción, 06 de Agosto de 2021 [Revisado 20 de Julio 2022]. Disponible en: <https://www.diarioconcepcion.cl/economia/2021/08/06/relleno-sanitario-cemarc-busca-extender-su-vida-util-por-20-anos-mas.html>
- [10] U. Arena. *Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review.* Waste Management; 2011.
- [11] E. Lopez, N. Queiroz, C. Itsuo Yamamoto, P. da Costa. *Evaluating the emissions from the gasification processing of municipal solid waste followed by combustión.* Waste Management; 2017.
- [12] Energía Abierta, Balance de Energía 2020. [revisado 24 de Julio 2022]. Disponible en: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- [13] P. Lv, Y. Bai, J. Wang, X. Song, W. Su, G. Yu, Y. Ma. *Investigation into the interaction of biomass waste with industrial solid waste during co-pyrolysis and the synergetic effect of its char gasification.* Biomass and Bioenergy; 2022.
- [14] C. S. Psomopoulos, A. Bourka, N.J. Themelis. *Waste to Energy: A review of the status and benefits in the USA.* Waste Management; 2009.
- [15] CEUPE Magazine. Que es la Gasificación. [revisado 14 Julio 2022]. Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-gasificacion.html>

- [16] R. Gonzalez. Simulación del proceso de gasificación de biomasa. Universidad EAFIT; 2016.
- [17] M. Ardila. Modelo Cinético para el proceso de Gasificación de Briquetas de Carbón con Biomasa en reactor de Lecho Fijo. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; 2019.
- [18] M. Campoy. Gasificación de Biomasa y Residuos en Lecho Fluidizado: Estudios en Planta Piloto. Universidad de Sevilla; 2009.
- [19] BioEnergy Producers Association. *Evaluation of Emissions from Thermal Conversion Technologies Processing Municipal Solid Waste and Biomass*. Universidad de California; 2009.
- [20] E. J. Lopez, L. A. Okamura, C. I. Yamamoto. *Formation of dioxins and furans during municipal solid waste gasification*. Brazilian Journal of Chemical Engineering; 2015.
- [21] S. Heberlein, W. P. Chang, A. Veksha, A. Giannis, L. Hupa, G. Lisak. *High temperature slagging gasification of municipal solid waste with biomass charcoal as a greener auxiliary fuel*. Journal of Hazardous Materials; 2022.
- [22] SUBDERE, Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables. Programa nacional de residuos, Santiago 2018.
- [23] N Guerra. Generación eléctrica mediante gasificación por plasma de residuos sólidos municipales. Universidad de Chile; 2016.
- [24] CONAMA, Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. 2010.
- [25] CONAMA, Informe Final Estudio Caracterización de los residuos sólidos domiciliarios en la región Metropolitana. 2006.
- [26] Pellet ECOMAS. [revisado 28 de Julio 2022]. Disponible en: <https://ecomas.cl/pellet/53-pellet-15-kg.html>
- [27] J. Cabrera. Cuantificación del Poder Calorífico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera y materia orgánica de la parroquia Limoncocha. Año 2015-2016. Universidad Internacional SEK; 2016
- [28] Tablas de Poder Calorífico. [revisado 27 de Septiembre 2022]. Disponible en: https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html
- [29] D. Juela, D. Tacuri, A. Jumbo. Gasificación térmica de residuos plásticos de polietileno de baja densidad LDEP con vapor de agua para la producción de gas de síntesis. 2018.
- [30] E. Gallego. Estudio de la evolución del contenido energético de un polipropileno tras sucesivos ciclos de reciclado mecánico. Universidad Politécnica de Valencia; 2018.
- [31] AAPE. Comportamiento al fuego del poliestireno expandido. [revisado 28 de Septiembre 2022]. Disponible en: <http://www.manica.com.ve/wp-content/uploads/2016/10/Comportamiento-Poliestireno-Ante-el-Fuego-Asociacion-Argentina-Poliestireno-Expandido-AAPE.pdf>
- [32] F. Luz, M. Rocha, E. Silva, O. Venturini, R. Vieira, M. Montagna, O. Almazán. *Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil*. Energy Conversion and Management; 2015.
- [33] Energía Región. Región del Biobío. [revisado 30 de Septiembre 2022]. Disponible en: <https://energiaregion.cl/region/BBIO>.

- [34] Energía Abierta. Factores de emisión. [Revisado 10 de Febrero 2023]. Disponible en: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>
- [35] F. Codignole, M. Rocha, E.Silva, O. Venturini, R. Vieira, M. Monatagna, V. Leme, O. Almazán. *Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil*. Energy Conversion and Management; 2015.
- [36] CNE. Informe de costos de tecnologías de generación. Informe anual; 2022.
- [37] Ministerio de Energía. Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico Chileno. 2020.
- [38] JFE Engineering Corporation. [revisado 12 de Febrero 2023]. Disponible en: <https://www.jfe-eng.co.jp/en/products/environment/urb04.html>
- [39] Banco Central de Chile. [Revisado 12 de Febrero 2023]. Disponible en: <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/areas/estadisticas/tasas-de-interes>
- [40] CNE. Precio medio del mercado 2022. [revisado 12 de Febrero 2023]. Disponible en: [2022 - Comisión Nacional de Energía \(cne.cl\)](https://www.cne.cl/precio-medio-del-mercado-2022).

