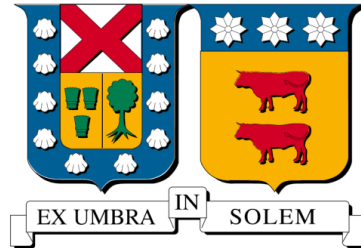


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



“INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE UN REACTOR ROTATORIO INCLINADO CON RECIRCULACIÓN DE CALOR”

NICOLÁS ALEJANDRO CARDONA ALFONSO

TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE:
MAGISTER EN CIENCIAS DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: DOCTOR MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: DOCTOR ANDRES ARRIAGADA

JULIO - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título; ☒ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE UN REACTOR ROTATORIO INCLINADO CON RECIRCULACIÓN DE CALOR

Nombre del candidato(a): Nicolás Cardona

Carrera / Grado: Magister en ciencias de la Ingeniería Mecánica

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Mario Toledo T.
Yo, , en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 23-10-2026 **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31/08/2026 **Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primera instancia debo agradecer a Dios por los retos y las oportunidades, también agradecer a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID/FONDECYT Proyecto N° 1241030, al Programa de Becas/BECAS INTERNAS USM y al Centro de Transición Energética Sostenible (SET) - Proyecto CTI250019 por su apoyo. A todos los familiares, amigos y compañeros cuyo apoyo y cariño hicieron posible llegar hasta aquí.

Un saludo especial a José, Fabio y Matt.

Gracias.

Resumen

Esta investigación experimental sobre la cogasificación de residuos sólidos municipales aborda, en el marco del proyecto FONDECYT 1241030, el potencial de la cogasificación de combustibles sólidos junto con gas natural (NG) para producir gas de síntesis (H_2 CO) a partir de polietileno de alta densidad (HDPE), papel blanco (WP), textil de algodón (CT) y Pinus radiata (PR).

En un reactor de medio poroso rotatorio, inclinado a 45° y operado a 25 RPM, se utiliza NG como fuente de energía a un régimen de 0.7 phi y una velocidad de filtración de 30.36 cm/s de la mezcla aire-NG. El cuerpo principal del reactor consiste en un tubo de acero de 720 mm de largo, con un diámetro nominal de 4". Soportado mediante dos bridas soldadas radialmente al cuerpo. Se aísla el cuerpo de acero del entorno con fibra de vidrio de 10 mm de espesor y el interior se encuentra cubierto de varias capas de material cerámico. El movimiento rotacional se transmite mediante una cadena y corona desde un motor eléctrico; los valores de temperaturas sensados por 7 termopares tipo S se adquieren inalámbricamente mediante el uso de un conjunto Raspberry Pi + 2 tarjetas accesorias adquisidoras de datos HAT.

El sustrato sólido, además de esferas de alúmina inertes, se conforma de: polietileno de alta densidad (HDPE), papel blanco (WP), textil de algodón (CT) y Pinus radiata (PR) con una relación volumétrica de 3:1 en la zona híbrida.

Los resultados mostraron que los mejores rendimientos de H_2 se obtuvieron con pino, con un valor de 3.06 %. Las temperaturas medias máximas son 875 K y 816 K para PR sin y con vapor, respectivamente, la eficiencia de conversión máxima fue encontrada en el caso de PR, y la mayor relación H_2 : CO se observó en el caso de PR con vapor, alcanzando 1.33.

El pino sin vapor alcanzó la temperatura máxima más alta con un valor de 930 K, su velocidad del frente de combustión fue la mediana con 0,0587 mm/s, alcanzó los mayores rendimientos tanto para H_2 como para CO, con valores de 3,06 % y 3,87 % respectivamente, y una relación H_2 : CO de 0,79 que ocupó el segundo lugar más bajo. El PR presentó la eficiencia de conversión más alta con un valor de 13.1 %.

La adición de vapor al PR se reflejó en una disminución de la temperatura máxima hasta un valor de 860 K, la menor velocidad del frente de llama entre todos los casos con un valor de 0,0424 mm/s, rendimientos de H_2 y CO disminuidos de 2,90 % y 2,18 % respectivamente, una

relación $H_2 : CO$ mayor de 1,33 y una eficiencia de conversión de 9.3 % que ocupó el tercer lugar entre los combustibles.

El algodón textil presentó la segunda temperatura máxima más alta con un valor de 890 K, la mayor velocidad del frente de llama con un valor de 0,0742 mm/s, tuvo el menor rendimiento de H_2 con 0,92 % y 1,77 % de CO, la menor razón $H_2:CO$ entre todos los combustibles con 0,52 y una eficiencia de conversión de 4.3 %, la segunda más baja.

El HDPE presenta la segunda temperatura máxima más baja con un valor de 820 K, la segunda velocidad del frente de llama más baja con un valor de 0,0516 mm/s, rendimiento intermedio en la composición del syngas con 1,77 % de H_2 y 2,03 % de CO, una razón $H_2:CO$ de 0,87 y la menor eficiencia de conversión con un valor de 2.8 %.

En el caso del papel la temperatura máxima fue de 665 K siendo la más baja de todos los combustibles, la segunda de velocidad del frente de llama más alta con un valor de 0,0619 mm/s, un rendimiento relativamente bajo con 1,10 % de H_2 , 1,06 % de CO, una razón $H_2:CO$ de 1,04 y la segunda eficiencia más baja con un valor de 4.3 %.

El PR presentó el mejor rendimiento en general, el algodón textil muestra una ventaja en términos de velocidad del frente de llama y la adición de vapor de agua aumenta la cantidad de hidrógeno generado sacrificando un poco de temperatura máxima. Las eficiencias de conversión más altas se relacionaron con temperaturas y velocidades de propagación más elevadas, confirmando que el desempeño del reactor depende de la interacción entre la transferencia de calor, la cinética de reacción y las características del combustible.

El trabajo futuro debe ampliar el rango de especies y parámetros de prueba, el setup y diseño experimental debe incluir mecanismos para monitorear la generación de alquitrán. También se debe integrar la modelación numérica para describir más detalladamente los procesos. Se debe identificar el estado de las tecnologías desplegadas actualmente para que los avances en las tecnologías de HFC puedan ser más fácilmente aplicados.

Palabras clave:

Abstract

This experimental research on the co-gasification of municipal solid waste, framed in the FON-DECYT 1241030 project, addresses the potential of co-gasification of solid fuels together with natural gas (NG) to produce synthesis gas (H_2 CO) from high-density polyethylene (HDPE), white paper (WP), cotton textile (CT), and *Pinus radiata* (PR).

In a rotating porous medium reactor, inclined 45° and operated at 25 RPM, NG is used as an energy source at a regime of 0.7 phi and an air-NG mixture filtration velocity of 30.36 cm/s. The main body of the reactor consists of a 720 mm long steel tube with a nominal diameter of 4". It is supported by two flanges radially welded to the body. The steel body is insulated from the environment with 10 mm thick glass fiber and the interior is covered with several layers of ceramic material. Rotational movement is transmitted through a chain and sprocket from an electric motor; temperature values sensed by 7 S-type thermocouples and are wirelessly acquired using a Raspberry PI assembly + 2 HAT data acquisition accessory cards.

The solid substrate, in addition to inert alumina spheres, consists of: high-density polyethylene (HDPE), white paper (WP), cotton textile (CT), and *Pinus radiata* (PR) with a volumetric ratio of 3:1 in the hybrid zone.

The results showed that the best H_2 yields were obtained with pine, with a value of 3.06 %. The average maximum temperatures are 875 K and 816 K for PR without and with steam, respectively; the maximum conversion efficiency was found in the PR case, and the highest H_2 :CO ratio was observed in the PR with steam case, reaching 1.33.

Pine without steam reached the highest maximum temperature with a value of 930 K, its combustion front velocity was the median at 0.0587 mm/s, it achieved the highest yields for both H_2 and CO, with values of 3.06 % and 3.87 % respectively, and an H_2 :CO ratio of 0.79 which ranked second lowest. PR presented the highest conversion efficiency with a value of 13.1 %.

The addition of steam to PR resulted in a decrease in maximum temperature to a value of 860 K, the lowest flame front velocity among all cases with a value of 0.0424 mm/s, decreased H_2 and CO yields of 2.90 % and 2.18 % respectively, a higher H_2 :CO ratio of 1.33, and a conversion efficiency of 9.3 % which ranked third among the fuels.

Cotton textile presented the second highest maximum temperature with a value of 890 K, the highest flame front velocity with a value of 0.0742 mm/s, had the lowest H₂ yield with 0.92 % and 1.77 % CO, the lowest H₂:CO ratio among all fuels with 0.52, and a conversion efficiency of 4.3 %, the second lowest.

HDPE presents the second lowest maximum temperature with a value of 820 K, the second lowest flame front velocity with a value of 0.0516 mm/s, intermediate performance in syngas composition with 1.77 % H₂ and 2.03 % CO, an H₂:CO ratio of 0.87, and the lowest conversion efficiency with a value of 2.8 %.

In the case of paper, the maximum temperature was 665 K, being the lowest of all fuels, the second highest flame front velocity with a value of 0.0619 mm/s, a relatively low yield with 1.10 % H₂, 1.06 % CO, an H₂:CO ratio of 1.04, and the second lowest efficiency with a value of 4.3 %.

PR presented the best overall performance, cotton textile shows an advantage in terms of flame front velocity, and the addition of steam increases the amount of hydrogen generated while sacrificing some maximum temperature. The highest conversion efficiencies were related to higher temperatures and propagation velocities, confirming that reactor performance depends on the interaction between heat transfer, reaction kinetics, and fuel characteristics.

Future work should expand the range of species and test parameters; the setup and experimental design should include mechanisms to monitor tar generation. Numerical modeling should also be integrated to describe the processes in more detail. The state of currently deployed technologies should be identified so that advances in HFC technologies can be more easily applied.

Keywords:

Índice General

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	IV
1. Introducción	1
1.1. Gestión de los residuos sólidos municipales	1
1.2. Objetivo general	5
1.3. Objetivos específicos	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Procesos de conversión termoquímica	6
2.1.1. Gasificación	8
2.1.2. Gasificación de combustibles sólidos	9
2.1.3. Gasificación de residuos sólidos municipales	11
2.2. Reactores de medios porosos	12
2.2.1. Combustión de medios porosos inertes	12
2.2.2. Combustión de medios porosos híbridos	13
2.2.3. Combustión de MSW en reactores de medios porosos híbridos	15
3. Metodología	16
3.1. Setup Experimental	16
3.1.1. Construcción del reactor	17
3.1.2. Instalación y puesta en marcha del reactor	19
3.2. Procedimiento experimental	20
3.3. Análisis de los datos	21
3.4. Características de los residuos sólidos municipales	22

3.4.1. Pino radiata	23
3.4.2. HDPE	23
3.4.3. Papel	24
3.4.4. Algodón textil	24
3.5. Configuración de la cama híbrida	25
4. Resultados y Análisis	27
4.1. Comportamiento térmico	27
4.2. Velocidad del frente de llama	30
4.3. Características del gas de síntesis	32
4.4. Conversión de Carbono e Hidrógeno	33
5. Conclusiones	35
Bibliografía	37

Índice de Figuras

1.1. Distribución de la disposición final de los residuos sólidos municipales	2
1.2. Distribución de la composición de los residuos sólidos municipales [1]	3
2.1. Formas de gestión de RSU [1]	6
2.2. Subprocesos de la gasificación	8
2.3. Tipos de gasificación [2]	9
2.4. Esquemático de la combustión en medios porosos	12
2.5. Esquemático de reactor inclinado rotatorio de medios porosos [3]	14
2.6. Reactor inclinado rotatorio aplicado en escala industrial [4]	15
3.1. Setup experimental	16
3.2. Closeup del reactor, aislamiento reemplazado.	18
3.3. Instalación del reactor	19
3.4. Piezas fabricadas	20
3.5. Isotermas para el cálculo de velocidad de propagación del frente de combustión.	21
3.6. Configuraciones de relación medio híbrido:combustible sólido estudiado en [5]	26
4.1. Perfil de temperatura de la cogasificación del pino sin vapor de agua vs t.	27
4.2. Perfil de temperatura de la cogasificación del pino sin vapor de agua vs z.	28
4.3. Distribución de temperaturas máximas por cada combustible	29
4.4. Composición del syngas	32
4.5. Eficiencia de conversión	33

Índice de Tablas

3.1. Principales reacciones de gasificación de biomasa.[6]	22
3.2. Contenido energético de los RSU	25
4.1. Promedio de la velocidad del frente de llama por combustible	30
4.2. Parámetros de cinéticas de reacción para diferentes componentes de RSU [7] . .	31

Capítulo 1

Introducción

1.1. Gestión de los residuos sólidos municipales

La gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos (RSU) es un desafío global. Se espera que la producción de RSU crezca de 3.13 miles de millones de toneladas $\cdot$ año⁻¹ a 4.54 miles de millones de toneladas $\cdot$ año⁻¹ para 2050. Solo el 11.03 % de los RSU se recicla, y una proporción mayoritaria del 41.85 % termina en vertederos no controlados o se quema a cielo abierto [8].

