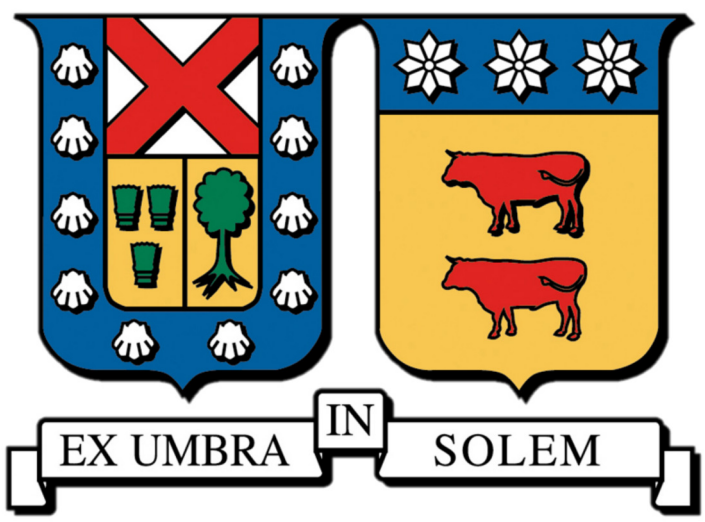
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



"INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS EMISIONES GASEOSAS Y MATERIAL PARTICULADO DESDE UN REACTOR DE FLUJO RECÍPROCO"

FELIPE ALEXANDER KERRIGAN PUIG

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA:
DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES

PROFESOR CORREFERENTE:
DR. FABIAN GUERRERO

VALPARAÍSO, CHILE
18 de abril de 2023

Dedicatoria

A mis padres, George Kerrigan Richard y Marcela Puig Morales.
A mis hermanos Nicolás, Constanza y William,
que son parte de la persona que hoy en día me he convertido.

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mi profesor guía Dr. Mario Toledo, por confiar en mis capacidades e incorporarme como alumno de trabajo de título, abrirme las puertas del departamento de Ingeniería Mecánica para trabajar en un proyecto FONDECYT y poder finalizar mis estudios de postgrado de la mejor manera posible.

Agradecer a los profesores del laboratorio de termofluidos; José Duque y Daniel Gallegguillos, que apoyaron la realización de las actividades con toda su experiencia y mejores intenciones. Al equipo FONDECYT; Dr.Fabián Guerrero y Lorena Espinoza , que en cada momento se encontraron dispuestos a colaborar y resolver los desafíos que se presentaron a lo largo del desarrollo de este trabajo. A mi compañero de trabajo de título José Márquez, quien sin su apoyo y colaboración hubiese sido casi imposible haber logrado los objetivos propuestos en un inicio.

Quiero agradecer a un gran amigo que me ha entregado mi universidad y carrera, David Correa, quien siempre se ha encontrado apoyándome y motivándome a perseguir mis objetivos sin importar las dificultades que se presentan en la vida. No me cabe duda que seremos grandes colegas en un futuro.

Quiero agradecer a mi pareja, Loreto Montes de Oca, quien con todo su amor y comprensión me ayudó a cursar estos últimos pasos en mis estudios de pre grado. Compartiendo frustraciones y alegrías haciendo que el desarrollo de este trabajo llegase a buen puerto.

Finalmente quiero agradecer a la comunidad de profesores y apoyo docente del departamento de Ingeniería Mecánica, que sin dudas han dejado un sello en mi corazón que llevaré por siempre.

"INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS EMISIONES GASEOSAS Y MATERIAL PARTICULADO DESDE UN REACTOR DE FLUJO RECÍPROCO"

En el marco del proyecto FONDECYT Nº 1190654, se encuentra en desarrollo la investigación sobre la producción de hidrógeno y gas de síntesis mediante el reformado de combustibles gaseosos y sólidos en un reactor de medio poroso de flujo recíproco. En este contexto, el objetivo general de este trabajo es evaluar las emisiones gaseosas y de material particulado atmosférico en tiempo real, en base a las diferentes condiciones de operación del reactor. Se utilizó un reactor de medio poroso inerte para la realización de los ensayos de línea base donde se caracterizó el funcionamiento del reactor en las condiciones deseadas. Para lograr la modalidad recíproca se realizó un cambio en la cámara de combustión permitiendo que el frente de combustión viaje en los dos sentidos sin perder su estabilidad. En cuanto a las operaciones con combustible sólido fue necesario crear una cámara interior que permitiera la carga del sólido.

Para la medición de las emisiones gaseosas se utilizó un sistema de extraccíon de muestras incorporado directamente al reactor, posteriormente el análisis de las muestras se realiza en un cromatógrafo gaseoso el cual permite saber la concentración de H_2, CO, CO_2 y CH_4 para mezclas ricas, en el caso de las muestras pobres se analizaron las concentraciones de O_2, CO y CO_2. Estas mediciones se realizaron tanto para la operación de línea base del reactor como para los ensayos con combustibles sólidos. En cuanto a la medición de material particulado, dado la disponibilidad del equipo, se lograron realizar mediciones con respecto a las condiciones atmosféricas del lugar de trabajo y la emisión desde el reactor del material particulado, inyectando solamente flujo de aire.

El reactor de medio poroso inerte fue operado con velocidades de filtración de 35, 40 y 45 [cm/s], y con dos grupos de relaciones de equivalencia; muy pobre y muy rica. Para la caracterización de línea base, las mezclas pobres utilizadas fueron a un ϕ de 0.15, 0.20 y 0.25, mientras que para las mezclas ricas se utilizaron ϕ de 2, 2.5 y 3. Se logró una máxima producción de H_2, alcanzando sobre un 16 %, a una velocidad de filtración de 40 [cm/s] y a una relación de equivalencia de 2.5. La operación con vapor en línea base se realiza con una velocidad de filtración de 40 [cm/s] y para una relación de equivalencia muy rica ϕ=2.5, variando la relación volumétrica entre vapor/combustible (desde la relación 0.5:1 hasta 2:1 respectivamente). No se apreció un aumento en la producción de H_2 con la adición de vapor.

En cuanto a los ensayos con combustibles sólidos se definió una velocidad de filtración de 40 [cm/s] y ϕ=2.5[-] como condiciones operacionales, incorporando 3 diferentes tamaños para cada combustible. La máxima producción de H_2 se logró con la biomasa en su tamaño medio (#2) alcanzando un 20 %, mientras que con el carbón se logro una producción máxima cercana al 13 % en su tamaño medio. Los ensayos con vapor utilizaron un flujo de vapor constante de 4.2[g/min] y no se observó un aumento en la producción de H_2 para ningún tamaño.