ANEXOS

A.1 Cálculo del Potencial energético

Los cálculos del potencial energético fueron desarrollados con el uso del software Engineering Equation Solver (EES), el código se adjunta a continuación:

"Cálculo del Potencial Energético"

RSM_anual=683888000 "[kg]" "RSM anuales en la region"

"Composición de residuos"

MO=0.53

Carton=0.13

PET=0.012896

PEAD=0.008487

PVC=0.002412

PEBD=0.037269

PP=0.008402

PS=0.012780

Otros=0.007686

Vidrio=0.066

Texil=0.02

Metal=0.02

Madera=0.036

Goma=0.036

Aceites=0.036

Construccion=0.036

Residuos=1-(PET+PEAD+Vidrio) "restando la parte de residuos que es reciclada"

comb_anual=RSM_anual*Residuos "Combustible total disponible al año"

"Cálculo de la nueva composición de Residuos"

MO2=0.53*RSM_anual/comb_anual

Carton2=0.13*RSM_anual/comb_anual

PVC2=0.002412*RSM_anual/comb_anual

PEBD2=0.037269*RSM_anual/comb_anual

PP2=0.008402*RSM_anual/comb_anual

PS2=0.012780*RSM_anual/comb_anual

Otros2=0.007686*RSM_anual/comb_anual

Textil2=0.02*RSM_anual/comb_anual

Metal2=0.02*RSM_anual/comb_anual

Madera2=0.036*RSM_anual/comb_anual

Goma2=0.036*RSM_anual/comb_anual

Aceites2=0.036*RSM_anual/comb_anual

Construccion2=0.036*RSM_anual/comb_anual

residuos2=MO2+Carton2+PVC2+PEBD2+PP2+PS2+Otros2+Textil2+Metal2+Madera2+Goma2+Aceites2+Construccion2

"PCI de los residuos [kJ/kg]"

PCI_MO=14615

PCI_Carton=15843

PCI_PVC=20920

PCI_PEBD=38036
 PCI_PP=43687
 PCI_PS=40000
 PCI_Otros=32777
 PCI_textiles=16556
 PCI_metal=0
 PCI_madera=17811
 PCI_goma=31170
 PCI_aceites=39748
 PCI_construccion=0

"PCI combustible [kJ/kg]"

$$PCI_{comb} = MO2 * PCI_{MO} + Carton2 * PCI_{Carton} + PVC2 * PCI_{PVC} + PEBD2 * PCI_{PEBD} + PP2 * PCI_{PP} + PS2 * PCI_{PS} + Otros2 * PCI_{Otros} + Textil2 * PCI_{textiles} + Metal2 * PCI_{metal} + Madera2 * PCI_{madera} + Goma2 * PCI_{goma} + Aceites2 * PCI_{aceites} + Construccion2 * PCI_{construccion}$$

"horas de funcionamiento"

f_funcionamiento=0.7

h_funcionamiento=365*24*f_funcionamiento

"flujo de combustible"

comb_dot=comb_anual/(h_funcionamiento*3600) "[kg/s]"

Los resultados se presentan en la Figura A.1.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

Aceites = 0.036 [-]	Aceites2 = 0.03945 [-]	aporte = 11.74 [-]	Carton = 0.13 [-]
Carton2 = 0.1424 [-]	CGE = 0.5	comb _{anual} = 6.24127815E8 [kg]	comb = 28.27 [kg/s]
Construccion = 0.036 [-]	Construccion2 = 0.03945 [-]	η _{elec} = 0.22	E _{anual} = 332864 [MWh]
f_funcionamiento = 0.7	Goma = 0.036 [-]	Goma2 = 0.03945 [1/kg]	h_funcionamiento = 6132
Madera = 0.036 [-]	Madera2 = 0.03945 [1/kg]	Metal = 0.02	Metal2 = 0.02191 [-]
MO = 0.53 [-]	MO2 = 0.5807 [-]	Otros = 0.007686 [-]	Otros2 = 0.008422 [-]
PCI _{aceites} = 39748 [kJ/kg]	PCI _{carton} = 15843 [kJ/kg]	PCI _{comb} = 17454 [kJ/kg]	PCI _{construccion} = 0
PCI _{goma} = 31170 [kJ/kg]	PCI _{madera} = 17811 [kJ/kg]	PCI _{metal} = 0	PCI _{MO} = 14615 [kJ/kg]
PCI _{Otros} = 32777 [kJ/kg]	PCI _{PEBD} = 38036 [kJ/kg]	PCI _{pp} = 43687 [kJ/kg]	PCI _{PS} = 40000 [kJ/kg]
PCI _{pvc} = 20920 [kJ/kg]	PCI _{textiles} = 16556 [kJ/kg]	PEAD = 0.008487 [-]	PEBD = 0.03727 [-]
PEBD2 = 0.04084 [-]	PET = 0.0129 [-]	PP = 0.008402 [-]	PP2 = 0.009206 [-]
PS = 0.01278 [-]	PS2 = 0.014 [-]	PVC = 0.002412 [-]	PVC2 = 0.002643 [-]
P _{comb} = 493.5 [MW]	P _{electronica} = 54.28 [MW]	P _{syngas} = 246.7 [MW]	Residuos = 0.9126 [-]
residuos2 = 0.999925 [-]	RSM _{anual} = 6.839E+08 [kg]	Textil = 0.02 [-]	Textil2 = 0.02191 [-]
Vidrio = 0.066 [-]			