En áreas con alta densidad poblacional, la falta de espacio es una razón para desarrollar e implementar nuevas tecnologías de tratamiento de RSU. El vertido en rellenos sanitarios ha sido el método preferido, pero el aumento en la proporción de plásticos y otros residuos de alto contenido energético en la composición de los RSU ha impulsado la aplicación de soluciones de valorización energética de residuos (WtE, por sus siglas en inglés, waste to energy). Los procesos termoquímicos modernos y controlados producen menores emisiones de gases de efecto invernadero, menor contaminación y la oportunidad de aprovechar la energía de los RSU en beneficio de la comunidad. [9]

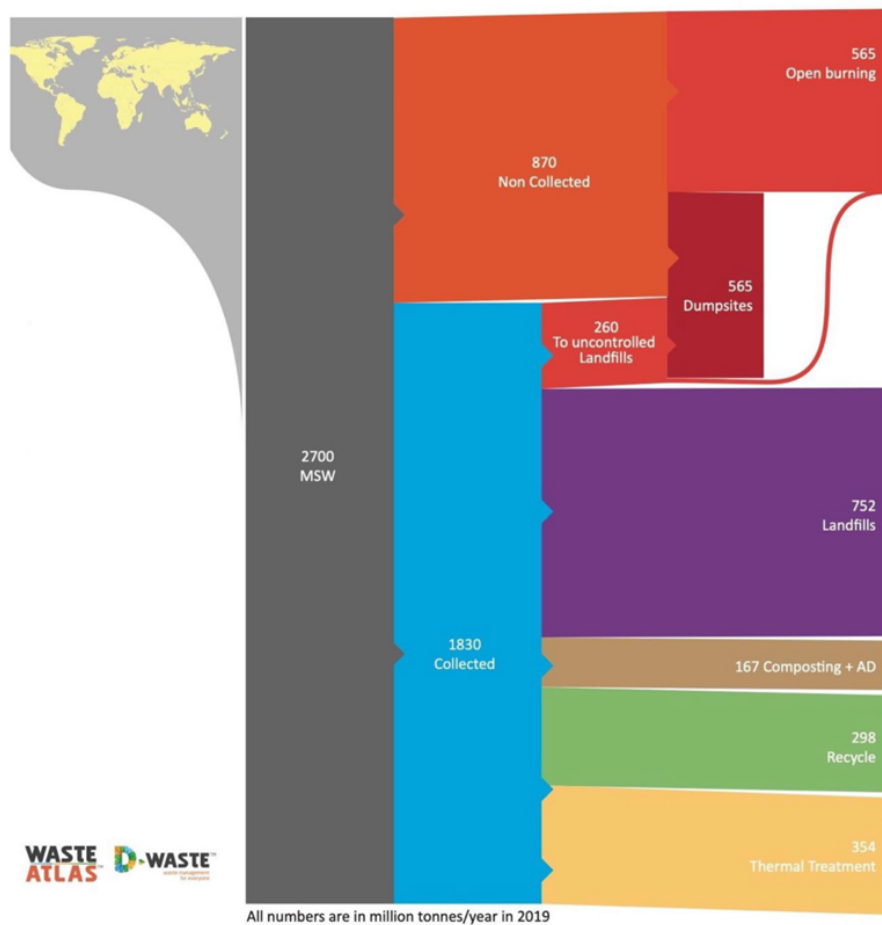


Figura 1.1: Distribución de la disposición final de los residuos sólidos municipales

La disposición final térmica corresponde al 13.11 % [8] de las disposiciones finales de los RSU. La incineración es una tecnología bien establecida que presenta inconvenientes identificados en la generación de cenizas y emisiones contaminantes considerables [10]. La combustión de RSU produce gases de efecto invernadero (GEI) y subproductos como alquitrán, gases ácidos y otros agentes recientemente identificados como peligrosos para la salud humana, lo que hace vital el tratamiento del gas producido, incrementando el costo final de la energía. Además, la baja eficiencia térmica en comparación con otras tecnologías tradicionales de generación eléctrica disminuye la viabilidad de las plantas WtE. Esto, sumado a la imagen pública desfavorable de estas plantas, resulta en un aumento de plantas de incineración que los gobiernos están cerrando. Sin embargo, el potencial de la WtE no debe ignorarse, y es necesario mejorar las tecnologías WtE para hacerlas competitivas como fuente de energía y aprovechar el poder contenido en los RSU. [11]

A nivel global, se generan anualmente más de 2 mil millones de toneladas de residuos sólidos

urbanos (RSU), cifra que se proyecta alcanzará aproximadamente 3,5 mil millones de toneladas para el año 2050. Como se observa en la Figura 1.2, la composición de estos residuos está dominada por los residuos de alimentos y residuos verdes, los cuales constituyen el 44 % del total global. Le siguen papel y cartón con un 17 %, plástico con un 12 %, vidrio con un 5 %, metal con un 4 %, caucho y cuero con un 2 %, madera con un 2 %, y otros materiales que representan el 14 % restante. Cabe destacar que los materiales con potencial para conversión termoquímica, tales como papel, cartón, plástico y madera, representan conjuntamente aproximadamente el 31 % de la composición global de RSU, evidenciando el potencial significativo de estos residuos como materia prima para procesos de valorización energética [1].

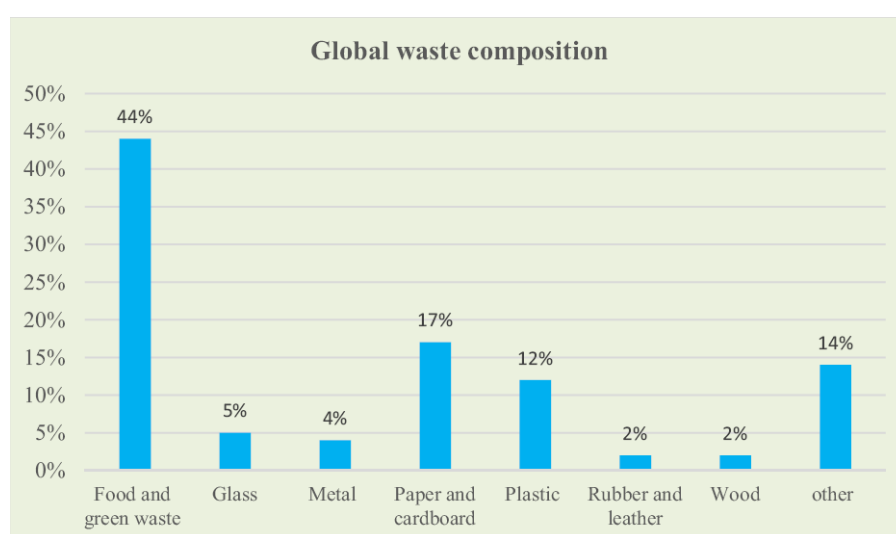


Figura 1.2: Distribución de la composición de los residuos sólidos municipales [1]

Los residuos de madera constituyen una fracción significativa de los residuos sólidos urbanos a nivel mundial. En Estados Unidos, según estimaciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), los residuos de madera representan aproximadamente el 6,3 % del total de RSU generados, correspondiente a 15,82 millones de toneladas anuales. Sin embargo, esta cifra aumenta considerablemente al incluir los residuos leñosos provenientes de podas y mantención de jardines, alcanzando 34,2 millones de toneladas según el Servicio Forestal de Estados Unidos, lo que equivale a cerca del 13,7 % del flujo total de RSU. De este volumen, solo el 35 % es recuperado para productos y un 16 % adicional es combustionado para recuperación energética, mientras que aproximadamente 11,1 millones de toneladas permanecen disponibles para su aprovechamiento. [12]

El presente trabajo se enmarca en la línea de investigación desarrollada por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María en el ámbito de la

gasificación de residuos sólidos urbanos. Un antecedente directo es el proyecto "Gas Bas", financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R) en 2019, el cual implementó un prototipo de gasificador modular de medio poroso híbrido para la reducción y valorización de residuos sólidos en la comuna de La Ligua. Dicho proyecto demostró el potencial de la tecnología de combustión en medios porosos para transformar residuos en gas de síntesis, con capacidad de reducir hasta un 95 % el volumen de basura. [13]

Considerando el contexto descrito anteriormente y en el marco del proyecto FONDECYT 1241030, se estudia la aplicación de un reactor de medios porosos, inclinado y rotativo, para cogasificar los residuos sólidos municipales, brindando una base para comparar el desempeño de distintos tipos de residuos en la generación de gas de síntesis rico en hidrógeno y calor aprovechable.

1.2. Objetivo general

Investigar experimentalmente la producción de gas de síntesis a partir de residuos sólidos municipales, tales como: HDPE, papel, algodón y pino; en un reactor rotatorio inclinado con recirculación de calor.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar la revisión del estado del arte.
- Implementar el reactor de medios porosos inclinado y rotatorio.
- Realizar pruebas con los diferentes combustibles, midiendo y registrando temperaturas, flujos y composición del gas obtenido.
- Analizar los resultados e identificar oportunidades y limitaciones de la aplicación del reactor y formular conclusiones y recomendaciones para la optimización del proceso.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Procesos de conversión termoquímica

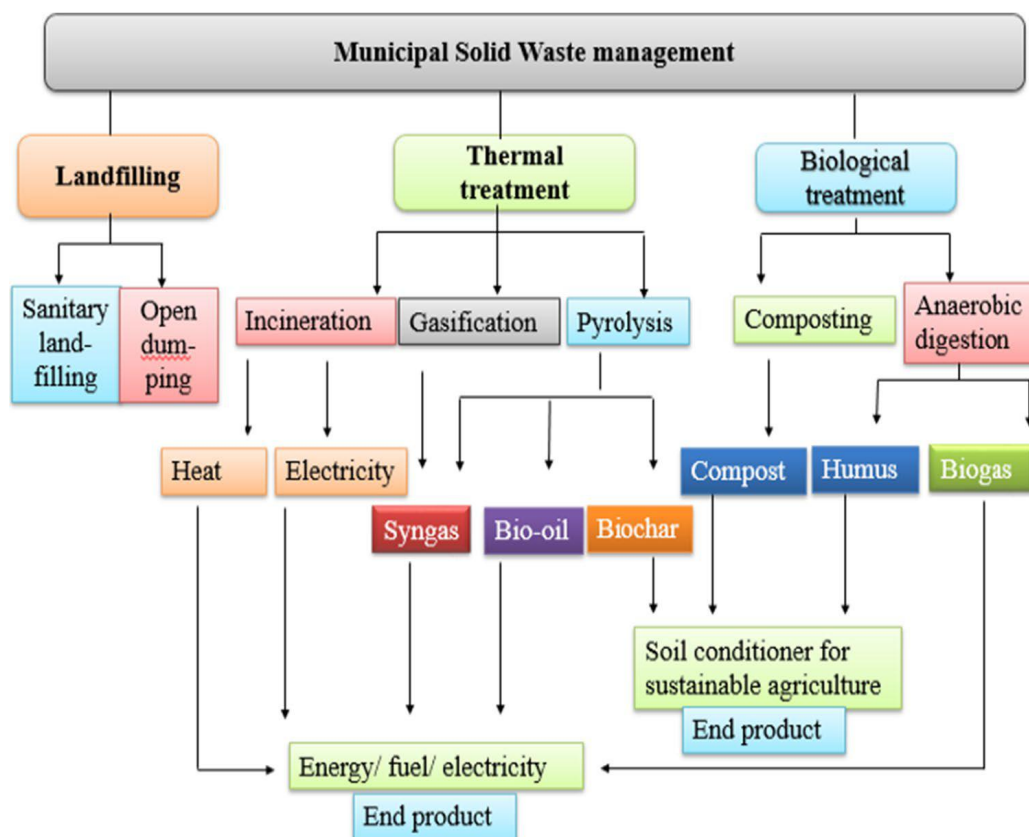


Figura 2.1: Formas de gestión de RSU [1]

La gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel global presenta diferencias significativas según el nivel de ingresos de cada país. A escala mundial, aproximadamente el 33 de los residuos se dispone mediante vertido abierto, el 37 se deposita en vertederos, el 19 se somete a recuperación de materiales mediante reciclaje y compostaje, y el 11 se trata mediante incineración. En países de bajos ingresos, cerca del 93 % de los residuos es quemado o vertido en espacios abiertos, carreteras o cuerpos de agua, mientras que solo el 3 % es reciclado. En contraste, en países de altos ingresos únicamente el 2 % de los residuos se vierte de manera abierta, el 39 % se deposita en rellenos sanitarios, el 29 % se recicla y el 22 % se incinera. Esta disparidad refleja las diferencias en infraestructura, recursos económicos y marcos regulatorios entre las distintas regiones del mundo.

La disposición de RSU en vertederos constituye el método más utilizado a nivel mundial debido a su bajo costo y mínimos requerimientos técnicos. Sin embargo, este enfoque presenta serias desventajas ambientales y de salud pública. Los vertederos generan lixiviados que contienen metales pesados como cadmio, cromo, mercurio, plomo y arsénico, además de compuestos orgánicos e inorgánicos y microorganismos patógenos que pueden contaminar las aguas subterráneas y el suelo. La infiltración de estos lixiviados en fuentes de agua potable se ha asociado con incrementos en el riesgo de cáncer, mortalidad infantil, problemas motores y cognitivos en niños, y diversas enfermedades gastrointestinales. Adicionalmente, la presencia de bacterias coliformes como *Escherichia coli* en aguas contaminadas por lixiviados representa un riesgo significativo, siendo la diarrea asociada a estas condiciones responsable de aproximadamente 1,5 millones de muertes infantiles anuales a nivel global.

Desde la perspectiva del cambio climático, los vertederos constituyen una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los RSU produce metano y dióxido de carbono, contribuyendo aproximadamente al 5 % de las emisiones globales de GEI. El metano es particularmente relevante debido a que su potencial de calentamiento global es 28 veces mayor que el del dióxido de carbono. Se estima que los vertederos son responsables de aproximadamente el 11 % del metano emitido a nivel mundial. Además, los vertederos generan compuestos orgánicos volátiles (COV) como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, los cuales contribuyen a la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico, afectando la calidad del aire y la salud de los trabajadores y comunidades cercanas. Los riesgos de incendio también son significativos, especialmente en países en desarrollo donde los vertederos frecuentemente carecen de ingeniería adecuada y se ubican cerca de zonas residenciales.

Frente a estas problemáticas, se han desarrollado tecnologías alternativas para el tratamiento

de RSU. La incineración permite reducir el peso y volumen de los residuos en un 70 % y 90 % respectivamente, generando simultáneamente electricidad y calor, con una producción típica de 544 kWh de energía por tonelada de RSU incinerada. La pirólisis, por su parte, descompone los residuos en ausencia de oxígeno a temperaturas entre 300 y 650°C, produciendo gas de síntesis, biocombustible líquido y biochar, este último con aplicaciones como enmienda de suelos o como precursor de carbón activado. El tratamiento por plasma térmico ofrece eficiencias de reducción de hasta 95 % del volumen de entrada y permite la conversión de RSU en productos valiosos para la economía circular. Sin embargo, estas tecnologías requieren inversiones significativas en infraestructura y operación, y pueden generar emisiones secundarias de óxidos de azufre, nitrógeno y material particulado si no se operan y controlan adecuadamente. La gasificación emerge como una alternativa prometedora dentro de este contexto, permitiendo la conversión termoquímica de RSU en gas de síntesis con potencial para generación de energía y producción de combustibles, con menores emisiones de contaminantes en comparación con la incineración convencional. [1]

2.1.1. Gasificación

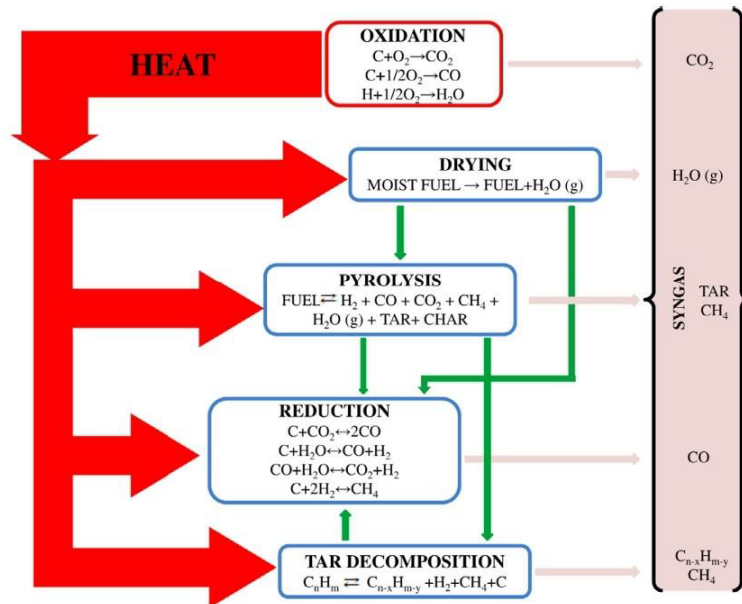


Figura 2.2: Subprocesos de la gasificación

La gasificación consiste en la transformación de un compuesto orgánico en estado sólido o líquido en presencia de un agente gasificante en una fase de gas/vapor y una fase sólida. La fase gaseosa resultante tiene un alto poder calorífico y puede ser utilizada en aplicaciones de

generación de potencia o calor; es usualmente conocida como gas de síntesis o syngas por su abreviatura en inglés. El syngas que se obtiene de este proceso consiste en una mezcla de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), también hidrocarburos ligeros como etano y propano, así como hidrocarburos pesados como los alquitranes. La presencia de otros gases indeseables, como nitrógeno, sulfuros y ácido clorhídrico, depende del agente gasificante y el tratamiento de la biomasa [14].