Palábras claves: Medio poroso inerte, flujo recíproco, combustión híbrida, gasificación,

gas de síntesis.

Abstract

Within the framework of the FONDECYT Nº 1190654 project, research is being carried out on production of hydrogen and synthesis gas by reforming gaseous and solid fuels in a reciprocal flow porous medium reactor. In this context, the general objective of this work is to evaluate gaseous emissions and atmospheric particulate matter in real time, based on the different operating conditions of the reactor. An inert porous medium reactor was purchased to carry out the baseline tests where the operation of the reactor under the desired conditions was characterized. To achieve the reciprocal modality, a change was made in the combustion chamber allowing the combustion front to travel in both directions without losing its stability. Regarding the operations with solid fuels, it was necessary to create an interior chamber that allowed the loading of the solid.

For measurement of gaseous emissions, a sample extraction system incorporated directly into the reactor was used. Subsequently, the analysis of the samples is carried out in a gas chromatograph, which allows knowing the concentration of H_2, CO, CO_2 and CH_4 for rich mixtures, in the case of lean samples the concentrations of O_2, CO and CO_2 were analyzed. These measurements were made both for the baseline operation of the reactor and for the tests with solid fuels. Regarding the measurement of particulate matter, given the availability of the equipment, measurements to the atmospheric conditions of the workplace were made. The emission of particulate matter from the reactor was meassured only for air inyection.

The inert porous medium reactor was operated with filtration speeds of 35, 40 and 45 [cm/s], and with two groups of equivalence ratios; very poor and very rich. For the baseline characterization, the lean mixtures used were at ϕ of 0.15, 0.20 and 0.25, while for the rich mixtures ϕ of 2, 2.5 and 3 were used. A maximum production of H_2, reaching about 16 %, at a filtration speed of 40 [cm/s] and an equivalence ratio of 2.5. The operation with steam in the baseline is carried out with a filtration velocity of 40 [cm/s] and for a very rich equivalence ratio ϕ=2.5, varying the volumetric ratio between steam/fuel (from the ratio 0.5: 1 to 2:1 respectively). No increase in H2 production was noted with the addition of steam.

Regarding the tests with solid fuels, a filtration velocity of 40 [cm/s] and ϕ=2.5[-] were defined as operational conditions, incorporating 3 different sizes for each fuel. The maximum production of H_2 was achieved with biomass in its medium size (#2) reaching 20 %, while with coal a maximum production close to 13 % was achieved in its average size. The steam tests used a constant steam flow of 4.2 [g/min] and no increase in production of H_2 was observed for any size.

Key wpords: Inert porous medium, reciprocal flow, hibrid combustion, gasification, synthesis gas.

Glosario de términos

Abreviaturas

MPI	Medio poroso inerte
MP	Material particulado
HPP	Hydrogen production path
IAQ	Indoor air quality
HFC	Hybrid filtration combustion

Letras griegas

ϕ	Relación de equivalencia	[-]
λ	Exceso de aire	[-]
ϵ	Porosidad del material	[-]
ρ	Densidad	$[kg/m^3]$
λ_{ef}	Conductividad térmica efectiva del medio poroso	$[W/mK]$

Fórmulas químicas

CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
H_2	Hidrógeno
CH_4	Metano
N_2	Nitrógeno
O_2	Oxígeno
H_2O	Agua
Al_2O_3	Alúmina
SiC	Carburo de silicio
NO_x	Óxidos de nitrógeno

Lista de símbolos

H_i	Entalpía molar en el i-ésimo componente	$[kJ/kg]$
Q	Caudal	$[l/min]$
V^oa, e	Volumen de aire estequiométrico normalizado	$[m^3N]$
u	Velocidad de filtración	$[cm/s]$
v	Volumen específico	$[m^3/kg]$
A	Área	$[m^2]$
$\dot{m}_i$	Flujo másico del elemento i	$[kg/min]$
X_i	Fracción másica del elemento i	[-]
$\dot{V}_{Total}$	Flujo volumétrico total	$[m^3/min]$
C_p	Calor específico	$[J/kgK]$
P	Presión	$[bar]$
T	Temperatura	$[^oC]$
R_{CH4}	Constante del gas metano	$[kJ/kg \cdot K]$
P_e	Número de Peclet	[-]
S_l	Velocidad laminar del flujo	$[m/s]$
d_p	Diámetro equivalente de poro	$[mm]$
V_{fc}	Velocidad del frente de combustión	$[cm/s]$
Y_i	Fracción molar del elemento i	[-]
t_c	Tiempo de ciclo	[s]

Tabla de Contenido

1. Introducción y antecedentes **1**
1.1. Contexto energético regional y mundial: "Utilización de biomasa, carbón e hidrógeno" . . . 1
1.2. Producción de gas de síntesis e hidrógeno mediante gasificación de combustibles sólidos . . . 4
1.2.1. Procesos termoquímicos de gasificación . . . 5
1.2.2. Tecnologías actuales de gasificación . . . 6
1.3. Incorporación del combustible hidrógeno en la industria . . . 8
1.4. Motivación de la investigación . . . 9
1.5. Objetivo general y específicos . . . 9

2. Marco Teórico **11**
2.1. Combustión en medios porosos . . . 11
2.1.1. Parámetros operacionales . . . 13
2.1.2. Teoría de exceso de entalpía . . . 14
2.1.3. Estabilización del frente de combustión . . . 16
2.2. Medio Poroso Inerte . . . 16
2.3. Reactor de medio poroso inerte de flujo recíproco . . . 17
2.3.1. Estado del arte en reactores MPI . . . 19
2.3.2. Combustión híbrida en un reactor de medio poroso . . . 20

3. Diseño y Procedimiento Experimental **22**
3.1. Diseño y operación del reactor de medio poroso inerte . . . 23
3.1.1. Dimensiones . . . 25
3.1.2. Cámara de combustión . . . 26
3.1.3. Aislación . . . 27
3.1.4. Encendido del reactor: . . . 28
3.1.5. Operación en modalidad recíproca . . . 32
3.1.6. Operación con vapor de agua . . . 33
3.1.7. Operación con combustible sólido . . . 34
3.2. Cálculo de flujos para la mezcla . . . 36
3.2.1. Caudal y velocidad de filtración . . . 36
3.3. Sistemas de control y medición . . . 41
3.3.1. Suministro de gas natural . . . 41
3.3.2. Suministro de aire . . . 42
3.3.3. Suministro de vapor de agua . . . 43
3.3.4. Suministro de combustible sólido . . . 45