Figura A.1: Resultados del cálculo del potencial energético

A.2 Gráficas de los resultados

Para las gráficas de los perfiles de temperatura en el reactor durante los ensayos se utilizó el siguiente código en lenguaje de programación Matlab:

```

clc
clear all

data=xlsread('T°_Ensayo_N°6.xlsx'); %Seleccionar archivo de
datos%

%Definición de variables a graficar%
time=data(:,1);
termocupla1=data(:,2);
termocupla2=data(:,3);
termocupla3=data(:,4);
termocupla4=data(:,5);
termocupla5=data(:,6);
termocupla6=data(:,7);
termocupla7=data(:,8);
termocupla8=data(:,9);

%definicion de limites%
time1=time(1);
time2=length(time);

%Gráfica%
figure(1)
hold on
plot(time,termocupla1,'blue');
plot(time,termocupla2,'red');
plot(time,termocupla3,'green');
plot(time,termocupla4,'magenta');
plot(time,termocupla5,'black');
plot(time,termocupla6,'yellow');
plot(time,termocupla7);
plot(time,termocupla8,'cyan');
xlabel('Tiempo de medición [s]')
ylim([0 1000])
ylabel('Temperatura [°C]')
xlim([time1 time2])
legend('Termocupla 1','Termocupla 2','Termocupla
3','Termocupla 4','Termocupla 5','Termocupla 6','Termocupla
7','Termocupla 8','Location','southeast')

```

A.3 Flujo de masa de los ensayos finales

Los cálculos para el balance de masa fueron desarrollados con el uso del software Engineering Equation Solver (EES), el código con los datos correspondientes al Ensayo N°5 se adjunta a continuación:

"Balance de masa del Reactor"

"Datos Ensayo N°6"

m_comb=2.542 "masa de combustible RSU [kg]"
 d_aire=1.204 "densidad del aire [kg/m3]"
 Vol_dot_aire=14 "flujo promedio del aire [l/min]"
 t=18.33 "tiempo de medición [min]"

"Cálculo de flujos másicos"

Vol_aire=Vol_dot_aire*t
 m_aire=d_aire*(Vol_aire/1000) "masa de aire [kg]"
 m_ceniza=0.2257*m_comb "masa de ceniza [kg]"

"Balance Másico Reactor"

m_comb+m_aire=m_syngas+m_ceniza

"Calculo del PCI del combustible"

"Composición de los RSM totales"

MO=0.6540
 Carton=0.1604
 PEBD=0.0460
 PP=0.0104
 PS=0.0158
 Textil=0.0246
 Madera=0.0444
 Goma=0.0444

"PCI de los residuos [kJ/kg]"

PCI_MO=14615
 PCI_Carton=15843
 PCI_PEBD=38036
 PCI_PP=43687
 PCI_PS=40000
 PCI_textiles=16556
 PCI_madera=17811
 PCI_goma=31170

PCI_comb=MO*PCI_MO+Carton*PCI_Carton+PEBD*PCI_PEBD+PP*PCI_PP+PS*PCI_PS+Textil*PCI_textil
 es+Madera*PCI_madera+Goma*PCI_goma

Los resultados se presentan en la Figura A.2.

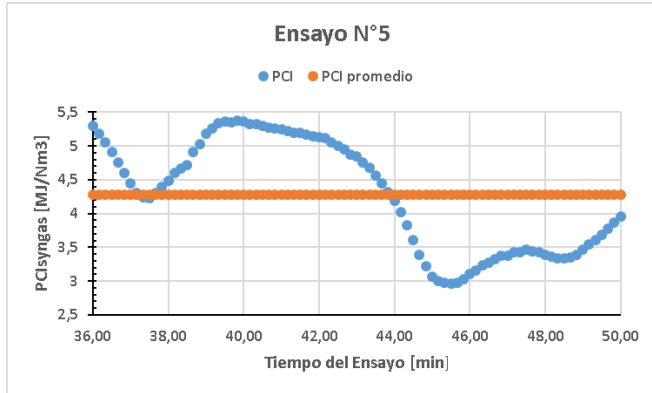
Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

Carton = 0.1604	$d_{\text{aire}} = 1.204$	Goma = 0.0444	Madera = 0.0444	MO = 0.654
$m_{\text{aire}} = 0.309$	$m_{\text{ceniza}} = 0.5737$	$m_{\text{comb}} = 2.542$	$m_{\text{syngas}} = 2.277$	$PCI_{\text{Carton}} = 15843$
$PCI_{\text{comb}} = 17517$	$PCI_{\text{goma}} = 31170$	$PCI_{\text{madera}} = 17811$	$PCI_{\text{MO}} = 14615$	$PCI_{\text{PEBD}} = 38036$
$PCI_{\text{pp}} = 43687$	$PCI_{\text{PS}} = 40000$	$PCI_{\text{textiles}} = 16556$	PEBD = 0.046	PP = 0.0104
PS = 0.0158	$t = 18.33$	Textil = 0.0246	$Vol_{\text{aire}} = 256.6$	$\dot{V}_{\text{aire}} = 14$

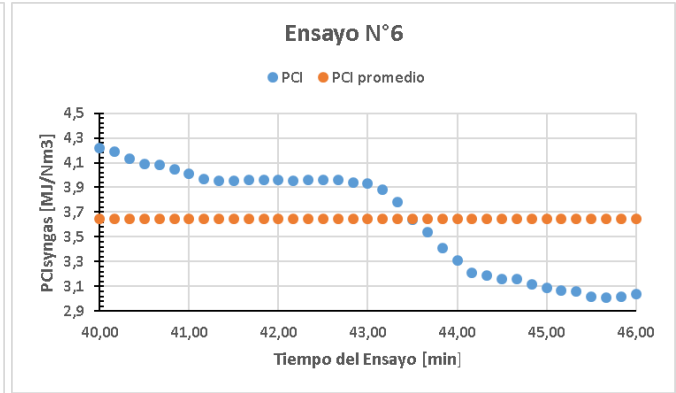
Figura A.2: Resultados del bance másico de Ensayo N°5.