Este proceso puede clasificarse según la fuente de calor requerida para sostener las reacciones: en la gasificación autotérmica, el calor se genera mediante oxidación parcial dentro del mismo reactor, mientras que en la gasificación alotérmica, el calor es suministrado por una fuente externa, como resistencias eléctricas en instalaciones de laboratorio o intercambiadores de calor en plantas industriales. Durante el proceso de gasificación autotérmica ocurren simultáneamente cuatro etapas: secado, donde la humedad se libera en forma de vapor a temperaturas entre 100 y 200°C; pirólisis, donde la biomasa seca experimenta descomposición térmica en ausencia de oxígeno entre 150 y 700°C liberando volátiles y residuos sólidos; oxidación, donde se producen las reacciones exotérmicas que liberan el calor necesario para el proceso a temperaturas de 700 a 1000°C; y reducción, donde ocurren las reacciones más importantes como la reacción de Boudouard, la reacción agua-gas y la reformación con vapor, generando los principales productos del proceso. [2]

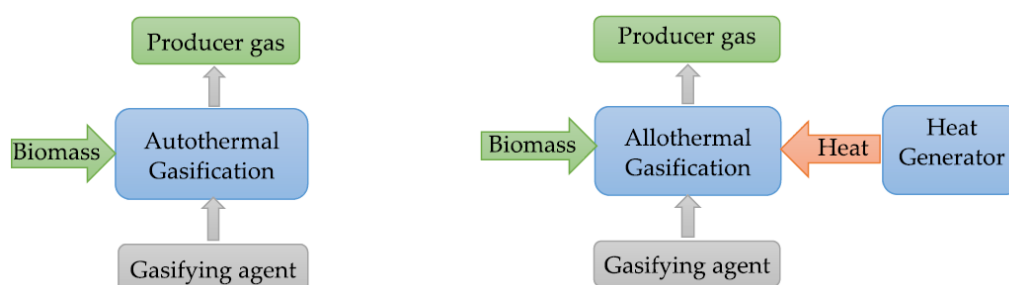


Figura 2.3: Tipos de gasificación [2]

2.1.2. Gasificación de combustibles sólidos

La gasificación almacena energía en los enlaces químicos de los productos formados a diferencia de la combustión que busca la energía liberada al romper estos enlaces, toma lugar en ambientes reductores, esto es con déficit de oxígeno, y añaden valor al combustible (biomasa) ya que aumenta el poder calorífico al eliminar componentes no combustibles de esta, mejora las emisiones al capturar los gases indeseables en vez de liberarlos a la atmósfera en el caso de la combustión. Adicionalmente, reduce la relación de carbono-hidrógeno (C/H) en el combustible,

lo cual disminuye la temperatura de evaporación y permite que el combustible sea gaseoso a condiciones estándar ambiente, que facilita su transporte y uso en aplicaciones que cuentan con infraestructura ampliamente desarrollada. Por último, la gasificación disminuye el contenido de oxígeno en el combustible, lo que aumenta su densidad energética [15].

Existe una gran diversidad de reactores de gasificación que se clasifican principalmente en tres categorías: reactores de lecho fijo, reactores de lecho fluidizado y reactores de flujo arrastrado. Los gasificadores de lecho fijo, también denominados de lecho móvil, son relativamente simples de instalar y operar, siendo adecuados para plantas de pequeña y mediana escala generalmente por debajo de 1 MW. Dentro de esta categoría se encuentran los gasificadores de corriente ascendente (updraft), donde el agente gasificante asciende mientras la biomasa desciende, produciendo un gas con alto contenido de alquitranes pero permitiendo el uso de biomasa con alta humedad; los gasificadores de corriente descendente (downdraft), donde tanto la biomasa como el agente gasificante descienden en co-corriente, produciendo un gas de alta calidad con bajo contenido de alquitranes; y los gasificadores de flujo cruzado (cross-draft), que presentan buena respuesta a la carga pero baja eficiencia global y alto contenido de alquitranes. Los gasificadores de lecho fluidizado fueron desarrollados para aumentar la eficiencia de conversión y resolver las dificultades operacionales de los reactores de lecho fijo, especialmente con biomasa de alto contenido de cenizas. Entre estos se distinguen los de lecho fluidizado burbujeante (BFB), los de lecho fluidizado circulante (CFB) y los de lecho fluidizado dual (DFB), cada uno con características particulares que los hacen adecuados para diferentes escalas de operación, desde 1 MW hasta 100 MW.[2]

Los reactores de flujo arrastrado representan la tecnología más empleada a gran escala debido a su capacidad para producir un gas prácticamente libre de alquitranes a partir de una amplia variedad de materias primas. En estos gasificadores, las partículas finas de biomasa (menores a 1 mm) son alimentadas en co-corriente con el agente gasificante, alcanzando tasas de conversión superiores al 98 % debido a las altas temperaturas de operación (superiores a 1200°C) y el intenso flujo turbulento. Sin embargo, el requerimiento de partículas finamente pulverizadas representa un desafío para la gasificación de biomasa debido al intensivo consumo energético del proceso de molienda. Además, las altas temperaturas de operación favorecen problemas de slagging, fouling y corrosión, dependientes de los compuestos inorgánicos presentes en la biomasa. [2]

2.1.3. Gasificación de residuos sólidos municipales

La gasificación de RSU es una alternativa entre las tecnologías WtE, donde el combustible sólido se quema en presencia reducida de oxígeno y temperatura elevada para obtener un combustible gaseoso, denominado syngas, compuesto principalmente por H_2 y CO . Actualmente, la gasificación se realiza en una amplia variedad de materiales, especialmente biomasa. Cuatro ventajas de la gasificación que destacan son la recuperación de materiales, la reducción de contaminantes, el control de emisiones, la operación y la combustión. Presentan un rendimiento similar al de las plantas convencionales de valorización energética de residuos desde el punto de vista energético [16]. En el caso de los RSU, los combustores de rejilla móvil, los gasificadores de lecho fluidizado y los hornos rotatorios son las tecnologías más utilizadas en las que se realiza la gasificación de RSU [17].

La gasificación ofrece ventajas significativas en comparación con otras tecnologías de conversión de residuos. Además de permitir el uso de corrientes de residuos para producir energía, actúa como herramienta de descarbonización que puede apoyar una transición energética más limpia en la industria, reduciendo simultáneamente los residuos forestales, agrícolas y municipales mientras maximiza la recuperación energética. El gas producido puede utilizarse directamente para generar electricidad renovable, procesarse para obtener hidrógeno verde o múltiples biocombustibles, o actuar como intermediario para obtener diversos productos como combustibles para transporte, calor, vapor, electricidad, químicos y sustitutos de gas natural. Dependiendo de la combinación de variables como tipo de biomasa, componentes de la planta y condiciones experimentales, es posible lograr un proceso sostenible con emisiones netas de CO_2 cercanas a cero, simple de operar, escalable y con necesidades de mantenimiento relativamente bajas. Adicionalmente, existe la posibilidad de reutilizar y adaptar infraestructuras existentes de combustibles fósiles, como gasoductos y plantas de combustión, contribuyendo a reducir el uso de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. [2]

No obstante, la gasificación de biomasa y residuos presenta desafíos técnicos importantes. La limpieza y acondicionamiento del gas producido constituye un aspecto crítico, ya que el gas contiene material particulado, alquitranes, compuestos de azufre, nitrógeno y otros contaminantes que deben ser removidos antes de su uso final. Los sistemas de limpieza incluyen ciclones para la remoción primaria de partículas gruesas, filtros de tela, cerámicos o metálicos para partículas finas, y sistemas de lavado húmedo o seco para la eliminación de alquitranes y otros contaminantes. El contenido de alquitrán en el gas producido representa uno de los problemas más severos en la gasificación de biomasa, ya que puede causar obstrucción de tuberías, ensuciamiento de equipos y reducción de la eficiencia del proceso. El pretratamiento de la biomasa

también representa un desafío significativo, ya que características como la humedad, el tamaño de partícula y la densidad afectan directamente la composición del gas, la conversión de carbono y la eficiencia del proceso. Biomásas fibrosas como paja de trigo, pasto varilla y residuos de palma frecuentemente presentan problemas de atascamiento en los sistemas de alimentación, requiriendo procesos de densificación como pelletización o briquetado que son intensivos en energía y costos. [2]

Aunque la gasificación de biomasa representa una tecnología prometedora para reducir la huella de carbono, aún existen brechas de conocimiento y desafíos tecnológicos que deben resolverse para su aplicación a escala industrial, incluyendo el procesamiento costo-efectivo de biomasa con baja producción de alquitranes, la optimización de las condiciones operacionales según las características del combustible y la evaluación de sostenibilidad del ciclo de vida considerando los impactos ambientales, sociales y económicos. [18]

2.2. Reactores de medios porosos

2.2.1. Combustión de medios porosos inertes

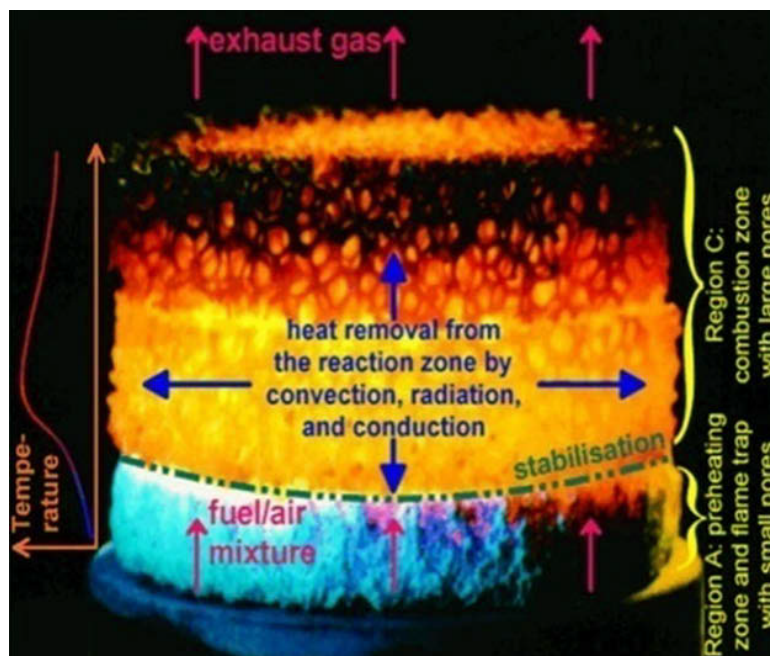


Figura 2.4: Esquemático de la combustión en medios porosos

En un reactor de medios porosos, la amplia superficie de contacto de la matriz porosa inerte proporciona una transferencia de calor eficiente entre el medio combustible que reacciona y el

medio poroso inerte; este a su vez conduce el calor a lo largo del reactor, alcanzando a precalentar la mezcla gaseosa aguas arriba de la zona de reacción e incrementando la difusión efectiva. Este fenómeno se traduce en la recuperación de energía, análogo a un ciclo regenerativo, únicamente por la naturaleza y construcción del reactor. Esto permite alcanzar estabilidad en un rango más amplio de límite de inflamabilidad, mejora la eficiencia y limpieza de la reacción. [19]

La combustión en medios porosos (PMC) presenta ventajas significativas sobre la combustión de llama libre, incluyendo una mayor velocidad de combustión, ampliación de los límites de inflamabilidad para mezclas pobres y reducción de emisiones contaminantes. El medio permite precalentar la mezcla fresca aguas arriba con la energía proveniente de los productos de combustión, lo que mejora la estabilidad de la llama y permite alcanzar temperaturas de llama superadiabáticas. Adicionalmente, la capacidad de almacenamiento térmico de la estructura porosa asegura que el proceso de combustión permanezca estable independientemente de las variaciones en la relación aire-combustible o la carga térmica. [20]

2.2.2. Combustión de medios porosos híbridos

La combustión por filtración híbrida (HFC) surge como respuesta a los desafíos impuestos por el cambio climático, las estrictas normas de emisiones y el agotamiento de las fuentes de energía convencionales. Actualmente, cerca del 98 % de la producción mundial de hidrógeno proviene de combustibles fósiles mediante procesos como el reformado con vapor, mientras que solo el 2 % se produce por electrólisis del agua, evidenciando la necesidad de métodos alternativos y neutros en carbono. La HFC combina los principios de la combustión por filtración y la combustión en medios porosos, donde un lecho discreto poroso se forma mezclando partículas inertes (como esferas de alúmina) con partículas de combustible sólido, permitiendo la conversión simultánea de combustibles sólidos y gaseosos en hidrógeno y gas de síntesis. [4]

A diferencia de la gasificación convencional en lecho fijo, la HFC incorpora recuperación de calor interno dentro del reactor, lo que permite alcanzar temperaturas máximas superiores a la temperatura adiabática del combustible inicial, fenómeno conocido como combustión superadiabática. Durante el proceso, una onda de combustión se propaga a través del lecho poroso híbrido, sosteniendo simultáneamente reacciones homogéneas y heterogéneas. Se han identificado tres zonas distintivas en los reactores HFC: la zona del lecho poroso híbrido, la zona de reacción y la zona post-reacción, donde los reactivos gaseosos son precalentados por la fase sólida antes de ingresar a la zona de combustión. La tecnología HFC ofrece múltiples beneficios, incluyendo alta estabilidad térmica, temperaturas de reacción elevadas (900-1800 K) debido a la recirculación interna de calor, bajas emisiones de partículas sólidas y operabilidad extendida

para combustibles de bajo poder calorífico. Los agentes gasificantes utilizados incluyen aire, vapor de agua, dióxido de carbono y mezclas premezcladas de aire/combustible. Según los estudios revisados, cuando se utiliza una mezcla de aire con vapor como oxidante, el contenido máximo de hidrógeno en los productos gaseosos alcanza aproximadamente el 25 % en volumen, pudiendo mejorarse mediante el uso de catalizadores u oxidantes enriquecidos con oxígeno. [4]