3.3.5. Medición de temperatura 47
3.4. Sistema de análisis de gases producto y material particulado 49
3.4.1. Toma de muestras de emisiones gaseosas 49
3.4.2. Medición de material particulado 53

4. Presentación y Análisis de Resultados **59**
4.1. Línea base 60
4.1.1. Resultados Ensayos Mezclas Muy Ricas: 61
4.1.2. Resultados Ensayos Mezclas Muy Pobres: 70
4.2. Línea base con vapor 75
4.3. Combustible sólido 80
4.4. Combustible sólido con vapor 86
4.5. Combustible sólido híbrido 90
4.6. Medición de material particulado 91
4.6.1. Analizador de gases TESTO 380 91
4.6.2. Espectrómetro de aerosoles Grimm 91

5. Conclusión y Recomendaciones **96**
5.1. Conslusión sobre resultados 96
5.2. Recomendaciones para trabajos futuros 97

Bibliografía **98**

Anexos **101**
A. Análisis de trabajo seguro y chequeo para operación 101
B. Instalación del reactor en Laboratorio de Termofluidos 102
C. Vistas Modelo 3D 105
D. Proceso de re diseño del reactor MPI 106
D.1. Re diseño para modalidad recíproca 106
D.2. Re diseño cámara para combustible sólido: 112
E. Informes Quimicos Cromatografía Gaseosa 114

Índice de Tablas

1.1. Poderes caloríficos para distintos combustibles. 5
3.1. Piezas del reactor MPI de flujo recíproco. 25
3.2. Especificaciones técnicas reactor. 25
3.3. Especificaciones técnicas material medio poroso. 26
3.4. Definición de válvulas. 32
3.5. Cálculo de flujo de vapor. 33
3.6. Masa estándar para ensayos. 34
3.7. Datos ecuación de velocidad. 36
3.8. Velocidades de filtración 37
3.9. Flujos para una velocidad de filtración u=35[cm/s]. 39
3.10. Flujos para una velocidad de filtración u=40[cm/s]. 40
3.11. Flujos para una velocidad de filtración u=45[cm/s]. 40
3.12. Especificaciones técnicas controlador de flujo de gas natural. 41
3.13. Especificaciones técnicas motor eléctrico. 42
3.14. Especificaciones técnicas estanque compresor. 43
3.15. Especificaciones técnicas controlador de flujo de aire. 43
3.16. Especificaciones técnicas generador de vapor. 45
3.17. Análisis elemental combustibles sólidos. 45
3.18. Poderes caloríficos, densidad y humedad. 46
3.19. Diámtero equivalente promedio. 47
3.20. Adquisidor de datos OMEGA. 48
3.21. Datos técnicos TESTO380. 54
3.22. Datos técnicos espectrómetro de aerosoles GRIMM[33]. 56
4.1. Relaciones de equivalencia y velocidades de filtración. 60
4.2. Resultados Cromatógrafía y cálculo de Yield H_2 y CO. 64
4.3. Temperaturas y velocidades de propagación. 70
4.4. Temperaturas y velocidades de propagación. 74
4.5. Relación de equivalencia, velocidad de filtración y caudal de combustible. . . . 75
4.6. Flujos de vapor utilizado. 75
4.7. Caudal total con la adición de vapor. 76
4.8. Velocidad de filtración u[m/s] con adición de vapor. 76
4.9. Resultados Cromatógrafo y cálculo de Yield de H_2. 77
4.10. Relación de equivalencia y velocidad de filtración. 80
4.11. Granulometría Combustible Sólido. 80
4.12. Relación de equivalencia y velocidad de filtración. 86
4.13. Porcentaje máximo del elemento en cuanto al tipo de ensayo. 88
4.14. Parámetros de operación ensayos Combustible Híbrido. 90

Índice de Ilustraciones

1.1. Fuentes de producción primaria mundial proyección [2]. 1
1.2. Fuentes de producción primaria chile vs mundial [3]. 2
1.3. "Hydrogen Square" cadena de suministro del H_2 [9]. 3
1.4. Mecanismos de producción de H_2 [9] 4
1.5. Procesos termoquímicos de generacion de H_2. 5
1.6. Reactores para gasificación de combustibles sólidos. 7
1.7. Funcionamiento de una celda de combustible. 8
1.8. Central de incorporación de hidrógeno verde a la red de gas natural. 9
2.1. Medio Poroso Inerte. 12
2.2. Quemador medio poroso. 12
2.3. Tipos de mezclas según relación de equivalencia. 13
2.4. Esquema de comparación exceso de entalpía. 15
2.5. Esquema recirculación de calor. 15
2.6. "Medio poroso de Alúmina (izq.) y Carburo de Silicio(der.)". 17
2.7. "Funcionamiento flujo recíproco en un reactor MPI". 18
2.8. "Perfil térmico modalidad recíproca". 18
3.1. Vista frontal reactor MPI de flujo recíproco. 22
3.2. Modelo 3D del reactor MPI de flujo recíproco. 23
3.3. Vista en corte reactor MPI de flujo recíproco. 24
3.4. Vista reactor MPI de flujo recíproco ensamblado. 24
3.5. Vista en corte reactor MPI. 26
3.6. Medio Poroso Inerte. 26
3.7. Aislación del MPI. 27
3.8. MPI aislado e instalado en el reactor. 27
3.9. Termocuplas tipo "S" Reactor MPI. 28
3.10. Instalación Laboratorio Termofluidos. 30
3.11. Esquema instalación Laboratorio de Termofluidos. 31
3.12. Cámara para combustible sólido vista superior. 35
3.13. Controladores de flujo Gas Natural 41
3.14. Motocompresor SCHULZ "elaboración propia" 42
3.15. Controlador de flujo de aire. 43
3.16. Generador de vapor de precisión 44
3.17. Esquema suministro de vapor. 44
3.18. Combustibles Sólidos "elaboración propia" 45
3.19. Tamaño de grano biomasa. 46
3.20. Tamaño de grano carbón. 46
3.21. Esquema de una termocupla tipo "S". 47
3.22. Adquisidor de datos OMEGA. 48