A.4 Cálculo del PCI del gas de síntesis

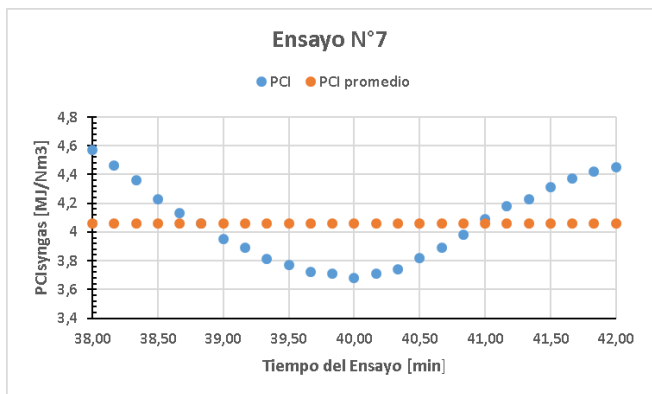
El cálculo del PCI fue desarrollado en las hojas de cálculo de Excel donde se tenían registrada las mediciones. La Figura A.3 y Figura A.4 muestra los periodos considerados para el cálculo.



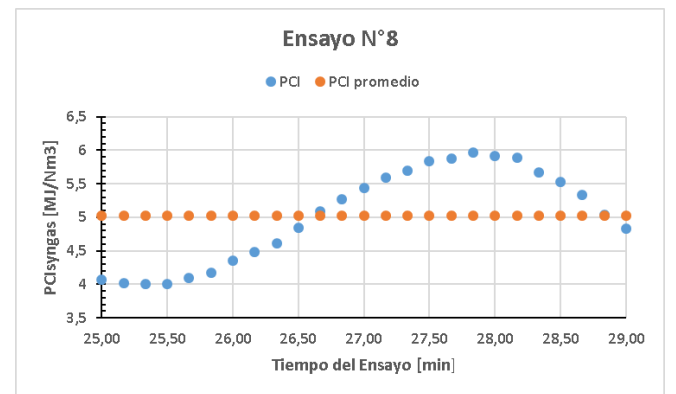
(a) Ensayo N°5



(b) Ensayo N°6

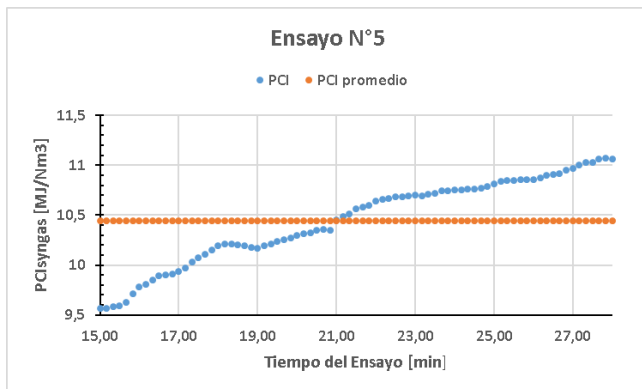


(c) Ensayo N°7

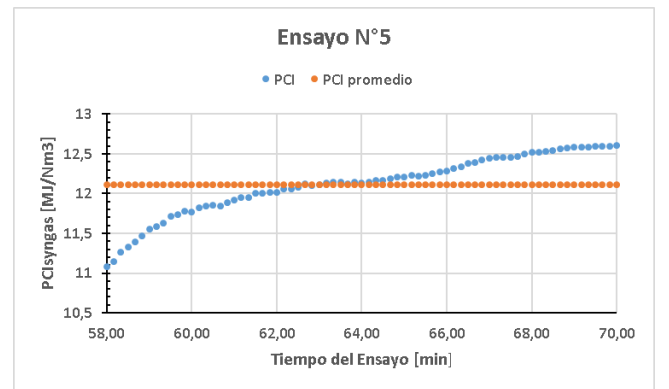


(d) Ensayo N°8

Figura A.3: Periodos de cálculo de PCI en periodo de gasificación de RSU.



(a) Periodo de gasificación capa superior.



(b) Periodo de gasificación capa inferior.

Figura A.4: Periodos de cálculo de PCI en periodo de gasificación de Pellet.

A.5 Procedimiento de cálculo para la razón de equivalencia

Para el cálculo de la razón de equivalencia es necesario determinar el oxígeno necesario para la combustión completa del combustible. Para ello se considera una muestra de 100 [kg] de combustible y se utiliza el análisis experimental de la Tabla 4.1 para determinar los kg de cada componente. Además, se considera las reacciones de oxidación para analizar los productos de la combustión de cada componente del combustible y así determinar los moles de oxígeno necesarios para que se concrete el proceso en su totalidad como se muestra a continuación en la Tabla A.1.

Tabla A.1: Cálculo de moles de oxígeno necesarios para la combustión estequiometrica del combustible

Componente	m[kg]	MM[kg/kmol]	kmol	Producto	kmolo
C	42,24	12,01	3,517	CO ₂	7,034
H	5,44	1,008	5,397	H ₂ O	2,699
N	0,97	14,005	0,0693	N ₂	0
S	0,21	32,06	0,00655	SO ₂	0,0131
O	28,57	16,00	1,786	-	-1,786

Luego, obtenidos los moles de oxígeno y considerando un 21% de oxígeno en la composición del aire se obtiene los resultados presentados en la Tabla A.2.