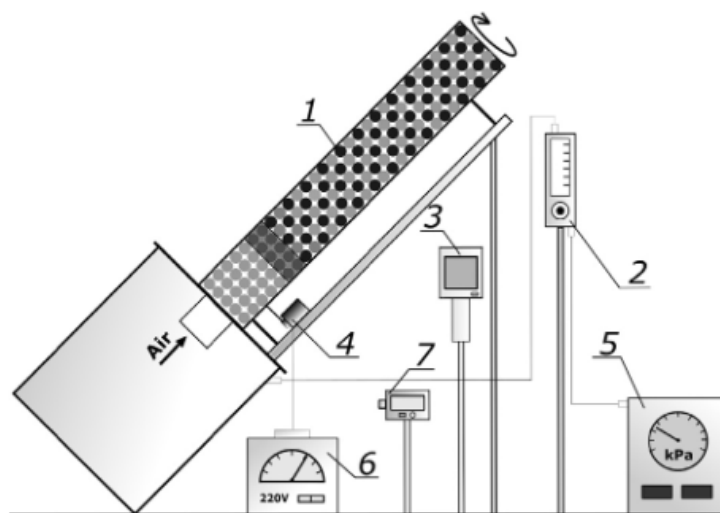


Figura 2.5: Esquemático de reactor inclinado rotatorio de medios porosos [3]

La combustión por filtración híbrida (HFC) ha sido investigada como alternativa para la producción de hidrógeno y gas de síntesis a partir de diversos combustibles sólidos como biomasa, polietileno y carbón, utilizando agentes gasificantes como vapor de agua, aire y mezclas de combustible gaseoso con aire. Tres parámetros resultan cruciales para optimizar el proceso: la temperatura a lo largo del reactor, la velocidad de la onda de combustión y el rendimiento de hidrógeno y syngas, alcanzándose contenidos máximos de hidrógeno de hasta 25 % en volumen cuando se utiliza una mezcla de aire con vapor como oxidante. Entre los desafíos identificados se encuentra la inestabilidad del frente de combustión, que puede ocurrir cuando la resistencia hidrodinámica del lecho sólido inicial supera la del residuo de ceniza, conduciendo a modos de combustión alternativos con propagación de canales o frentes inclinados. Como solución, se ha explorado el uso de reactores cilíndricos rotativos con cierto ángulo de inclinación que mejoran la mezcla del material sólido, así como la alimentación lateral de combustible en polvo y el reemplazo del lecho fijo por uno móvil. Se requiere investigación adicional en caracterización de reactores, modelación y simulación, análisis económico y evaluación de impacto ambiental, junto con estudios orientados a optimizar la operación continua del reactor con estabilización de la onda de combustión en una posición óptima [4].



Figura 2.6: Reactor inclinado rotatorio aplicado en escala industrial [4]

2.2.3. Combustión de MSW en reactores de medios porosos híbridos

La naturaleza heterogénea de los RSU representa un desafío importante, ya que la variabilidad en composición, tamaño de partícula y poder calorífico de sus componentes dificulta mantener condiciones de operación estables y eficientes. En este contexto, la gasificación en reactores de medios porosos presenta ventajas potenciales para el procesamiento de RSU. La capacidad del medio poroso inerte de actuar como acumulador térmico y distribuir el calor de manera uniforme puede compensar las variaciones en las propiedades del combustible, mientras que la posibilidad de alcanzar condiciones superadiabáticas permite procesar fracciones de RSU con bajo poder calorífico que no podrían sostener una reacción en sistemas convencionales. Además, la recirculación eficiente del calor dentro del reactor puede mejorar la conversión termoquímica de materiales con alto contenido de humedad o volátiles, incrementando el rendimiento global del proceso [21].

Existen investigaciones recientes que abordan la gasificación de RSU en general [22, 23, 24, 25], otras que estudian particularmente la gasificación de RSU en reactores downdraft [26], updraft [27], fixbed que involucran específicamente residuos plásticos y de papel [28] y únicamente papel[29]. Directamente relacionadas con tecnologías de medios porosos híbridos aplicados a los RSU existen pocas publicaciones [21, 30, 31], se encuentra una oportunidad en la investigación de diferentes componentes de los RSU debido a la falta de investigaciones publicadas al respecto y al posible impacto que los hallazgos puedan tener en la toma de decisiones acerca de prácticas que potencialicen su despliegue como tecnología para valorizar y disponer de los desechos en su cadena de valor.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Setup Experimental

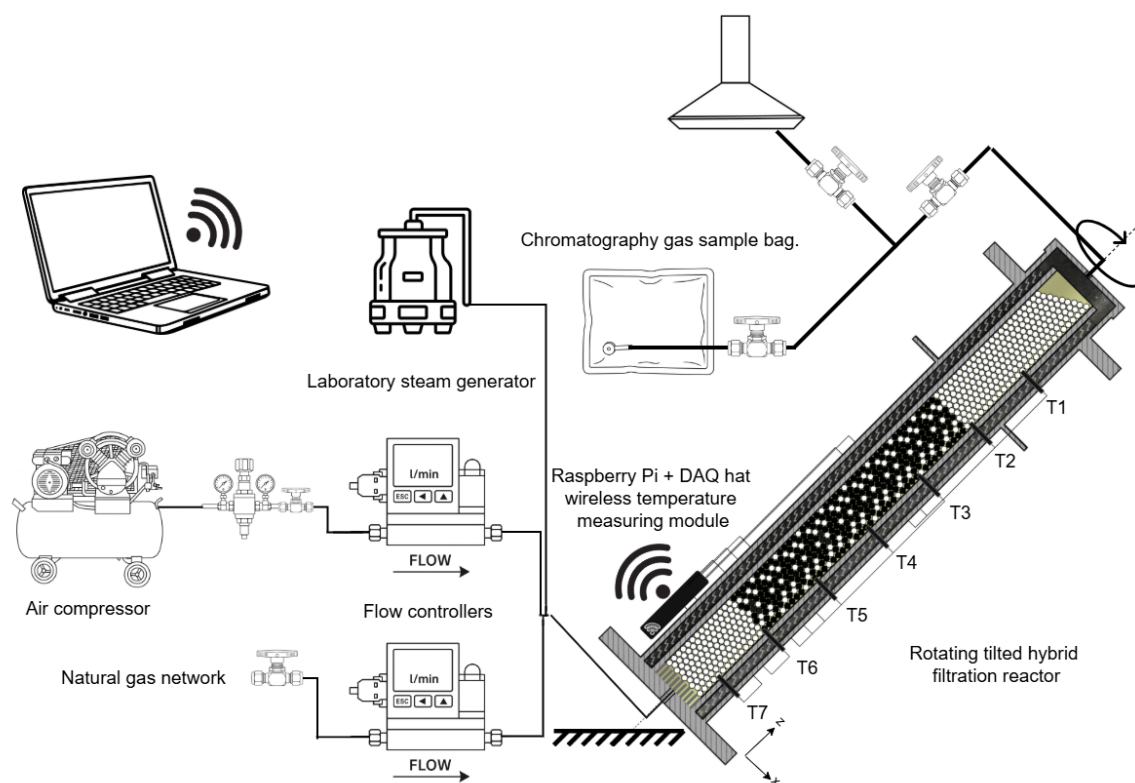


Figura 3.1: Setup experimental

Este trabajo tiene como objetivo poner en marcha y operar un reactor rotatorio híbrido de medio poroso y evaluar su rendimiento para la gasificación de polietileno de alta densidad

(HDPE), papel blanco (WP), textil de algodón (CT) y partículas de *Pinus Radiata* (PR). La gasificación de RSU es investigada térmicamente en un lecho híbrido de partículas de residuos sólidos y esferas de alúmina (3/1 v/v), utilizando flujos premezclados de aire/combustible como agentes gasificantes. Los perfiles de temperatura, las velocidades de propagación de las ondas de combustión y la composición del syngas son medidos para diferentes condiciones experimentales: 45° de inclinación del reactor, 25 rpm de rotación del reactor, 30,36 cm/s de velocidad de filtración y razón de equivalencia de 0,7, utilizando gas natural (GN).

La imagen 3.1 muestra el esquema del montaje experimental, el cual consiste en cuatro partes principales: (i) el suministro de aire y gas; (ii) el reactor en conjunto con el sistema de transmisión de movimiento; (iii) el sistema de adquisición de datos; y (iv) la salida de gases y la estación de muestreo.

Una mezcla de gas natural (GN) y aire fue utilizada para producir las reacciones altamente endotérmicas asociadas al proceso de gasificación. El gas natural (GN) es una mezcla compuesta por hasta un 96 % de metano (CH_4) [32], aunque su composición puede variar ligeramente entre proveedores. Para suministrar aire al reactor, se utilizó un compresor de aire (NITRO, V-0.25/5, 200 L). Se utilizaron dos controladores de flujo másico térmico para regular el caudal de GN (Aalborg, DPC17) y el caudal de aire (Aalborg, GFC37), siendo sus rangos de operación de caudal 0-20 LPM y 0-50 LPM, respectivamente. Una junta rotativa fue acoplada en la parte inferior del reactor, la cual permite el ingreso del GN y el aire sin afectar la rotación del reactor.

3.1.1. Construcción del reactor

El cuerpo principal del reactor consiste en un tubo ASTM A53 Sch 40 de 720 mm de largo, con un diámetro nominal de 4". Dos bridas ANSI B 16.5 fueron soldadas concéntricamente al tubo: una brida ciega de 220 mm en la parte inferior, la cual permite soporte axial y radial mediante rodillos, y una brida tipo Slip-on de 220 mm, ubicada a 650 mm de la brida ciega, la cual proporciona soporte radial en el otro extremo del reactor. El tubo de acero fue aislado térmicamente del entorno con una capa de fibra de vidrio de 10 mm de espesor, mientras que el aislamiento interior está construido con 3 capas de diferentes materiales. La primera capa consiste en un tubo cerámico concéntrico de 8 mm de espesor con un diámetro interior de 62 mm. La segunda consiste en anillos de fibra cerámica de 95 mm de diámetro exterior, mientras que la última capa fue fabricada con un manto de fibra de vidrio de 3 mm de espesor. Dentro del tubo cerámico, el combustible y el medio poroso inerte son distribuidos, este último compuesto por esferas de alúmina (Al_2O_3) de 5,6 mm de diámetro. Para la transmisión de potencia, una corona dentada 06B-60 fue soldada al tubo de acero, la cual está conectada a un motor paso a

paso mediante una cadena de transmisión.



Figura 3.2: Closeup del reactor, aislamiento reemplazado.

Para medir la distribución de temperatura durante el proceso de gasificación, se realizaron perforaciones de 12 mm a lo largo del cuerpo del reactor, donde se distribuyeron 7 termopares tipo S (T1 a T7 en la imagen 3.1). Las señales analógicas de los termopares fueron recolectadas y digitalizadas por un sistema de adquisición de datos compuesto por una Raspberry Pi 3B y dos DAQ HATS MCC134, registradas en el almacenamiento interno de la Raspberry Pi y monitoreadas en vivo mediante un computador portátil de visualización remota. Las mediciones de temperatura fueron utilizadas para registrar la temperatura máxima de combustión y para estimar la velocidad del frente de combustión a partir del desplazamiento del perfil térmico a lo largo del reactor.

Una serie de válvulas fueron configuradas para redirigir manualmente el flujo de salida desde la trayectoria del extractor, a través de un filtro de gel de sílice, y luego hacia las bolsas de muestreo a medida que la onda de combustión pasaba a través del lecho híbrido. El error experimental se estima en un 10 %, teniendo en cuenta las especificaciones de precisión y exactitud de los instrumentos utilizados.

3.1.2. Instalación y puesta en marcha del reactor

El reactor fue reacondicionado para su uso; este consistía en la estructura metálica que lo soporta, hecha en perfiles de aluminio Rexroth, y el reactor como tal, con una junta rotatoria en cada extremo. No se encontraban instalados sistemas de rotación o adquisición de datos. En la figura 3.3 se puede observar el antes vs después del estado del aparato experimental.



Figura 3.3: Instalación del reactor

Se encuentra una junta rotatoria doblada, por lo que se solicita la fabricación de la pieza en una maestranza local. Se modifica la estructura y se fabrican piezas para sujetar el reactor y los nuevos sistemas (potencia y adquisición de datos); el control de la rotación del motor eléctrico se realiza mediante un controlador comercial modulador, en la figura 3.4 se detallan estos elementos claves. En el caso de la adquisición de datos, se replica una solución usada por el grupo de investigación, en donde mediante una Raspberry Pi y el uso de 2 HATs se pueden registrar hasta 8 entradas. Se diseña y construye mediante impresión 3D una carcasa que sostiene a este conjunto junto al reactor de tal manera que no impida la rotación.

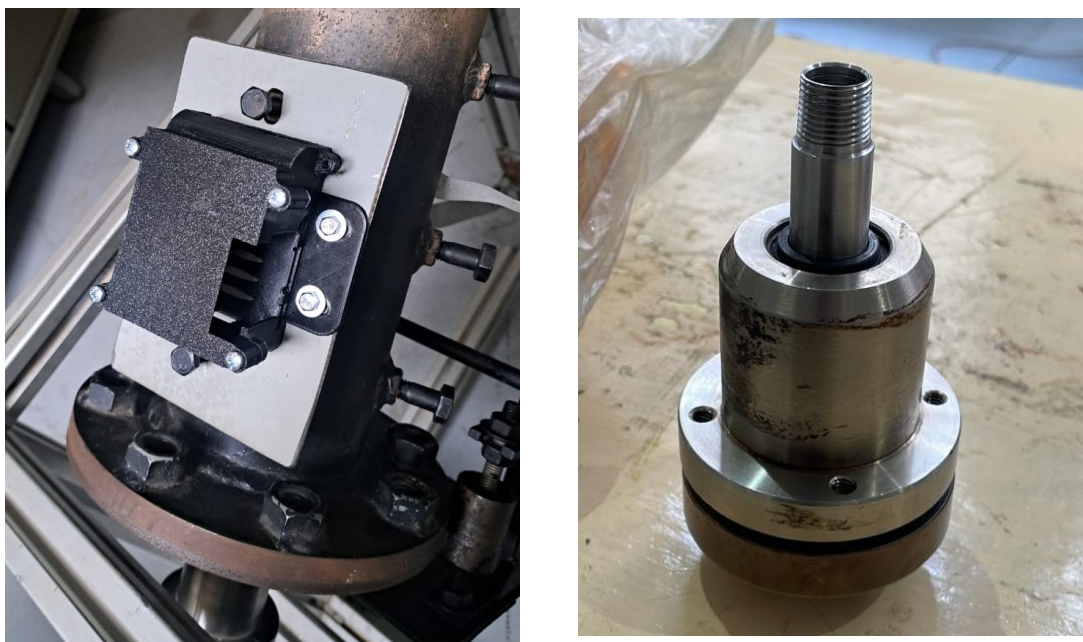


Figura 3.4: Piezas fabricadas

3.2. Procedimiento experimental

El reactor fue operado de la misma manera para todas las muestras. Primero, el reactor vacío, ya inclinado a 45° , fue llenado con esferas de alúmina hasta el nivel del sexto termopar, formando la última etapa inerte. Luego, una mezcla de combustible y esferas de alúmina, correspondiente a una razón combustible-inerte de 3:1, fue pesada, premezclada y colocada en el reactor. Esta mezcla, que constituyó la etapa híbrida, llenó el reactor hasta el segundo termopar. Finalmente, la longitud restante del reactor fue llenada con esferas de alúmina, formando la primera etapa inerte.