3.23. Esquema instalación de termocuplas. 48
3.24. Bolsa para muestra de emisiones gaseosas. 50
3.25. Sistema de extracción muestras. 50
3.26. Cromatógrafo gaseoso. 52
3.27. Informe químico cromatografía mezcla rica. 52
3.28. Tubo para medición con analizador TESTO 53
3.29. TESTO 380 54
3.30. Instalación Analizador de Gases TESTO. 54
3.31. Espectrómetro Laser Grimm 55
3.32. Instalación espectrómetro de aerosoles GRIMM. 56
3.33. Software para operación espectrómetro GRIMM. 57
3.34. Software para operación espectrómetro GRIMM. 57
3.35. Instalación espectrómetro láser con dilutor y sonda termo estática. 58
4.1. Concentración de Metano. 61
4.2. Concentración de Monóxido de Carbono. 62
4.3. Concentración de Dióxido de Carbono. 62
4.4. Concentración de Hidrógeno. 63
4.5. Yield de H_2. 65
4.6. Yield de CO. 65
4.7. Relación de generación de gases H_2/CO. 66
4.8. Perfil térmico por semi ciclo 66
4.9. Temperatura máxima alcanzada. 67
4.10. Temperatura adiabática del proceso. 68
4.11. Temperaturas experimentales y adiabática del proceso. 68
4.12. Velocidad de propagación del frente de combustión. 69
4.13. Concentración de Oxígeno. 70
4.14. Concentración de Monóxido de Carbono. 71
4.15. Concentración de Dióxido de Carbono. 71
4.16. Perfil térmico por semi ciclo. 72
4.17. Temperatura máxima alcanzada. 72
4.18. Velocidad de propagación del frente de combustión. 73
4.19. Gases producto en relación al vapor añadido. 77
4.20. Yield de H_2 y CO en función de la adición de vapor. 78
4.21. Temperatura máxima y velocidad del frente en relación al vapor añadido. . . 79
4.22. Gases producto Biomasa. 81
4.23. Gases producto Carbón. 81
4.24. Temperatura máxima alcanzada. 82
4.25. Temperatura máxima alcanzada. 83
4.26. Temperatura máxima alcanzada. 83
4.27. Temperaturas máximas y velociddes de propagación. 84
4.28. Porcentaje de masa restante del combustible sólido. 85
4.29. Gases Producto ensayo Biomasa. 86
4.30. Gases producto ensayo Carbón. 87
4.31. Porcentaje de masa restante del combustible sólido. 88
4.32. Temperatura y velocidad de propagacion Biomasa-vapor. 89
4.33. Temperatura y velocidad de propagación Carbón-vapor. 90
4.34. Material particulado condiciones ambientales LTF. 91

4.35. Material particulado emisión solo aire reactor MPI. 92
4.36. Emisión de material particulado operación reactor inerte. 93
4.37. Emisión de material particulado operación reactor híbrido biomasa. 94
4.38. Emisión de material particulado operación reactor híbrido carbón. 95
A.1. Chequeo de actividades para operación segura de actividades. 101
A.2. Chequeo de actividades para operación segura de actividades. 102
B.1. Reactor de medio poroso de flujo recíproco. 103
B.2. Reactor y equipos de trabajo. 103
B.3. Instalación del reactor TMF. 104
B.4. Equipo de trabajo. 104
C.1. Vista Frontal Reactor MPI. 105
C.2. Reactor con válvulas de gases de escape, combustible sólido y toma de muestra. 105
C.3. Reactor MPI Instalado en su plataforma. 106
D.1. Retiro aislante exterior. 107
D.2. Retiro aislante exterior. 107
D.3. Retiro aislante exterior 108
D.4. Extracción del medio poroso. 108
D.5. Medio poroso ordenado para aislación. 109
D.6. Medio poroso aislado. 109
D.7. Instalación del nuevo medio poroso. 110
D.8. Instalación varillas porta termocuplas. 110
D.9. Sellado de varillas. 111
D.10. Reactor finalizado y listo para ensayar. 111
D.11. Medio poroso inerte sin perforación 112
D.12. Herramienta para perforación del medio poroso. 113
D.13. Medio poroso con perforación de cámara para combustible sólido. 113
E.1. Resultados químicos línea base. 114
E.2. Resultados químicos línea base. 115
E.3. Resultados químicos con incorporación de vapor. 116
E.4. Resultados químicos con biomasa. 117
E.5. Resultados químicos con carbón. 118
E.6. Resultados químicos biomasa con vapor. 119
E.7. Resultados químicos carbón con vapor. 120

Capítulo 1

Introducción y antecedentes

1.1. Contexto energético regional y mundial: “Utilización de biomasa, carbón e hidrógeno”

Chile y el mundo se encuentran experimentando la denominada transición energética, un camino que implica adoptar una serie de acciones que permitan avanzar hacia una matríz de energía limpia a través de su descarbonización progresiva y una disminución a futuro del uso directo de combustibles fósiles. La meta de una carbono neutralidad propuesta para 2050, enmarcada en una nueva ley sobre la eficiencia energética enmarcan el rumbo que Chile desea tomar con respecto a su diversificación de la matriz energética [1].

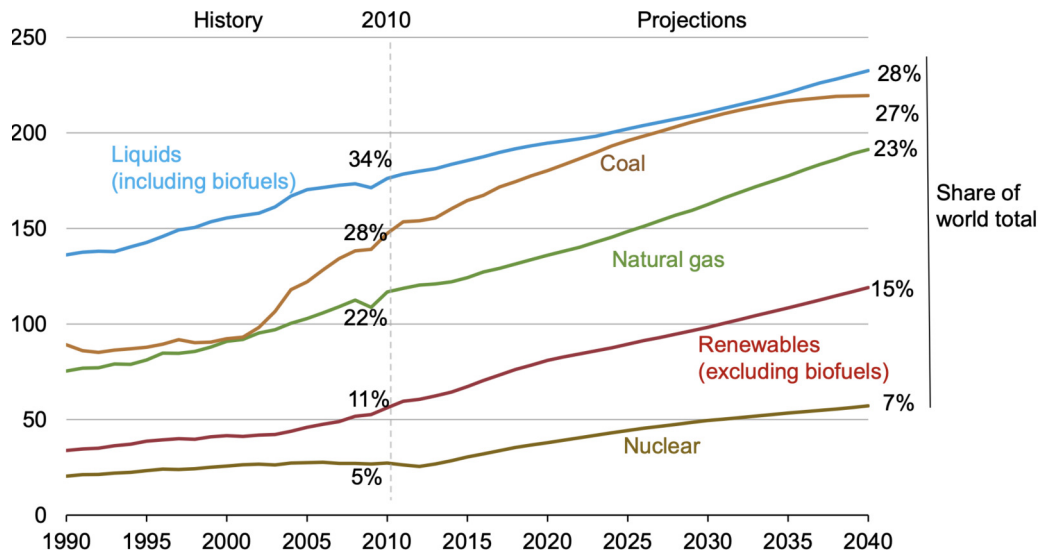


Figura 1.1: Fuentes de producción primaria mundial proyección [2].