Tabla A.2: Cálculo de masa de aire necesaria para la combustión estequiométrica

Variable	Valor
Densidad del oxígeno [kg/Nm ³]	1,4298
Volumen molar del oxígeno [Nm ³ /kmol]	22,39
Densidad del aire [kg/Nm ³]	1,204
Volumen molar del aire [Nm ³ /kmol]	22,4
Moles estequiométricos de O [kmol/100 kg de combustible]	7,960
Moles estequiométricos de O ₂ [kmol/100 kg de combustible]	3,980
Masa de oxígeno [kg _{O2} /kg _{combustible}]	1,274
Moles estequiométricos de aire [kmol/100 kg de combustible]	19,02
Masa de Aire [kg _{aire} /kg _{combustible}] kg _{aire} /kg _{combustible}	5,111

Luego, la razón de equivalencia se calcula con usando la fórmula de la ecuación (10):

$$RE = \frac{m_{aire \text{ en gasificación}} [kg_{aire}]}{m_{combustible} [kg_{comb}] \cdot 5,111 [kg_{aire}/kg_{comb}]} \cdot 100\% \quad (10)$$

A.6 Combustión del gas de síntesis

Se define el factor de emisión como las toneladas de CO₂ emitidas por MWh eléctrico generado.

Los cálculos para el factor de emisión de CO₂ fue desarrollados con el uso del software Engineering Equation Solver (EES), el código para el cálculo del factor de emisiones se presenta a continuación:

"Combustión del gas de Síntesis"

T=0 "[°C]"
 P=101.325 "[Pa]"
 PCI_syngas=4.27 "[MJ/Nm3]"
 vol_dot_syngas=100 "[mol/s]"
 eta_elec=0.22 "eficiencia electrica ciclo rankine"

"Composición Volumétrica del gas de síntesis para 100 moles de combustible"

n_CH4=1.23
 n_CO=7.53
 n_CO2=22.9
 n_H2=1.48
 n_C2H6=1.9

"Combustión Estequiométrica"

"C:" n_CH4+n_CO+n_CO2+2*n_C2H6=a_est
 "O:" n_CO+2*n_CO2+2*A_estequimetrico=2*a_est+b_est
 "H:" 4*n_CH4+2*n_H2+6*n_C2H6=2*b_est
 "N:" 2*79/21*A_estequimetrico=2*c_est

"Combustión con exceso de aire"

e=0.3
 "C:" n_CH4+n_CO+n_CO2+2*n_C2H6=a
 "O:" n_CO+2*n_CO2+2*(A_estequimetrico+e)=2*a+b+d*2
 "H:" 4*n_CH4+2*n_H2+6*n_C2H6=2*b
 "N:" 2*79/21*(A_estequimetrico+e)=2*c

"kilogramos de CO2"

V_dot_CO2=a*22.4/1000 "volumen [m3/s]"
 rho_CO2=Density(CarbonDioxide,T=T,P=P) "densidad [kg/m3]"
 m_dot_CO2=V_dot_CO2*rho_CO2 "masa [kg/s]"

"Calculo del Factor de Emisión"

V_syngas=vol_dot_syngas*22.4/1000 "volumen de gas en [m3/s]"
 P_elec=V_syngas*PCI_syngas "Energia electrica generada [MW]"
 F_emision=(m_dot_CO2*3600/1000)/P_elec "[ton_CO2/MWh]"

Los resultados se presentan en la Figura A.5.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$a = 35.46$	$a_{est} = 35.46$	$A_{estequimetrico} = 13.62$	$b = 9.64$
$b_{est} = 9.64$	$c = 52.35$	$c_{est} = 51.22$	$d = 0.3$
$e = 0.3$	$\eta_{elec} = 0.22$	$F_{emision} = 0.591$	$\dot{m}_{CO_2} = 1.57$
$n_{C_2H_6} = 1.9$	$n_{CH_4} = 1.23$	$n_{CO} = 7.53$	$n_{CO_2} = 22.9$
$n_{H_2} = 1.48$	$P = 101.3$	$PCI_{syngas} = 4.27$	$P_{elec} = 9.565$
$p_{CO_2} = 1.977$	$T = 0$	$\dot{vol}_{syngas} = 100$	$\dot{V}_{CO_2} = 0.7943$
$V_{syngas} = 2.24$			

Figura A.5: Resultados del cálculo del Factor de Emisión.

A.7 Cálculos de análisis económico

Los cálculos para el costo de inversión fueron desarrollados con el uso del software Engineering Equation Solver (EES), el código se presenta a continuación:

"Flujo de Combustible"

```

CGE=0.75
PCI_comb=17454    "[kJ/kg]"
P_termica1=500    "[kW]"
P_termica2=1000   "[kW]"

P_termica1=m_dot_comb1*PCI_comb*CGE
P_termica2=m_dot_comb2*PCI_comb*CGE

Flujo_1=m_dot_comb1*(3600*24/1000) "[ton/d]"
Flujo_2=m_dot_comb2*(3600*24/1000) "[ton/d]"

```

Los resultados se presentan en la Figura A.6.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

CGE = 0.75	Flujo ₁ = 3.3	Flujo ₂ = 6.6	$\dot{m}_{comb1} = 0.0382$
$\dot{m}_{comb2} = 0.07639$	PCI _{comb} = 17454	P _{termica1} = 500	P _{termica2} = 1000

Figura A.6: Resultados de cálculos para costos de inversión.

Los resultados fueron graficados en una hoja de Excel, en la cual se interpoló una curva, presentados en la Figura 7.1.

A.8 Flujos de Caja de los casos de estudio

A continuación, se presentan los resultados extraídos de la hoja de Excel en la que se calculan los flujos de caja.