El encendido se llevó a cabo con el reactor abierto (sin la tapa superior), quemando una mezcla rica de GN-aire como llama libre que sobresale del final abierto del reactor. A medida que el medio inerte se calentaba, el frente de combustión gradualmente se confinó en la primera etapa inerte. Una vez que el frente de llama estuvo completamente confinado, la tapa fue atornillada y el motor fue encendido para rotar el reactor continuamente a 15 RPM. Esta tapa también tiene una junta rotatoria que permite la conexión de tubería para la salida de gases aun cuando el reactor se encuentra girando.

Desde el encendido en adelante, las temperaturas se registran en la Raspberry Pi y se monitorean continuamente en un computador portátil remoto. Cuando el peak de temperatura pasó por los termopares 3, 4 y 5, el aparato de muestreo de gas se activa para purgar la bolsa de muestreo,

filtrar el gas a través de un filtro de gel de sílice y recolectar la muestra de syngas. Poco después de obtener la muestra final, cuando el frente de llama se aproxima a los componentes electrónicos, el experimento es finalizado y el flujo de GN suspendido.

3.3. Análisis de los datos

Con el setup se obtienen archivos .txt que contienen el registro de las temperaturas medidas por cada termopar a lo largo del tiempo de cada experiencia. Un ejemplo de estos datos representados de esta manera se puede observar en la figura 3.5, aquí también se pueden observar trazadas 3 líneas isoterma que cortan a los perfiles de temperatura medidos. Sabiendo la distancia entre los puntos donde se realizan las mediciones y el tiempo comparando las abscisas de dichos puntos, se puede calcular la velocidad de propagación del frente de combustión, con la expresión 3.1, se trazan 3 de estas líneas para así tener múltiples muestras, sacar un promedio de los resultados y que de esta manera sean estadísticamente más representativos.

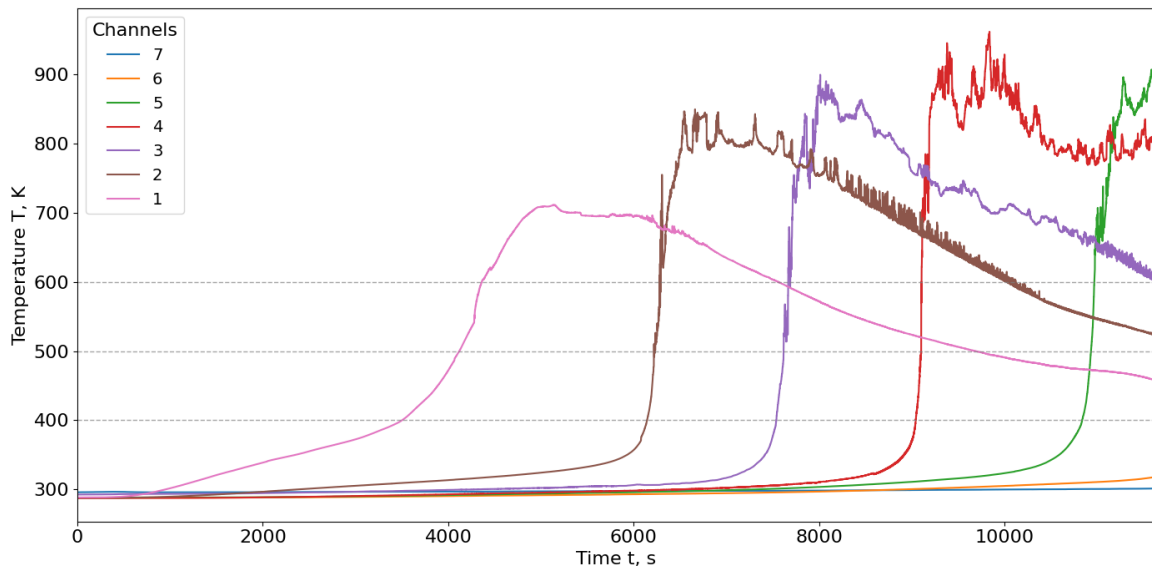


Figura 3.5: Isotermas para el cálculo de velocidad de propagación del frente de combustión.

$$V_{fc} = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (3.1)$$

En el caso de las temperaturas máximas observadas, se ubicaron los puntos con valores máximos y alrededor de estos, específicamente $\pm 50K$, se calculó el promedio de estos datos; este resultado fue presentado como la temperatura máxima obtenida en cada corrida del experimento.

3.4. Características de los residuos sólidos municipales

Los textiles han sido previamente considerados como combustibles para gasificación debido a su poder calorífico superior [33]. Múltiples investigaciones sobre gasificación de madera han sido llevadas a cabo debido a su alto contenido de volátiles y, por lo tanto, su potencial para obtener altos rendimientos de H_2 y CO [34, 35, 36, 37, 38]. El plástico ha sido utilizado como combustible para gasificación debido a su alto contenido de H_2 , C y volátiles [39], y el creciente contenido de plástico en los RSU ha motivado diversas investigaciones al respecto [40, 41, 42]. Los residuos de papel muestran potencial para un alto rendimiento de H_2 debido a su rápida velocidad de reacción y alto índice catalítico [43].

Considerando el contexto descrito anteriormente, investigaciones previas generalmente han examinado cada combustible por separado o, a lo sumo, comparado dos combustibles. En contraste, el presente estudio tiene como objetivo evaluar múltiples combustibles bajo condiciones comparables.

El proceso de gasificación de biomasa ocurre a través de tres etapas principales: la desvolatilización o pirólisis inicial, que produce materia volátil y un residuo de char a temperaturas relativamente bajas; las reacciones secundarias que involucran los productos volátiles; y las reacciones de gasificación del residuo carbonoso con vapor y dióxido de carbono a temperaturas más elevadas. Las principales reacciones que tienen lugar incluyen la oxidación, la reacción de Boudouard, las reacciones agua-gas primaria y secundaria, la metanación, la reacción water-gas shift y el reformado con vapor. [6]

Tabla 3.1: Principales reacciones de gasificación de biomasa.[6]

Reacción	Ecuación	Rango de temperatura
Oxidación	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	973-1273 K
Oxidación parcial	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	973-1273 K
Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$> 1103K$ (predominante)
Agua-gas primaria	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$> 1103K$ (predominante)
Agua-gas secundaria	$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$	$> 1103K$ (predominante)
Metanación	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	973-1173 K
Water-gas shift	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	1003-1103 K (predominante)
Reformado con vapor	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$> 1103K$

3.4.1. Pino radiata

En el caso de la madera, para el rango de 1003-1103 K, la reacción water-gas shift aparece como la más dominante, especialmente para especies como encina y eucalipto. En este rango, se observa un aumento gradual en la concentración de H_2 y CO_2 , mientras que el CO disminuye. Para temperaturas entre 1103-1173 K, aunque la reacción water-gas shift continúa ocurriendo, las reacciones agua-gas y la reacción de Boudouard se vuelven predominantes. En este rango se observa el mayor incremento en la producción de H_2 , alcanzando concentraciones de 33-45 % en volumen, junto con una disminución en la concentración de CO_2 y una reducción significativa de hidrocarburos debido a las reacciones de cracking y reformado. Los resultados sugieren que la temperatura óptima de gasificación es 1173 K o superior, debido a que el gas producido presenta mayor contenido de hidrógeno, menor cantidad de hidrocarburos y alquitranes, y se favorecen las conversiones de energía y carbono, así como el rendimiento de gas. [6]

3.4.2. HDPE

Durante la gasificación de polietileno de alta densidad, se producen diversas reacciones cuya predominancia depende de las condiciones de temperatura y la composición del sistema. Algunos autores sugieren que el HDPE favorece la reacción de Boudouard frente a la reacción water-gas shift, debido a la mayor concentración de radicales de carbono o hidrocarburos generados durante el cracking del polímero. A medida que la temperatura aumenta, la importancia relativa de la reacción agua-gas se incrementa respecto a la reacción water-gas shift, aunque la concentración de hidrógeno permanece prácticamente constante al variar tanto el caudal de aire como el contenido de HDPE. Esto indica que, bajo las condiciones estudiadas, la contribución de estas reacciones es menos significativa que la de la reacción de Boudouard. En la zona de oxidación se alcanzaron temperaturas entre 1349 y 1890 K, mientras que en la zona de reducción las temperaturas variaron entre 893 y 1230 K. El CO_2 formado en la zona de combustión inicial reacciona con el char o con los radicales de hidrocarburos, incrementando la concentración de CO . La presencia de HDPE genera un aumento en las temperaturas del gasificador, lo que favorece las reacciones de reducción del char, aumentando la conversión de biomasa y el rendimiento energético, resultando en una relación CO/CO_2 que se incrementa a medida que aumenta el contenido de HDPE en el feed. [44]

3.4.3. Papel

Durante la gasificación de papel, la secuencia de reacciones comienza con la pirólisis, donde el material se descompone térmicamente liberando gases, alquitranes y char. La pirólisis puede iniciarse a temperaturas relativamente bajas, alrededor de 673 K, mientras que la gasificación del char requiere temperaturas superiores a 973 K para activarse. A temperaturas inferiores a 973 K, las reacciones de gasificación están prácticamente ausentes, observándose rendimientos similares entre pirólisis y gasificación a 873 K. La reacción char-vapor constituye el mecanismo principal de conversión del residuo carbonoso, con una energía de activación de aproximadamente 149 kJ/mol, valor comparable al reportado para otros materiales carbonosos como chars de biomasa. El incremento en la relación vapor en la muestra favorece la reacción water-gas shift, aumentando el rendimiento de H_2 y CO_2 mientras disminuye el de CO y CH_4 , lo que resulta en un aumento directo de la relación H_2/CO . Adicionalmente, el alto contenido de cenizas del papel, particularmente la presencia de potasio, ejerce un efecto catalítico sobre el proceso de gasificación, incrementando la reactividad del char a medida que avanza la conversión. A temperaturas superiores a 1073 K se observa un solapamiento significativo entre la pirólisis y la gasificación del char, alcanzando hasta un 95 % de superposición a 1273 K, lo que indica que ambos procesos ocurren simultáneamente bajo estas condiciones. [45]

3.4.4. Algodón textil

Durante la gasificación de residuos textiles de algodón, ocurren múltiples reacciones cuya predominancia depende del agente gasificante utilizado y las condiciones de operación. Las principales reacciones involucradas incluyen la oxidación y oxidación parcial del carbono, la reacción de Boudouard, la metanación, las reacciones agua-gas primaria y secundaria, la reacción water-gas shift, el reformado con vapor, el reformado seco y el cracking de hidrocarburos. A una temperatura de operación de 1173 K, la composición del gas de síntesis varía significativamente según el agente gasificante empleado. En el estudio [46], cuando se utiliza aire como agente gasificante, el syngas presenta una concentración de H_2 del 12,4 % y de CO del 21,6 %, con una relación H_2/CO de 0,6. La adición de vapor al aire favorece las reacciones water-gas shift y reformado con vapor, incrementando la concentración de H hasta 22,1 % y mejorando la relación H_2/CO a 1,2. La gasificación con CO_2 produce un aumento significativo en la concentración de CO (44,9 %) debido a la reacción de Boudouard, aunque reduce ligeramente el contenido de H_2 (8,7 %). La combinación de vapor con O_2 genera los mayores contenidos de H_2 , alcanzando 31,4-37,2 % dependiendo de la relación vapor/carbono utilizada, con relaciones H_2/CO de hasta 1,4. El poder calorífico inferior del syngas varía desde aproximadamente 5 MJ/ m_3 cuando se

utiliza aire (debido al efecto diluyente del N_2), hasta $10 \text{ MJ}/m_3$ cuando se emplea vapor con O_2 o CO_2 , lo que indica la idoneidad del syngas de residuos textiles para recuperación energética.

3.5. Configuración de la cama híbrida

En este estudio, los materiales sometidos a gasificación incluyeron HDPE, WP, CT, and PR. La selección de estos tres primeros materiales de la categoría más amplia de RSU se basó en su tamaño de partícula, aproximadamente 10 mm, obtenido mediante el proceso de molienda. El PEAD utilizado en el proceso de gasificación provino principalmente de envases, el PB de suministros de oficina y el TA de prendas de vestir. En el caso del PR, se obtuvieron pellets compuestos enteramente de residuos de manufactura de madera de un proveedor certificado ENplus, el cual evaluó sus poderes caloríficos según la norma ISO 18125:2017 [47].

La determinación del poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS) de las partículas de RSU reciclados siguió la norma ASTM 240 [48]. Para este propósito se utilizó un calorímetro de bomba isoperibol (Parr Instrument Company, calorímetro 1261). Los poderes caloríficos se presentan en la tabla 3.2. Adicionalmente, el contenido de humedad de las partículas de RSU fue determinado según la norma ASTM E871-82 [49], resultando en un 5,6 % del peso total. El contenido de humedad del PEAD no fue considerado debido a la naturaleza no polar del material.

Tabla 3.2: Contenido energético de los RSU

MSW	PCI MJ kg ⁻¹	PCS MJ kg ⁻¹	Muestra
HDPE	-	46.29	
Pinus radiata (PR)	17.30	18.80	
Cotton textile (CT)	15.61	16.96	
White paper (WP)	12.43	13.55	

La distribución de combustible sólido en el lecho híbrido fue evaluada en estudios previos, particularmente por Dai y Dai [5], donde se demostró que los mayores rendimientos se obtuvieron utilizando configuraciones del lecho en los cuales las secciones inertes se extendían a lo largo de toda la longitud del reactor, las partículas de combustible e inertes eran del mismo tamaño, y la razón volumétrica combustible-inerte era máxima en la sección híbrida del lecho. Para esta última condición, el estudio utilizó una razón combustible-inerte de 3:0 en la sección híbrida (es decir, sin presencia de medio inerte) como se ilustra en la figura 3.6. En el presente estudio, se propone una razón de 3:1 para maximizar la razón combustible-inerte mientras se retiene algo de medio inerte en el lecho híbrido, como se presenta en la parte del esquema del reactor del montaje en la imagen 3.1.