Actualmente las principales fuentes de energía primaria son: el petróleo (32.9 %), carbón mineral (24.4 %), leña y biomasa (23.7 %), siendo la última una característica particular de la producción del país. Cabe destacar, que cerca del 95 % del petróleo es importado, siendo la biomasa el principal recurso energético producido localmente[3].

"Investigación experimental de las emisiones gaseosas y material particulado desde un reactor de 1 *flujo recíproco"*

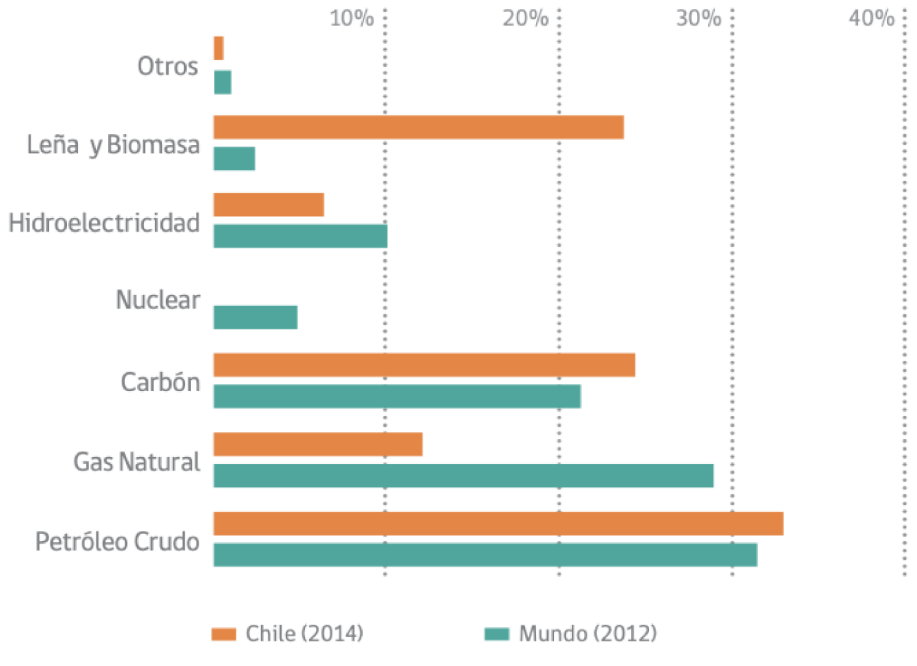


Figura 1.2: Fuentes de producción primaria chile vs mundial [3].

A pesar de que la mayoría del carbón que se utiliza en Chile es producto de importaciones del extranjero, sí se poseen depósitos nacionales disponibles para extracción, pero dada su ubicación muy dispersa no se ha realizado una explotación de dicho recurso. Estos depósitos se encuentran principalmente en las provincias de Concepción, Arauco, Valdivia, Osorno y Magallanes, siendo esta última, la mayor reserva nacional. Solo en la cuenca de Valdivia y Osorno los recursos de carbón pueden alcanzar un billón de toneladas, y a cinco billones de toneladas en la cuenca de Magallanes [4].

En cuanto al recurso biomasa, ésta juega un papel importante en las actividades industriales del país. Actualmente las plantaciones forestales cubren una superficie aproximada de 3,11 millones de hectáreas, equivalentes al 17,27 % del total de bosques de Chile, según la actualización del “Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile”. Aproximadamente el 60 % de esta superficie corresponde a pino radiata, el 33 % a especies del género eucalipto y el resto a otras especies, tales como, átriplex, tamarugo y pino oregón. Las plantaciones se encuentran localizadas principalmente entre las regiones de O’Higgins y Los Lagos [5].

Otra de las grandes ventajas que posee Chile son sus 6000 km de costa como territorio nacional, donde, es posible encontrar diversos tipos y variedades de algas, las que son utilizadas comúnmente como un complemento a preparaciones culinarias tradicionales, o este último tiempo, como combustible. Se han realizado estudios en donde la gasificación de biomasa como el caso de las algas permiten generar nuevos combustibles o bien utilizarlas como fuente energética [6].

El hidrógeno se define como un vector energético gracias a su capacidad de transportar la energía por medio de sus distintas formas, puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica o a su vez ser utilizado como combustibles gracias a su alto poder calorífico. Puede ser utilizado a pequeña escala fuera de la red, o ser exportado para su aprovechamiento de energía química a gran escala. Estos son los grandes beneficios del hidrógeno como vector energético, sin embargo no se encuentra disponible de manera natural en su estado puro, por lo que su producción se ha dado en la industria de la refinería, en donde es extraído por medio de los distintos procesos de refinación del petróleo. Aunque el despliegue del hidrógeno

como vector de energía alternativa se ha discutido durante mucho tiempo, no se ha realizado debido a la falta de tecnologías de conversión y generación de hidrógeno de bajo costo. Para la definición de los aspectos principales a considerar en el nuevo proceso de generación de hidrógeno como combustible se define el denominado “Cuadrado del Hidrógeno”. Se establecen 4 puntos: desde la producción, almacenamiento, seguridad y utilización. Estos puntos permiten un análisis crítico de la cadena de suministro de hidrógeno como vector de energía sustentable [7, 8].

EL camino de producción del hidrógeno y la selección de tecnología específica dependen del tipo de energía y materia prima disponible, así como de la pureza requerida para el uso final. Por lo tanto, las tecnologías de purificación se incluyen en las rutas de producción para la integración del sistema, el almacenamiento de energía, la utilización o la exportación de energía renovable. Las vías de producción de hidrógeno y las tecnologías asociadas se revisan en este documento por su interconexión e interdependencia en las otras esquinas del cuadrado del hidrógeno [9].