- **Flujo de caja opción (a)**

Datos de la central		Potencia	
Capacidad [toneladas RSM por día]	300	PCI [MJ/kg]	17,454
Eficiencia del gas frío (CGE)	0,5	Potencia Termica [MW]	60,60
Eficiencia del ciclo Rankine	0,22	Potencia gas de Síntesis [MW]	30,30
Inversión Ciclo gasificación [USD]	\$ 7.303.711	Potencia Eléctrica [MW]	6,67
Inversión Ciclo Rankine [USD]	\$ 4.499.859		
Inversión Total [USD]	\$ 11.803.570		
Costos de Operación y Mantenimiento		Porcentaje 50%	
Costo Mantenimiento Ciclo Gasificación	\$ 983.420	Préstamo [USD]	\$5.901.785
Costos Variables no combustibles	\$ 143.076	Periodos [año]	5
Costo Operación y Mantenimiento Ciclo Eléctrico	\$ 112.496	interes [mensual]	15,73%
Costos Fijos Totales	\$ 1.095.916	Cuota Anual [USD]	\$1.791.121
Venta de Energía			
Precio Medio del Mercado 2021 [CLP/kWh]	\$ 96,041		
Precio Medio del Mercado 2021 [USD/kWh]	\$ 0,121		
Energía Eléctrica generada anual [kWh]	40878723		
Ingresos anuales por venta [USD]	\$ 4.961.812		

- Cuotas del Préstamo

Cuotas iguales				
Año	Cuota (Pago)	Interés del Préstamo	Amortización de la deuda	Saldo Final
0				\$5.901.785
1	\$1.791.121,11	\$928.350,81	\$862.770,30	\$5.039.014,89
2	\$1.791.121,11	\$792.637,04	\$998.484,07	\$4.040.530,82
3	\$1.791.121,11	\$635.575,50	\$1.155.545,61	\$2.884.985,20
4	\$1.791.121,11	\$453.808,17	\$1.337.312,94	\$1.547.672,26
5	\$1.791.121,11	\$243.448,85	\$1.547.672,26	\$0,00

- Periodo 13-20

13	14	15	16	17	18	19	20
\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812
\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916
\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896
\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717
\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444
\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273

- Cálculo de Payback

Último periodo acumulado nega	5
último flujo acumulado negativo	\$2.076.492
Flujo siguiente	\$2.391.273
PAYBACK	5,87

- Periodo 13-20

13	14	15	16	17	18	19	20
\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812	\$ 4.961.812
\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916	\$ -1.095.916
\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896	\$ 3.865.896
\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179	\$ -590.179
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717	\$ 3.275.717
\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444	\$-884.444
\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273
\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273	\$2.391.273

- Cálculo de Payback

Último periodo acumulado negativo	4
último flujo acumulado negativo	\$2.238.477
Flujo siguiente	\$2.391.273
PAYBACK	4,94

A.9 Cálculos del Análisis de Sensibilidad

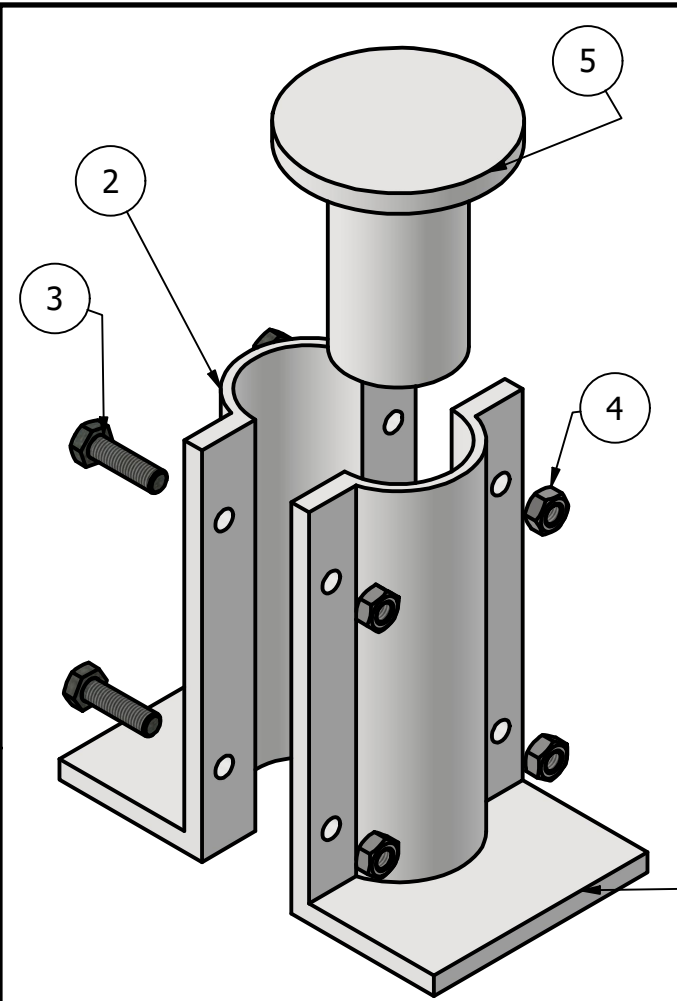
A continuación, se presentan los resultados tabulados en una hoja de Excel al momento de realizar el análisis de sensibilidad.