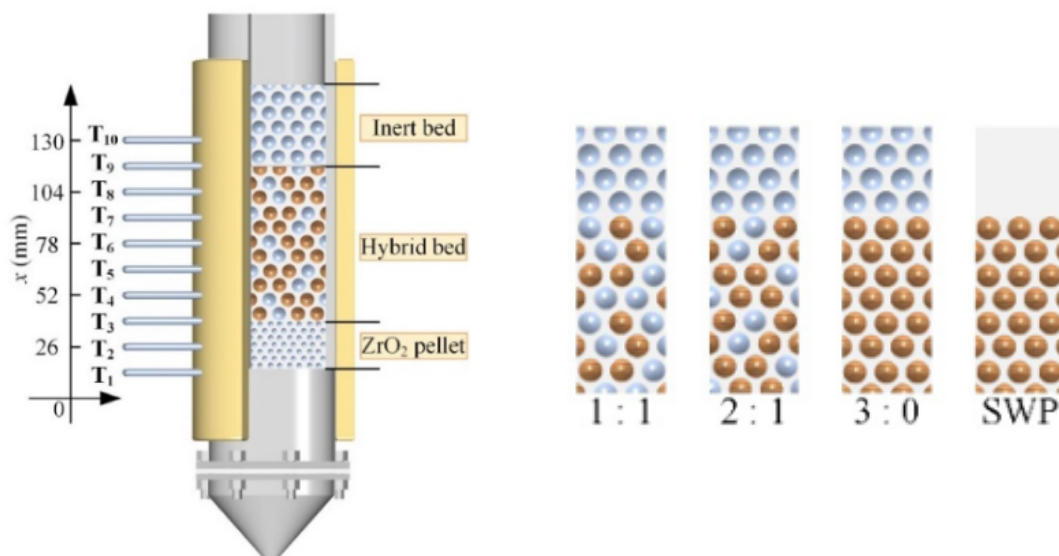


Figura 3.6: Configuraciones de relación medio híbrido:combustible sólido estudiado en [5]

Capítulo 4

Resultados y Análisis

Aquí, los resultados experimentales para cada combustible sólido se presentan en términos de temperatura máxima, velocidad de frente de combustión y caracterización por cromatografía de gases del syngas H_2 y CO . Posteriormente, se calculan las eficiencias de conversión de H_2 y CO y se discuten las implicaciones de estos resultados.

4.1. Comportamiento térmico

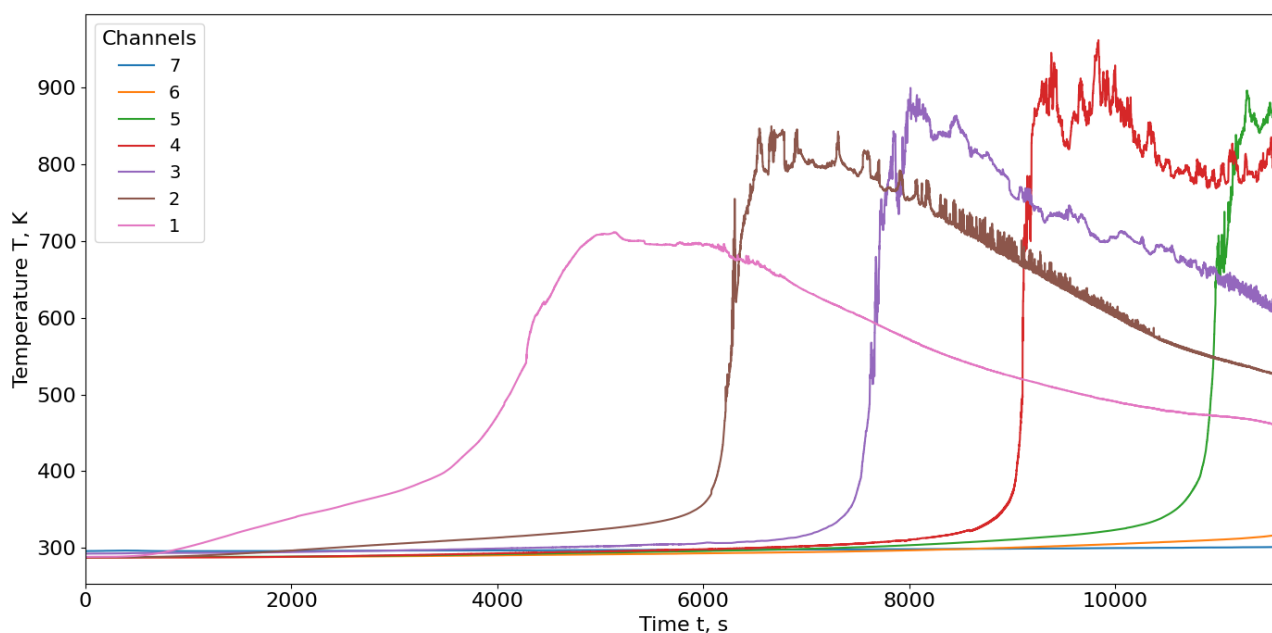


Figura 4.1: Perfil de temperatura de la cogasificación del pino sin vapor de agua vs t.

El perfil de temperatura obtenido para el ensayo con pino sin vapor se muestra en la imagen 4.1. Un comportamiento similar fue observado en los perfiles de temperatura para los combustibles restantes. En este gráfico, la temperatura, entendida como aquella correspondiente a la fase sólida, se muestra en función del tiempo. Se puede observar que para el lecho híbrido (termopares 2 a 5), la temperatura exhibió peaks subsecuentes distintos en lugar de la curva suave con un único máximo bien definido típicamente observada en la combustión por filtración tanto para casos homogéneos [50, 51, 52] como heterogéneos [53, 54, 5].

En el estudio [55], el cual aborda la gasificación de diferentes combustibles sólidos como RSU y otras fuentes de biomasa en un gasificador de corriente ascendente, el comportamiento del perfil de temperatura corresponde al observado en la imagen 4.2. En estos casos, la energía requerida para la gasificación se obtiene de un sustrato diferente al que está siendo gasificado (gasificación alotérmica). Se puede afirmar que el descenso y aumento cíclico de la temperatura ocurren cuando el frente de combustión avanza y el lecho híbrido se reordena; al encontrarse nuevo material de alimentación, el ciclo de etapas endotérmicas previas a la gasificación (secado y pirólisis) se reinicia, disminuyendo así la temperatura. Luego, cuando las reacciones de reducción y oxidación dominan en la fase de gasificación, la temperatura aumenta a medida que se libera calor.

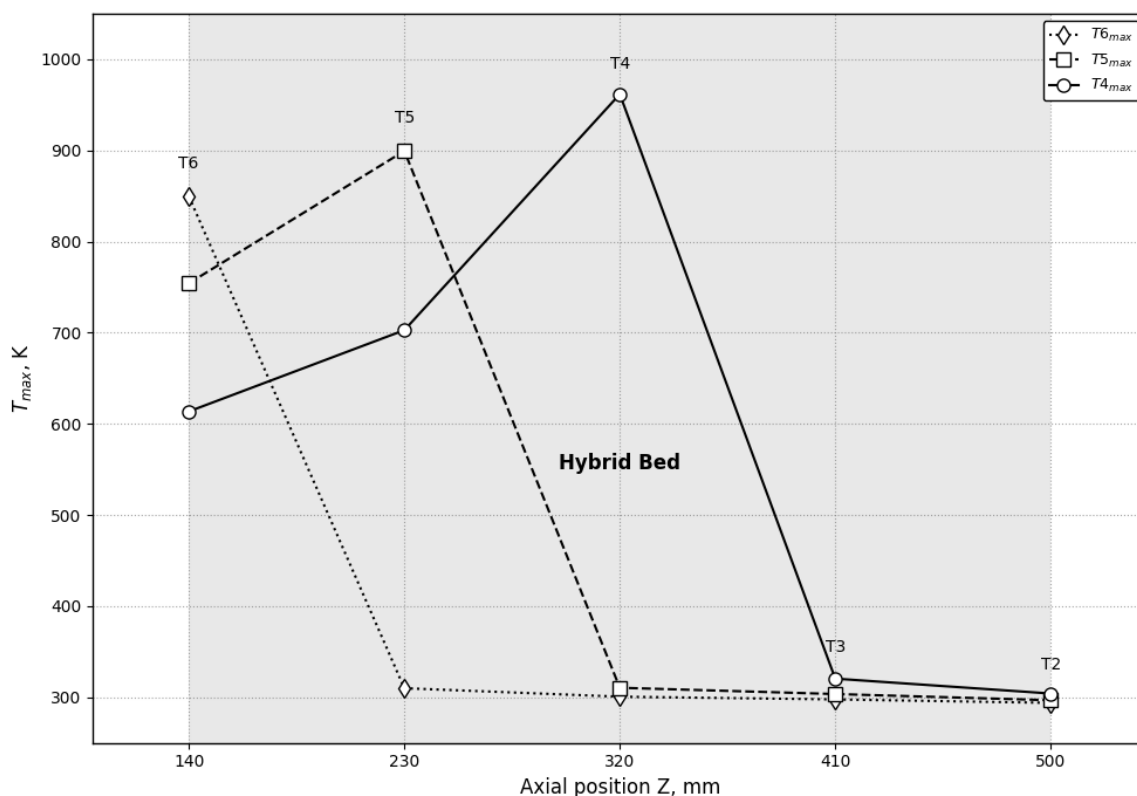


Figura 4.2: Perfil de temperatura de la cogasificación del pino sin vapor de agua vs z.

En la figura 4.2 se muestran los perfiles de las 3 temperaturas máximas observadas, junto con una imagen de cada distribución de temperatura dentro del reactor. Se observa que la temperatura máxima puntual se ubica en la posición del termopar #4, justo en el centro de la zona híbrida. También es notable que los perfiles son muy similares y a priori las líneas paralelas, esto es, la diferencia entre las temperaturas se mantiene muy similar de perfil a perfil.

Se observó un perfil de temperatura similar en todos los termopares, los cuales estaban ubicados aproximadamente equidistantes entre sí. La temperatura máxima más alta de 930 K fue registrada por T4, ubicado a 320 mm dentro de la región del lecho híbrido (140–500 mm). Esta fue seguida por T5 a 230 mm (895 K), T3 a 410 mm (876 K) y T2 a 500 mm (822 K), todos los cuales también estaban posicionados dentro del lecho híbrido. La temperatura máxima más baja de 711 K fue registrada por T1, ubicado en la sección del lecho inerte. Cabe recalcar que las temperaturas máximas reportadas ($T_{\max}$) se calcularon identificando la temperatura máxima registrada y promediando todos los valores dentro de un rango de ± 50 K alrededor de este máximo.

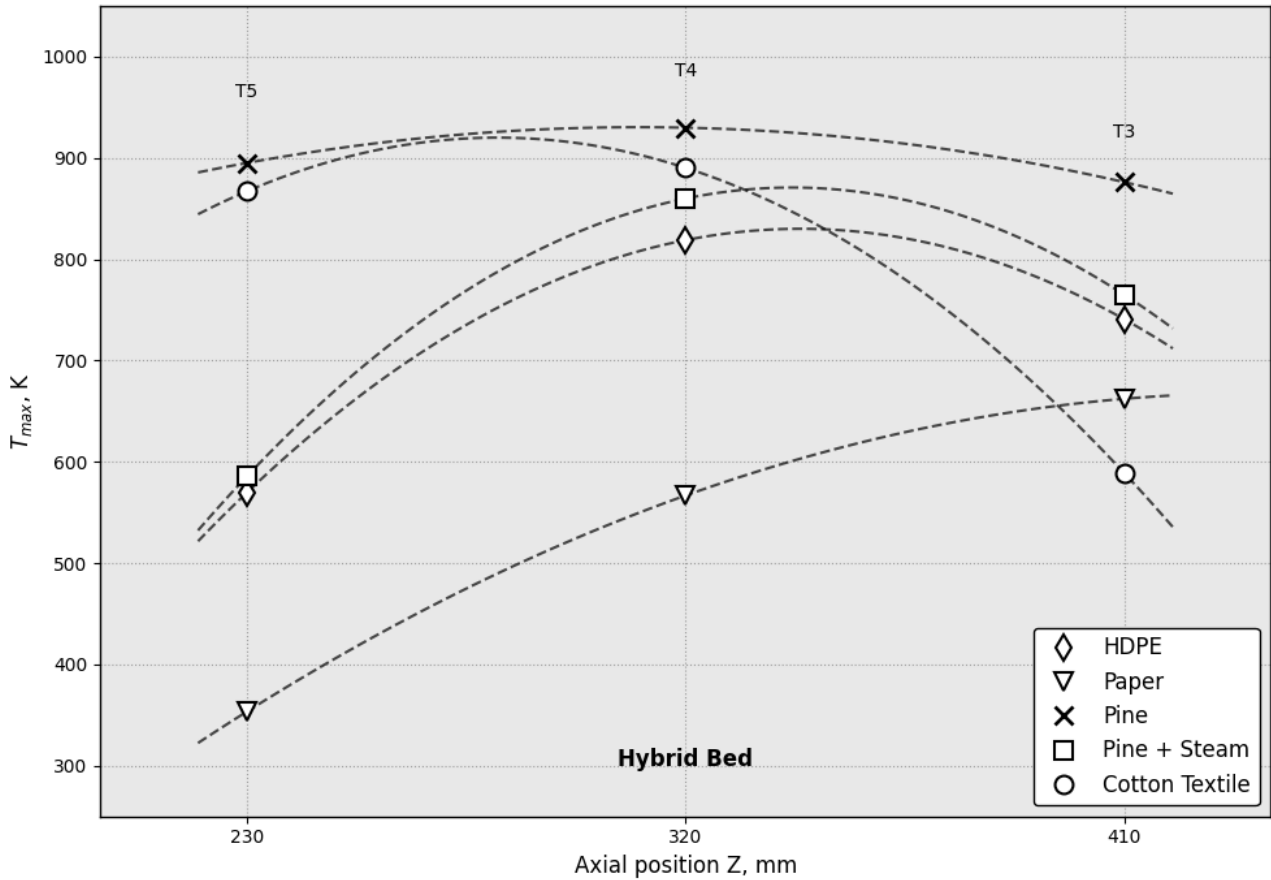


Figura 4.3: Distribución de temperaturas máximas por cada combustible

La figura 4.3 presenta la distribución de temperatura máxima (T_{max}) a lo largo de la posición axial del reactor, independientemente del tiempo, para los cinco combustibles evaluados: HDPE, papel, pino, pino con vapor y textil de algodón. Las mediciones corresponden a los termopares T5 (230 mm), T4 (320 mm) y T3 (410 mm), ubicados dentro de la zona del lecho híbrido.