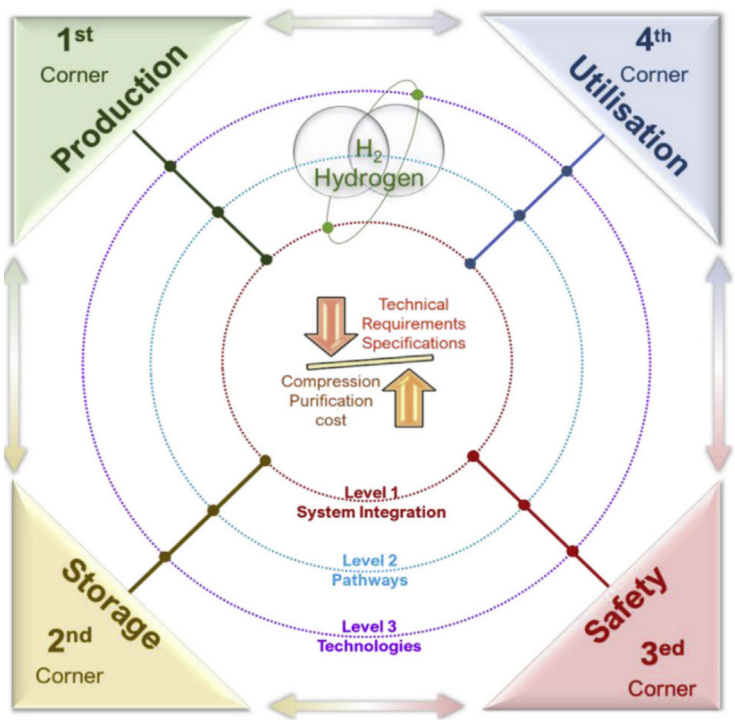


Figura 1.3: “Hydrogen Square” cadena de suministro del H_2 [9].

Los diversos mecanismos de prducción de hidrógeno han sido principal foco de investigación en los últimos años por desempeñar un papel clave en la integración de los sistemas energéticos futuros cómo también en la transición desde la energía basada en combustibles fósiles hacia una matriz basada en energías renovables. Los métodos para producir hidrógeno determinan la limpieza, rentabilidad, y eficacia, por lo tanto, la viabilidad de cualquier “camino de producción” del hidrógeno (“Hydrogen Production Pathway”). La ruta de producción depende de tres elementos principales; el material que contiene hidrógeno (hidrocarburos o no hidrocarburos), fuente de energía y material catalizador. Por lo tanto, la selección de su “HPP” depende del tipo de la materia prima para extraer el hidrógeno, la escala de producción y los recursos energéticos disponibles[9].

Las distintas formas de obtener el hidrógeno se representan en la figura 1.4, los principales mecanismos son la hidrólisis, conversión termoquímica de combustibles fósiles y procesos biológicos.

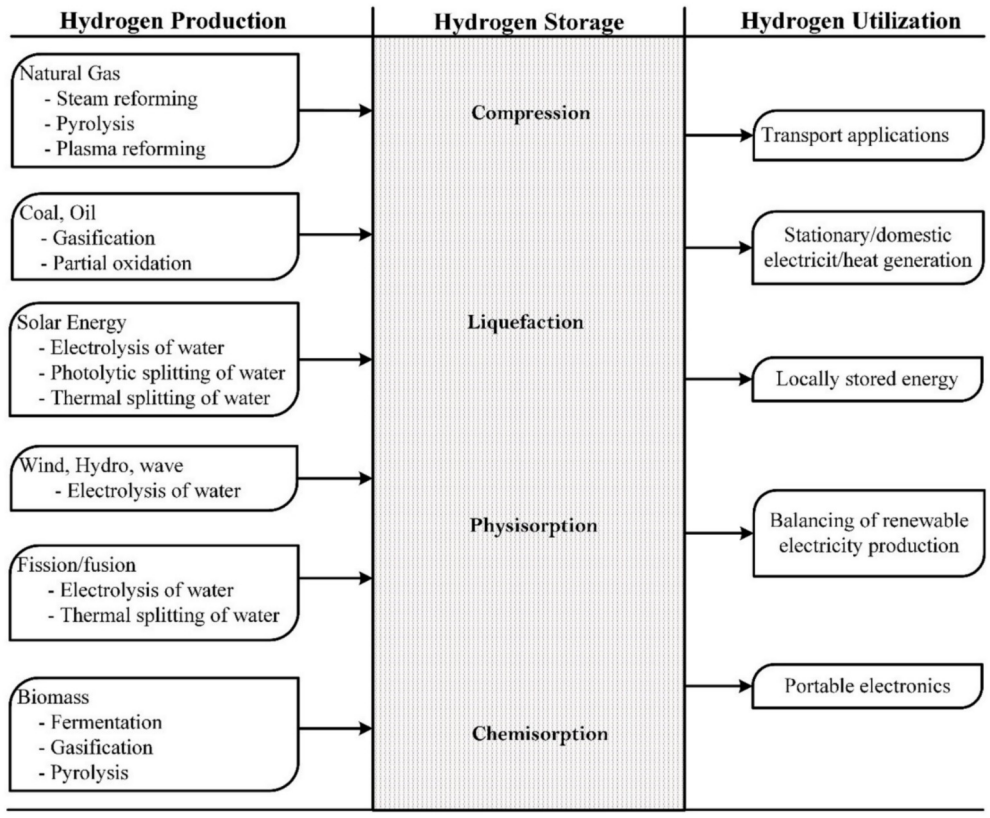


Figura 1.4: Mecanismos de producción de H_2 [9]

Cada mecanismo de producción tiene sus ventajas y desventajas, lo que hace necesario que siempre se haga una evaluación crítica con respecto a la manera en la que se quiere producir hidrógeno y/o gas de síntesis (mezcla de CO e H_2 principalmente).

1.2. Producción de gas de síntesis e hidrógeno mediante gasificación de combustibles sólidos

La producción de hidrógeno es considerada limpia y sustentable gracias a que es el elemento mas abundante en el universo, con mayor contenido energético por unidad de masa, sustentable y a diferencia de los otros combustibles fósiles no emite agentes contaminantes. Puede ser obtenido a partir de energías renovables (solar, hídrica, eólica, etc) y también energías no renovables (gas natural, petróleo, carbón, etc). Los principales métodos de producción utilizados a nivel mundial son[10]:

- Reformado con vapor y carbón
- Reformado con vapor de gas natural
- Reformado con vapor de nafta
- Descomposición de biomasa
- Electrólisis de agua
- División de agua por varios métodos autóctonos

Una de las carcterísticas mas importantes del hidrógeno es su alto poder calorífico en comparación con otros combustibles. En la tabla 1.1 se presenta[11]:

Tabla 1.1: Poderes caloríficos para distintos combustibles.