- Análisis de sensibilidad con respecto a las toneladas por día

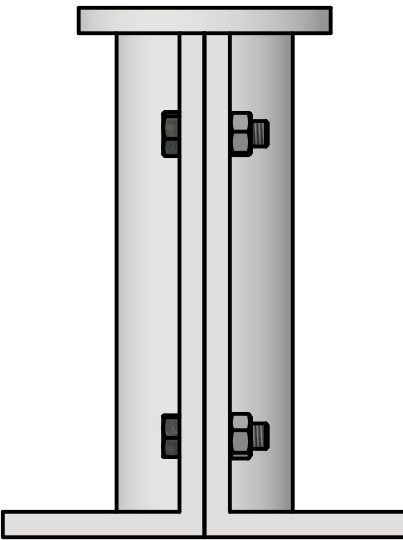
ton/día	VAN	VAN/VAN(300ton/d)	TIR	PAYBACK
150	\$ 1.085.823	13,04%	13,24%	8,41
200	\$ 3.498.843	42,03%	17,81%	6,92
250	\$ 5.911.864	71,01%	20,59%	6,25
300	\$ 8.324.885	100,00%	22,46%	5,87
350	\$ 10.737.905	128,99%	13,81%	5,62
400	\$ 13.150.926	157,97%	24,84%	5,45
450	\$ 15.563.947	186,96%	25,64%	5,33
500	\$ 17.976.968	215,94%	26,28%	5,23
550	\$ 20.389.988	244,93%	26,81%	5,16
600	\$ 22.803.004	273,91%	27,25%	5,09

- Análisis de sensibilidad con respecto a la CGE para el caso (a)

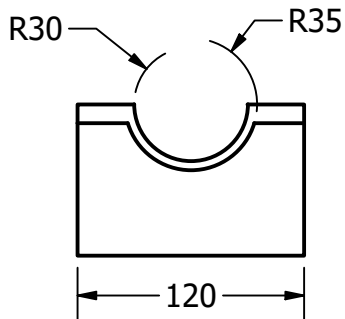
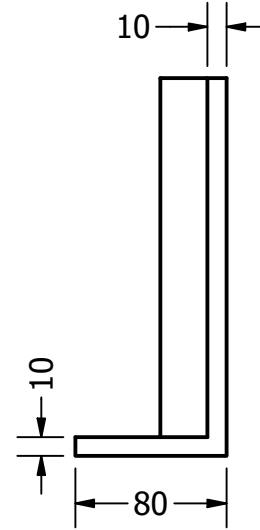
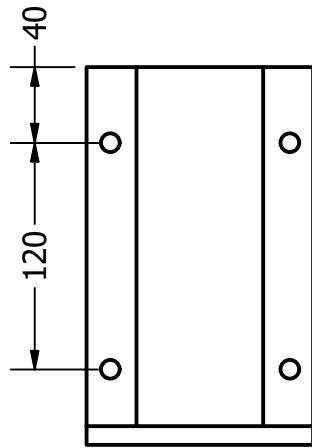
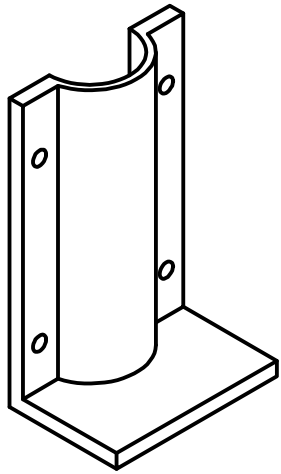
CGE	VAN	%VAN	TIR	PAYBACK
30%	\$ -1.536.011	-18,45%	7,59	-
40%	\$ 3.494.437	41,98%	15,64%	7,55
50%	\$ 8.324.885	100,00%	22,46%	5,87
60%	\$ 13.155.333	158,02%	28,53%	4,81
70%	\$ 17.985.780	216,05%	34,01%	3,57
80%	\$ 22.816.228	274,07%	38,97%	2,93



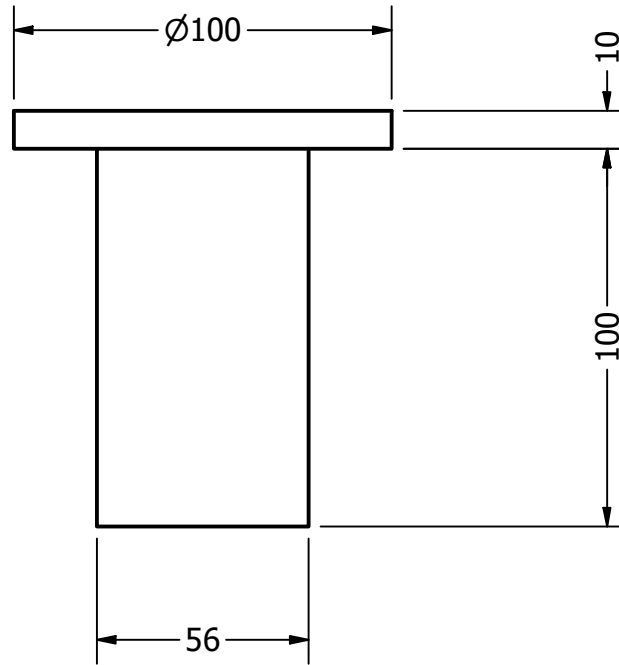
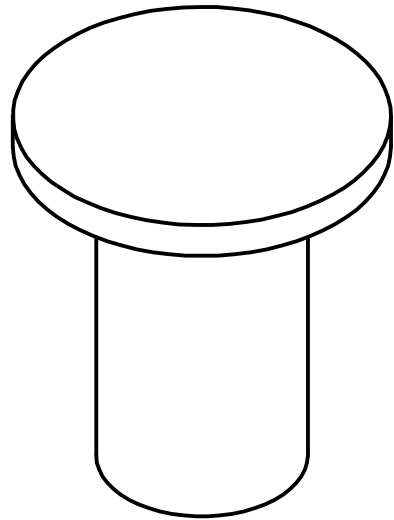
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Molde 1	
2	1	Molde 2	
3	4	DIN EN ISO 4018 - M10x35	Hexagon head screws. Product grade C
4	4	ISO 4032 - M10	Hexagon nuts, style 1 - Product grades A and B
5	1	Compresor	