Se observa que el pino presenta las temperaturas máximas más elevadas entre todos los combustibles, alcanzando aproximadamente 895 K en T5, un máximo de 930 K en T4, y manteniéndose alrededor de 875 K en T3, exhibiendo un perfil relativamente estable a lo largo del reactor. El algodón textil muestra un comportamiento particular, con una temperatura inicial alta de aproximadamente 870 K en T5, que aumenta ligeramente hasta 890 K en T4, pero disminuye significativamente hasta cerca de 590 K en T3. La adición de vapor al pino resulta en temperaturas ligeramente inferiores comparadas con el pino sin vapor, con valores de aproximadamente 585 K en T5, 860 K en T4 y 765 K en T3.

El HDPE exhibe un perfil de temperatura creciente, partiendo de aproximadamente 570 K en T5, alcanzando un máximo de 820 K en T4, y disminuyendo levemente hasta 740 K en T3. Por su parte, el papel presenta las temperaturas más bajas entre todos los combustibles evaluados, con valores que aumentan progresivamente desde aproximadamente 355 K en T5 hasta 565 K en T4 y 665 K en T3, mostrando una tendencia ascendente a lo largo del reactor que difiere del comportamiento de los demás combustibles.

Las curvas de tendencia muestran que la mayoría de los combustibles presentan un máximo de temperatura en la zona central del lecho híbrido (alrededor de T4, 320 mm), con excepción del papel que muestra un incremento continuo de temperatura a lo largo de la posición axial.

4.2. Velocidad del frente de llama

Tabla 4.1: Promedio de la velocidad del frente de llama por combustible

Combustible	Velocidad promedio [mm/s]	SEM [mm/s]	n
HDPE	0.0516	0.00129	8
Paper	0.0619	0.00659	6
Pine	0.0587	0.00087	9
Pine + Steam	0.0424	0.00093	9
Cotton Textile	0.0742	0.00425	9

La velocidad del frente de combustión observada para cada combustible es comparable al régimen de baja velocidad (LVR, por sus siglas en inglés) descrito para la combustión por filtración homogénea, donde las velocidades permanecen por debajo de 0,1 mm/s. Este régimen también se caracteriza por un intensivo intercambio de calor entre fases, impulsado por la significativa conductividad térmica del esqueleto sólido típica de las esferas de alúmina [56].

La mayor velocidad del frente de llama de 0,0742 mm/s fue observada para el textil, seguido por el papel con 0,0619 mm/s y el pino con 0,0587 mm/s. El HDPE exhibió una velocidad de 0,0516 mm/s, mientras que el pino con inyección de vapor mostró la menor velocidad entre todos los combustibles con 0,0424 mm/s, lo cual es consistente con la reducción de energía disponible observada bajo estas condiciones.

Entre los combustibles, el textil exhibió la mayor velocidad de propagación, lo cual se puede relacionar con el alto factor preexponencial reportado en estudios de cinética de reacción, como se muestra en la tabla 4.2. Dado que los valores de energía de activación son similares entre los combustibles, las diferencias en el factor preexponencial pueden ser el factor principal que gobierna la variación observada en las velocidades del frente de combustión.

Tabla 4.2: Parámetros de cinéticas de reacción para diferentes componentes de RSU [7]

sample	range of temperature [K]	activation energy (E , [$kJ \cdot mol^{-1}$])	preexponential Factor (A , [min^{-1}])
Paper	522–600	65.44	1.083
	600–722	60.36	2.28
Textile	522–600	56.03	5.53E3
	600–796	30.65	1.18E3
Wood	489–590	38.47	2.80E2
	590–749	16.93	1.37
Plastic	635–733	92.37	1.40E6
	733–801	25.24	17.04
	505–653	4.97	0.019

4.3. Características del gas de síntesis

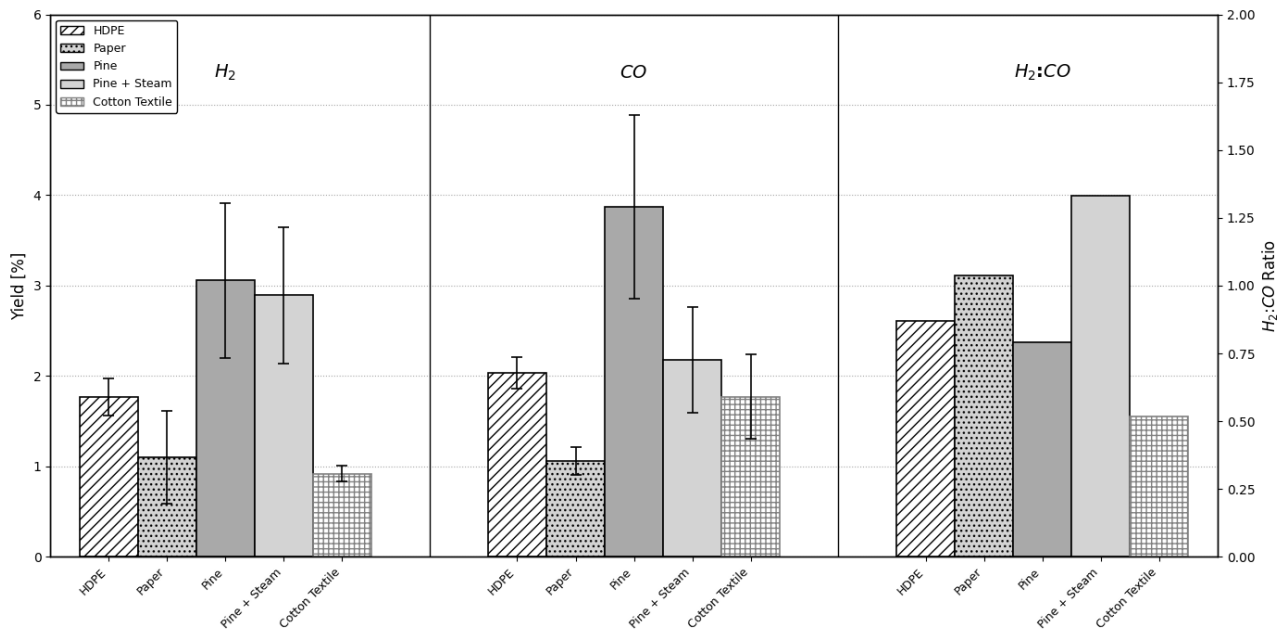


Figura 4.4: Composición del syngas

La imagen 4.5 presenta la composición del syngas en términos de rendimientos de H_2 y CO , junto con la razón $H_2:CO$, para los diferentes combustibles evaluados. El pino exhibió los mayores rendimientos tanto para H_2 como para CO , con valores de 3,06 % y 3,87 %, respectivamente. La adición de vapor al caso del pino resultó en una ligera disminución del rendimiento de H_2 a 2,90 % y una reducción más pronunciada del rendimiento de CO a 2,18 %, conduciendo a un aumento en la razón $H_2:CO$ de 0,79 a 1,33. El HDPE mostró rendimientos intermedios de 1,77 % de H_2 y 2,03 % de CO , con una razón $H_2:CO$ de 0,87. El papel exhibió rendimientos relativamente bajos para ambas especies, con 1,10 % de H_2 y 1,06 % de CO , resultando en una razón $H_2:CO$ de 1,04. El algodón textil mostró el menor rendimiento de H_2 con 0,92 % y un rendimiento de CO de 1,77 %, obteniendo la menor razón $H_2:CO$ entre todos los combustibles con 0,52.

4.4. Conversión de Carbono e Hidrógeno

La eficiencia de conversión a gas frío (η), basada en el poder calorífico inferior (PCI) del syngas producido, fue evaluada mediante la siguiente relación, la cual considera las contribuciones de H_2 y CO , adaptada de [57] y mostrada en la Figura 4.5.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2} + \dot{m}_{CO} \cdot LHV_{CO}}{\dot{m}_{msw} \cdot LHV_{msw} + \dot{m}_{fuel} \cdot LHV_{fuel}} \quad (4.1)$$

donde $\dot{m}_{H_2}$ y $\dot{m}_{CO}$ son los caudales másicos de hidrógeno y monóxido de carbono, respectivamente. LHV_{H_2} y LHV_{CO} son sus respectivos poderes caloríficos inferiores. $\dot{m}_{msw}$ y LHV_{msw} corresponden al caudal másico y al poder calorífico inferior de los residuos sólidos urbanos, mientras que $\dot{m}_{fuel}$ y LHV_{fuel} representan los del combustible auxiliar.

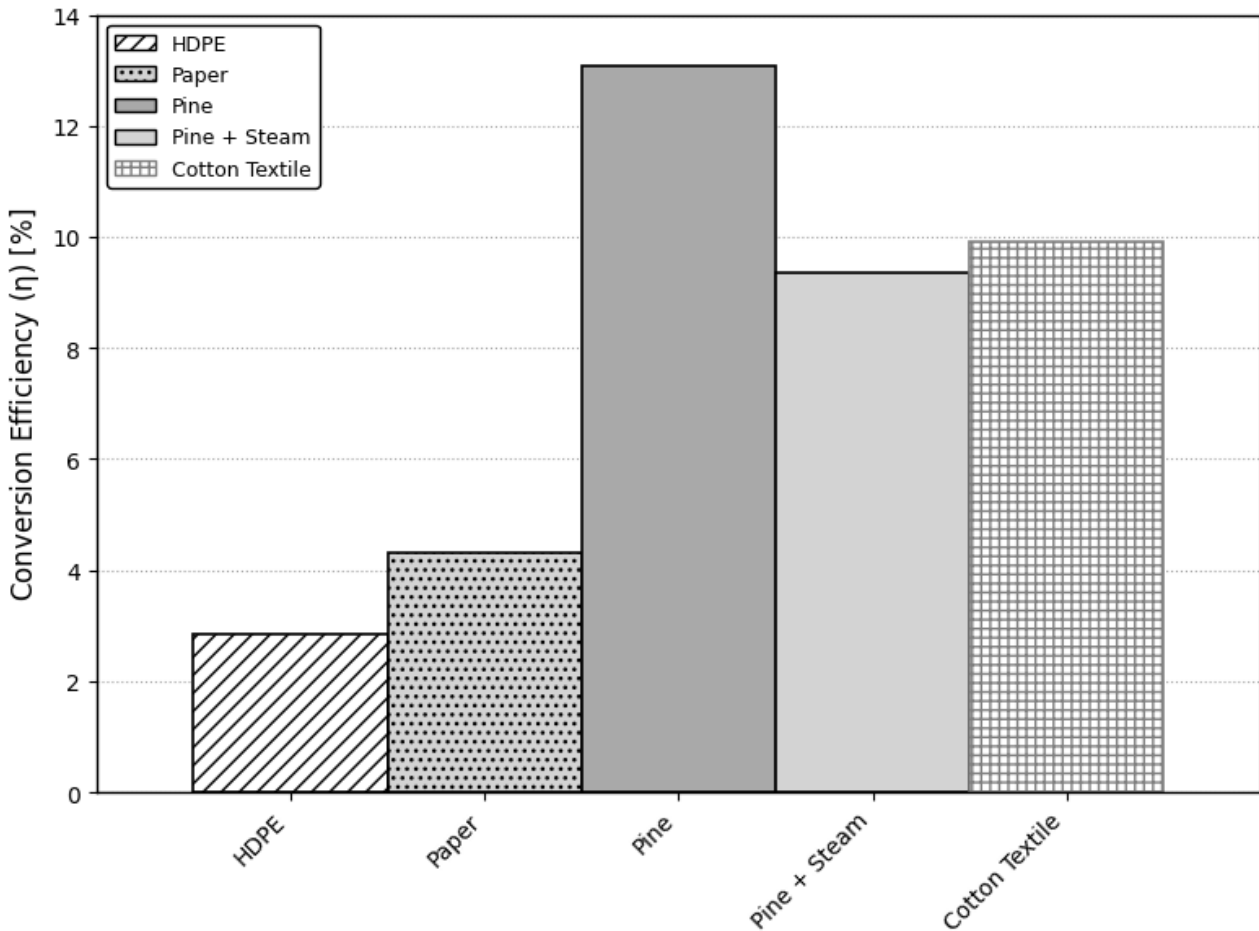


Figura 4.5: Eficiencia de conversión

La figura 4.5 presenta la eficiencia de conversión (η) para los cinco combustibles evaluados. El pino exhibió la mayor eficiencia de conversión 13.1 %, seguido por el textil de algodón y el pino con inyección de vapor con valores de 9.9 % y 9.3 % respectivamente, mientras que el papel blanco mostró valores de 4.3 %, y el HDPE presentó la menor eficiencia entre todos los combustibles con 2.8 %. La adición de vapor al caso del pino resultó en una disminución de la eficiencia de conversión en comparación con el caso del pino seco, lo cual puede correlacionarse con la reducción en la velocidad de la onda de combustión y la temperatura máxima observada bajo condiciones de inyección de vapor. Entre los combustibles orgánicos, el pino y el textil de algodón demostraron eficiencias significativamente mayores en comparación con el papel blanco, lo cual es consistente con sus mayores poderes caloríficos y un comportamiento térmico más favorable. La baja eficiencia de conversión observada para el HDPE es consistente con su naturaleza polimérica, que típicamente resulta en una baja formación de char, reduciendo también la recuperación energética global en la fase de syngas.[58]

Capítulo 5

Conclusiones

Este estudio investigó experimentalmente la gasificación de componentes representativos de residuos sólidos urbanos (RSU), tales como HDPE, papel blanco (PB), textil de algodón (TA) y *Pinus radiata* (PR), en un reactor rotativo de combustión por filtración híbrida (HFC) operando con soporte de gas natural. Los resultados demuestran que es posible lograr una gasificación estable bajo condiciones de combustión por filtración a baja velocidad, con velocidades de onda de combustión inferiores a 0,1 mm/s y temperaturas máximas en el rango de 700–930 K.

Los perfiles térmicos exhibieron una estructura de múltiples peaks dentro del lecho híbrido, desviándose del comportamiento de pico único típicamente reportado en el fenómeno de combustión por filtración convencional, lo cual podría atribuirse a la interacción periódica entre el frente de combustión en avance y el reordenamiento del lecho empacado híbrido bajo rotación. Estos resultados destacan el rol de la rotación en sostener la gasificación alotérmica y estabilizar el frente de combustión en sistemas de combustibles heterogéneos.