Combustible	Contenido de energía [MJ/kg]	
	Poder calorífico inferior	Poder calorífico superior
Hidrógeno Gaseoso	119.96	141.88
Hidrógeno Líquido	120.04	141.77
Gas Natural	47.13	52.21
Gas Natural Licuado	48.62	55.19
Petróleo crudo	42.68	45.53
Gas Licuado de Petróleo	46.60	50.14
Diesel	42.78	45.76

1.2.1. Procesos termoquímicos de gasificación

El hidrógeno y el gas de síntesis se pueden producir termoquímicamente a partir de diversas fuentes, como combustibles fósiles, biomasa, agua y desechos sólidos, mediante reformado con vapor, reformado en seco y oxidación parcial. Se ha introducido la combustión de filtración híbrida (HFC) para producir H_2 y gas de síntesis gasificando combustibles sólidos y reformando combustibles gaseosos y sólidos simultáneamente. Hay estudios que demuestran el desarrollo de esta tecnología y sus aplicaciones tanto a nivel investigativo como industrial. Los reactores utilizados para este tipo de procesos se caracterizan por poseer un quemador con una matriz sólida conformada por un medio poroso inerte que incorpora el combustible sólido, llamándose lecho poroso híbrido. La geometría y orientación, la composición del lecho poroso híbrido, el agente gasificante y el modo de operación son parámetros cruciales para optimizar el rendimiento de producción de hidrógeno y gas de síntesis. Las diversas materias primas sólidas utilizadas incluyen carbón, biomasa y polietileno, y los agentes gasificantes mas utilizados son aire, vapor, dióxido de carbono y flujos de aire/combustible premezclados. A escala industrial, los reactores HFC se han implementado con éxito para producir hidrógeno y gas de síntesis a partir de residuos sólidos urbanos[12].

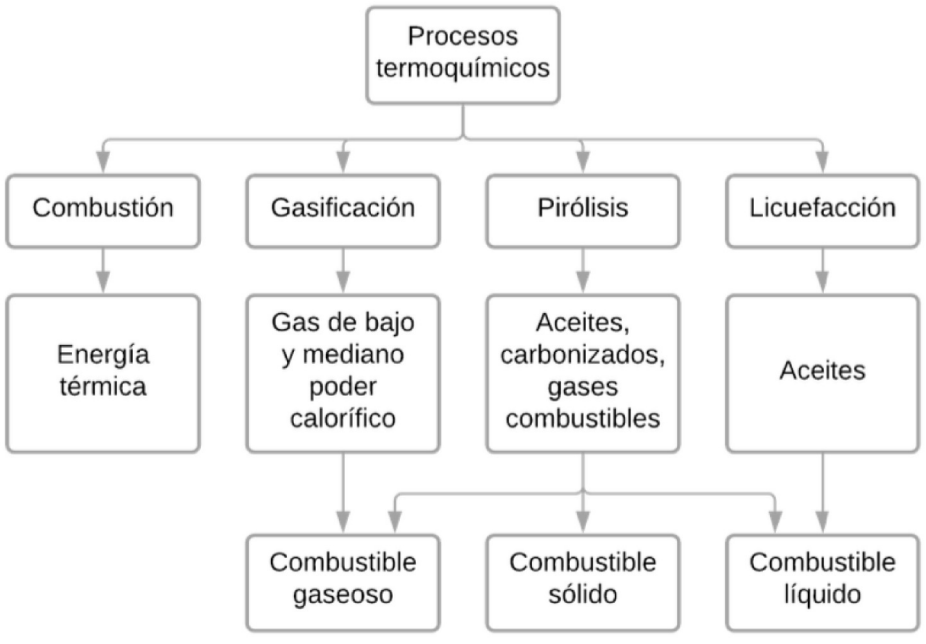


Figura 1.5: Procesos termoquímicos de generacion de H_2.

El proceso de la pirólisis es previo a la gasificación, consistiendo en la degradación térmica de un material producto de un aumento en su temperatura en ausencia de oxígeno. La pirólisis se constituye por una serie de reacciones químicas en conjunto a procesos de transferencia de calor y masa. Este proceso inicia a los 70 [ºC], y en su proceso se forman las siguientes fracciones de productos[13]:

- **Fracción gaseosa:** representa al rededor del 70 %-90 % en peso del material alimentado, y consiste principalmente de hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), hidrocarburos ligeros y trazas de ácidos e inertes.
- **Fracción sólida:** varía entre el 5-25 % en peso del material alimentado. En esta fracción se encuentran materiales inertes contenidos en el combustible sólido en forma de ceniza y un componente de alto contenido en carbono llamado “char”.
- **Fracción líquida:** se denominan alquitranes, oscilan al rededor del 1 al 5 % en peso, constituidos generalmente por sustancias orgánicas complejas, condensables a bajas temperatura.

Se puede representar de manera general:

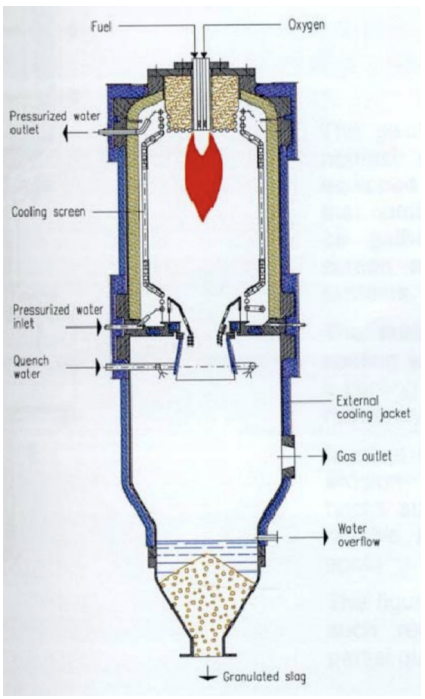
$$Combustible \longleftrightarrow H_2 + CO + CO_2 + CH_4 + H_2O_g + Alquitrán + Char \tag{1.1}$$

La gasificación es un procesos termoquímico, exotérmico y autotérmico que tiene como finalidad transformar una sustancia carbonosa, como biomasa, carbón o desechos, en una fase gaseosa y una fase sólida mediante una serie de reacciones químicas. La fase gaseosa generada llamada gas de síntesis o Syngas, se puede utilizar para la generación de energía o bio combustible. Esta transformación representa una oxidación parcial del carbono presente en el material de alimentación, y generalmente, se lleva a cabo en presencia de un agente gasificante, como aire, oxígeno, vapor u otra mezcla de gases[14].