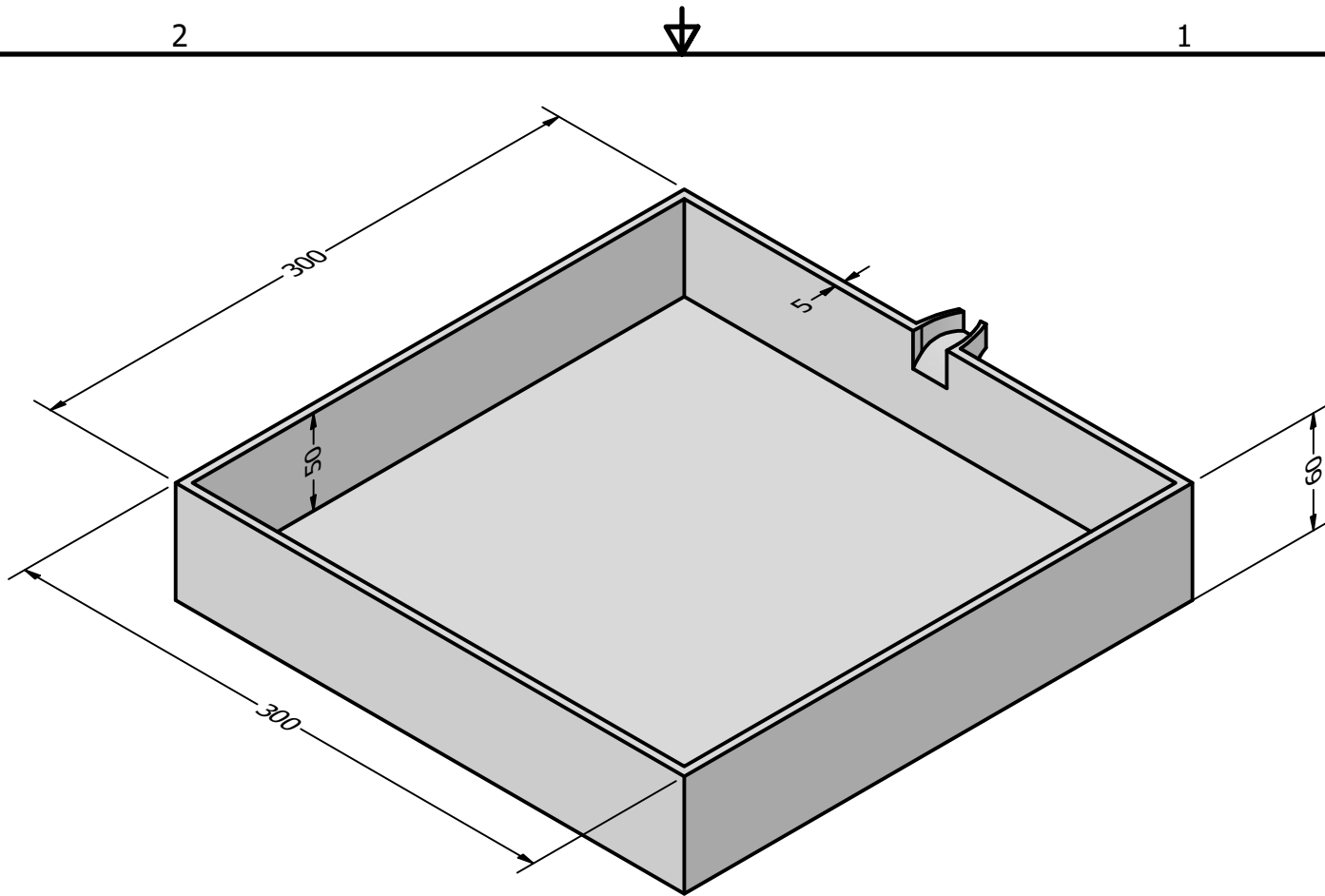
DRAWN	Sebastián Yáñez	05-09-2022	Universidad de Concepción	
CHECKED			Departamento de Ingeniería Mecánica	
QA			TITLE	
MFG			MOLDE PARA PROBETAS DE RESIDUOS	
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			A	Ensamble_Molde
			SCALE	REV
			1 / 3	
			SHEET 1 OF 1	



DRAWN	Sebastián Yáñez	05-09-2022	Universidad de Concepción Departamento de Ingeniería Mecánica					
CHECKED			TITLE					
QA			MOLDE PARA PROBETAS DE RESIDUOS					
MFG								
APPROVED								
ITEM	1, 2		SIZE	A	DWG NO	2	REV	
			SCALE	1 / 4			SHEET 2 OF 3	



DRAWN	Sebastián Yáñez	05-09-2022	Universidad de Concepción Departamento de Ingeniería Mecánica		
CHECKED			TITLE		
QA			MOLDE PARA PROBETAS DE RESIDUOS		
MFG					
APPROVED					
ITEM	COMPRESOR		SIZE		DWG NO
			A		3
			SCALE	1 / 2	SHEET 3 OF 3



DRAWN		05-09-2022		Universidad de Concepción	
Sebastián Yáñez				Departamento de Ingeniería Mecánica	
CHECKED				TITLE	
QA				COLECTOR DE ACEITE	
MFG				SIZE	
APPROVED				A	
				DWG NO	
				Colector_aceite	
				REV	
				SCALE	
				1 : 3	
				SHEET 1 OF 1	