Entre los combustibles evaluados, el PR mostró el mejor desempeño general, alcanzando una temperatura máxima de 930 K, una velocidad de onda de combustión de 0,0587 mm/s y los mayores rendimientos de syngas (3,06 % H_2 y 3,87 % CO), resultando en la mayor eficiencia de conversión. El algodón textil exhibió la mayor velocidad de propagación (0,0742 mm/s), consistente con los parámetros cinéticos reportados en la literatura, pero produjo menores rendimientos de syngas (0,92 % H_2 y 1,77 % CO). El HDPE mostró un comportamiento térmico intermedio (819 K, 0,0516 mm/s), pero la menor eficiencia de conversión, lo cual se atribuye a su limitada formación de char y su reducida contribución a las reacciones heterogéneas. El papel presentó el menor desempeño térmico entre los combustibles basados en biomasa, con una temperatura máxima de 740 K y rendimientos de syngas correspondientemente bajos (1,10 %

H₂ y 1,06 % CO). La adición de vapor al caso del PR redujo la temperatura máxima de 930 K a 860 K y disminuyó la velocidad de onda de combustión de 0,0587 a 0,0424 mm/s, conduciendo a una caída en la eficiencia de conversión. Al mismo tiempo, la razón H₂/CO aumentó de 0,79 a 1,33 debido a la promoción de la reacción water-gas shift. Este resultado resalta el canje entre mejorar la composición del syngas y mantener la intensidad térmica en el reactor.

Las tendencias de eficiencia de conversión fueron consistentes con el comportamiento térmico y cinético observado, asociándose mayores eficiencias con mayores temperaturas y velocidades de propagación. Estos resultados confirman que el desempeño del reactor está gobernado por el acoplamiento entre la transferencia de calor, la cinética de reacción y las propiedades del combustible.

El trabajo futuro debería enfocarse en la inclusión de un rango más amplio de especies de syngas para una evaluación de eficiencia más completa, la optimización de parámetros operacionales (por ejemplo, velocidad de rotación, razón de equivalencia y adición de vapor), y la integración de modelado cinético detallado para describir de una manera más detallada los fenómenos acoplados de transporte y reacción. Estos desarrollos son esenciales para avanzar en la escalabilidad e implementación práctica de sistemas basados en HFC para aplicaciones de conversión de residuos en energía, que respondan a las necesidades y problemáticas locales, procurando añadir elementos en el diseño de los reactores o dispositivos que los vuelvan más fácilmente integrables con la infraestructura ya establecida.

Bibliografía

- [1] A. M. Yattoo, B. Hamid, T. A. Sheikh, S. Ali, S. A. Bhat, S. Ramola, M. N. Ali, Z. A. Baba, and S. Kumar, “Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 16, pp. 23 363–23 392, 2024.
- [2] E. Monteiro, A. Ramos, and A. Rouboa, “Fundamental designs of gasification plants for combined heat and power,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 196, p. 114305, 2024.
- [3] D. Podlesniy, A. Y. Zaichenko, E. Salgansky, and M. Salganskaya, “Regularities of filtration combustion of bidisperse fuel mixtures in an inclined rotary reactor,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, pp. 183–187, 2018.
- [4] M. Toledo, A. Arriagada, N. Ripoll, E. A. Salgansky, and M. A. Mujeebu, “Hydrogen and syngas production by hybrid filtration combustion: Progress and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 177, p. 113213, 2023.
- [5] H. Dai and H. Dai, “Green hydrogen production based on the co-combustion of wood biomass and porous media,” *Applied Energy*, vol. 324, p. 119779, 2022.
- [6] C. Franco, F. Pinto, I. Gulyurtlu, and I. Cabrita, “The study of reactions influencing the biomass steam gasification process,” *Fuel*, vol. 82, no. 7, pp. 835–842, 2003.
- [7] X. Guo, Z. Wang, H. Li, H. Huang, C. Wu, Y. Chen, and B. Li, “A study on combustion characteristics and kinetic model of municipal solid wastes,” *Energy & fuels*, vol. 15, no. 6, pp. 1441–1446, 2001.
- [8] A. Maalouf and A. Mavropoulos, “Re-assessing global municipal solid waste generation,” *Waste Management & Research*, vol. 41, no. 4, pp. 936–947, 2023.
- [9] S. Nanda and F. Berruti, “Municipal solid waste management and landfilling technologies:

- A review,” *Environmental chemistry letters*, vol. 19, no. 2, pp. 1433–1456, 2021.
- [10] A. Shah, V. Srivastava, S. Mohanty, and S. Varjani, “Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 4, p. 105717, 2021.
- [11] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan, and K. Techato, “The evolution of waste-to-energy incineration: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 812–821, 2018.
- [12] S. Bratkovich, J. Howe, J. Bowyer, E. Pepke, M. Frank, and K. Fernholz, “Municipal solid waste (msw) and construction and demolition (c&d) wood waste generation and recovery in the united states,” *Dovetail Partn. Minneap*, vol. 1, pp. 1–16, 2014.
- [13] Secretaría Regional Ministerial de Energía de Valparaíso, “Seremi de energía participa en lanzamiento de proyecto que utilizará la basura para generar energía,” Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, Abril 2019, consultado el [fecha de acceso]. [Online]. Available: <https://energia.gob.cl/noticias/valparaiso/seremi-de-energia-participa-en-lanzamiento-de-proyecto-que-utilizara-la-basura-para-generar-energia>
- [14] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, “Biomass gasification technology: The state of the art overview,” *Journal of energy chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, 2016.
- [15] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press, 2010.
- [16] S. Consonni and F. Viganò, “Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: A comparative evaluation of two commercial technologies,” *Waste Management*, vol. 32, no. 4, pp. 653–666, 2012.
- [17] S. Consonni, L. Lombardi, and F. Viganò, *Municipal Solid Waste to Energy Technology*. Elsevier, 2017.
- [18] Ö. Tezer, N. Karabağ, A. Öngen, C. Ö. Çolpan, and A. Ayol, “Biomass gasification for sustainable energy production: A review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 34, pp. 15 419–15 433, 2022.
- [19] M. Mujeebu, M. Abdullah, M. Bakar, A. Mohamad, R. Muhad, and M. Abdullah, “Combustion in porous media and its applications—a comprehensive survey,” *Journal of environmental management*, vol. 90, no. 8, pp. 2287–2312, 2009.
- [20] M. Aboujafari, M. S. Valipour, A. Hajjalimohammadi, and D. Honnery, “Porous medium

- applications in internal combustion engines: a review,” *Transport in Porous Media*, vol. 141, no. 3, pp. 799–824, 2022.
- [21] F. Vallejo, L. Díaz-Robles, V. Carné-Seco, E. Pino-Cortés, A. Espinoza-Pérez, and L. Espinoza-Pérez, “Hybrid porous media gasification of urban solid waste pre-treated by hydrothermal carbonization,” *PloS one*, vol. 18, no. 9, p. e0291838, 2023.
- [22] U. H. Kun and E. Ksepko, “Advancing municipal solid waste management through gasification technology,” *Processes*, vol. 13, no. 7, p. 2000, 2025.
- [23] L. J. Shadle, N. Indrawan, R. W. Breault, and J. Bennett, “Gasification technology,” in *Handbook of climate change mitigation and adaptation*. Springer, 2025, pp. 793–882.
- [24] N. Ungureanu, N.-V. Vlăduț, S.- Biriș, M. Ionescu, and N.-E. Gheorghită, “Municipal solid waste gasification: technologies, process parameters, and sustainable valorization of by-products in a circular economy,” *Sustainability*, vol. 17, no. 15, p. 6704, 2025.
- [25] F. Trejo, “Review of biomass gasification technologies with a particular focus on a down-draft gasifier,” *Processes*, vol. 13, no. 9, p. 2717, 2025.
- [26] N. Sanke, R. Ravi Kumar, M. A. Pasha, S. P. Ammineni, and P. Saidulu, “Influence of operational parameters on downdraft gasifier performance using municipal solid waste (msw)-biomass blends,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 47, no. 2, p. 2515247, 2025.
- [27] N. Amin, Z. Khan, H. Almohamadi, and M. Shahbaz, “Sorption-enhanced gasification of municipal solid waste in an updraft gasifier utilizing limestone for dual activity as a catalyst and co adsorbent,” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 19, no. 6, pp. 1566–1581, 2025.
- [28] M. Guo, Y. Guo, L. Gu, J. He, and Z. Yang, “A comparative study of waste paper and plastic steam gasification to hydrogen-rich syngas,” *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1–15, 2025.
- [29] M. Zeeshan, R. R. Pande, and P. V. Bhale, “Investigation on gasification of waste textile using advanced thermodynamic equilibrium model to address textile waste pollution,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 659–674, 2025.
- [30] M. Orihuela, L. Espinoza, N. Ripoll, R. Chacartegui, and M. Toledo, “Natural gas-supported gasification of polyethylene and wood mixtures in a porous medium reactor,” *Energy Conversion and Management*, vol. 233, p. 113901, 2021.

- [31] V. Thongkhao, S. Sukpancharoen, and B. Prasartkaew, “Efficiency improvement of biomass gasifier using porous media heat recuperator,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 48, p. 103143, 2023.
- [32] A. Kakaee, A. Paykani, and M. Ghajar, “The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of natural gas fueled engines,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 64–78, 2014.
- [33] C. Gracia-Monforte, G. Zapata, Z. Afailal, G. Gea, and J. Arauzo, “Textile waste valorization via gasification: A comparative experimental study of different gasifying agents,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 199, p. 107905, 2025.
- [34] E. Barbuzza, B. G, A. Pozio, M. Santarelli, and S. Tosti, “Gasification of wood biomass with renewable hydrogen for the production of synthetic natural gas,” *Fuel*, vol. 242, pp. 520–531, 2019.
- [35] E. Aydin, O. Yucel, and H. Sadikoglu, “Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 2, pp. 1105–1115, 2018.
- [36] A. Olaleye, K. Adedayo, C. Wu, M. Nahil, M. Wang, and P. Williams, “Experimental study, dynamic modelling, validation and analysis of hydrogen production from biomass pyrolysis/gasification of biomass in a two-stage fixed bed reaction system,” *Fuel*, vol. 137, pp. 364–374, 2014.
- [37] P. Sheth and B. Babu, “Production of hydrogen energy through biomass (waste wood) gasification,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 19, pp. 10 803–10 810, 2010.
- [38] J. Hu, Z. Jia, S. Zhao, W. Wang, Q. Zhang, R. Liu, and Z. Huang, “Activated char supported fe-ni catalyst for syngas production from catalytic gasification of pine wood,” *Bioresource Technology*, vol. 340, p. 125600, 2021.
- [39] A. Midilli, H. Kucuk, M. Haciosmanoglu, U. Akbulut, and I. Dincer, “A review on converting plastic wastes into clean hydrogen via gasification for better sustainability,” *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 4, pp. 4001–4032, 2022.
- [40] S. Guo, M. Gu, Y. Luo, J. Chen, and H. Yao, “Enhanced gasification of waste plastics for hydrogen production: experiment and simulation,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 120, p. 102114, 2025.

- [41] B. Bai, Y. Liu, Q. Wang, J. Zou, H. Zhang, H. Jin, and X. Li, “Experimental investigation on gasification characteristics of plastic wastes in supercritical water,” *Renewable Energy*, vol. 135, pp. 32–40, 2019.
- [42] M. Bashir, T. Ji, J. Weidman, Y. Soong, M. Gray, F. Shi, and P. Wang, “Plastic waste gasification for low-carbon hydrogen production: A comprehensive review,” *Energy Advances*, vol. 4, no. 3, 2025.
- [43] M. Guo, Y. Guo, L. Gu, J. He, and Z. Yang, “A comparative study of waste paper and plastic steam gasification to hydrogen-rich syngas,” *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1–15, 2025.
- [44] P. García-Bacaicoa, J. Mastral, J. Ceamanos, C. Berrueco, and S. Serrano, “Gasification of biomass/high density polyethylene mixtures in a downdraft gasifier,” *Bioresource technology*, vol. 99, no. 13, pp. 5485–5491, 2008.
- [45] I. Ahmed and A. Gupta, “Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper,” *Applied energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1813–1821, 2009.
- [46] C. Gracia-Monforte, G. Zapata, Z. Afailal, G. Gea, and J. Arauzo, “Textile waste valorization via gasification: A comparative experimental study of different gasifying agents,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 199, p. 107905, 2025.
- [47] B. I. für Bioenergie GmbH, “Inspection report for a1 wood pellets,” Avedikstrasse 21, 1150 Wien, Austria, ENplus® A1 Pellet Certificate BEA2022255, 2022.
- [48] ASTM International, “Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter,” ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep. D240-00, 2000.
- [49] —, “Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels,” ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep. E871-82, 2014.
- [50] M. Fierro, P. Requena, E. Salgansky, and M. Toledo, “Experimental investigation of reverse flow porous medium reactor with premixed and non-premixed flames,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 425, p. 130178, 2021.
- [51] N. Carmona, M. Fierro, V. Bubnovich, and M. Toledo, “Investigation of fire rate in a porous media reactor with hollow spheres as packed bed,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 270, p. 126252, 2025.
- [52] N. Ripoll and M. Toledo, “Hydrogen and syngas production from methane-acetylene rich

- combustion in inert porous media burner,” *Results in Engineering*, vol. 12, p. 100287, 2021.
- [53] L. Wang, W. Zhou, Z. Jia, Y. Lu, E. Salgansky, T. Chen, and K. Chen, “Flame inclination instability under lateral fuel mass fraction differences: An experimental study in anthracite/alumina hybrid filtration combustion,” *Fuel*, vol. 409, p. 137689, 2026.
- [54] V. Jovicic, N. Fedorova, A. Zbogar-Rasic, D. Nloka, and A. Delgado, “Combustion of solid fuel in a hybrid porous reactor,” *Energy Procedia*, vol. 120, pp. 431–438, 2017.
- [55] Z. Hameed, Z. Khan, N. Amin, H. Almohamadi, and S. Naqvi, “Experimental investigation of co-gasification of agricultural and municipal solid wastes for syngas generation,” *Journal of the Energy Institute*, p. 102293, 2025.
- [56] V. Babkin, A. Korzhavin, and V. Bunev, “Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media,” *Combustion and Flame*, vol. 87, no. 2, pp. 182–190, 1991.
- [57] M. Toledo, F. Gracia, S. Caro, J. Gómez, and V. Jovicic, “Hydrocarbons conversion to syngas in inert porous media combustion,” *international journal of hydrogen energy*, vol. 41, no. 14, pp. 5857–5864, 2016.
- [58] J. Li, K. Burra, Z. Wang, X. Liu, and A. K. Gupta, “Co-gasification of high-density polyethylene and pretreated pine wood,” *Applied Energy*, vol. 285, p. 116472, 2021.