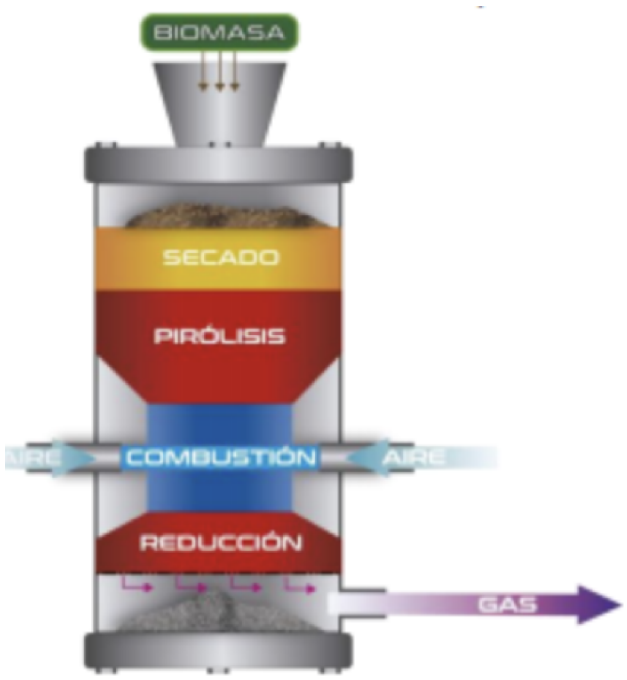
1.2.2. Tecnologías actuales de gasificación

La gasificación de combustibles sólidos se puede realizar en distintos tipos de reactores o gasificadores, el tipo de gasificador condicionará la cinética de reacción, el rendimiento, composición de los productos y la formación de especies no deseadas[15]. Los gasificadores actuales se diferencia principalmente por el modod de contacto entre el combustible a gasificar y el agente gasificante, velocidad de transferencia de calor y tiempo de residencia del material alimentado en el reactor. En base a estas características los principales reactores utilizados son:
Entrained flow reactor: el combustible de alimentación es incorporado como partículas de tamaño entre 0.1 a 1.1 [mm] y en conjunto con el agente gasificante son inyectados a co-corriente. Funcionan a temperaturas de aproximadamente entre 1300 y 1500 [ºC] y a una presón de 25-30 [bar]. En este tipo de reactor se utilizan polvos suspendidos o alimentos secos como materia prima[14]
Reactor de lecho fijo: el tipo de reactor mas sencillo, poseen un lecho de combustible sólido el cual se mieve lentamente hacia abjo por acción de la gravedad mientras gasifica, el gas se

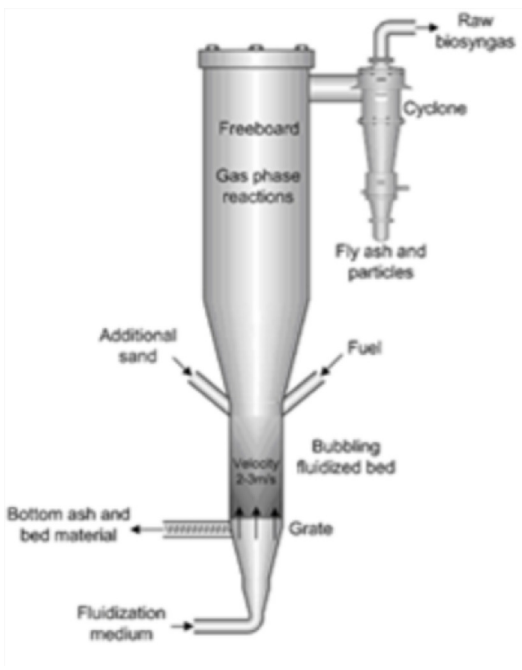
alimenta en sentido contraio a medida que avanza el lecho[15].
Reactor de lecho fluidizado: su funcionamiento se basa en el principio de fluidización, en donde tanto el combustible a gasificar como el material del lecho se comportan como fluido. Este comportamiento se observa cuando el medio de fluidizacion, cuando el aire, vapor, oxígeno y su mezcla atraviesan la porción sólida del reactor.
Horno rotativo: consiste de una cámara cilíndrica ligeramente inclinada que gira lentamente al rededor de su propio eje. El contacto entre el sólido y el gas tiene se da debido a la rotación del cilindro que a medida que gira continuamente, expone las nuevas superficies sólidas al agente gasificante [14].



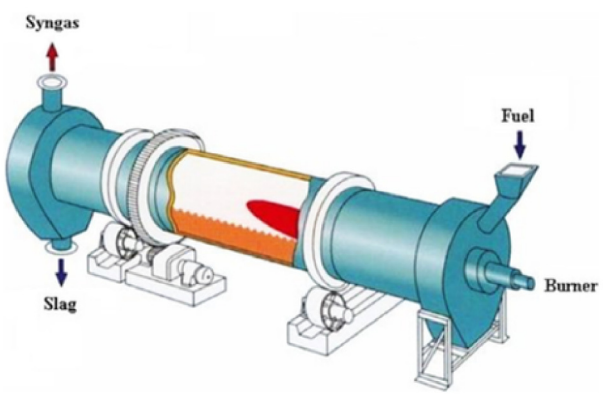
(a) Entrained flow reactor



(b) Reactor de lecho fijo



(c) Reactor de lecho fluidizado



(d) Horno rotativo

Figura 1.6: Reactores para gasificación de combustibles sólidos.

1.3. Incorporación del combustible hidrógeno en la industria

Hoy en día el hidrógeno se utiliza en sus distintos estados físicos dependiendo del lugar de aplicación. En el ámbito del transporte se ha creado la "celda de combustible" para entregar energía eléctrica a los motores de los vehículos eléctricos. La celda de combustible o "fuel cell" es el mecanismo mas utilizado por los vehículos que usan el hidrógeno como fuente de energía[16]. Este sistema utiliza el hidrógeno en su fase gaseosa, y genera energía eléctrica por medio de la oxidación del hidrógeno. Este proceso ocurre gracias a la inyección de oxígeno atmosférico que ingresa a la celda de combustible, generando la reacción química de oxidación, liberando como productos H_2O y electrones. Los electrones liberados en esta reacción son almacenados en baterías para posteriormente ser utilizados en el motor eléctrico. De esta manera el hidrógeno es aprovechado utilizando el oxígeno de la atmósfera y generando como emisión solamente H_2O en estado gaseoso.

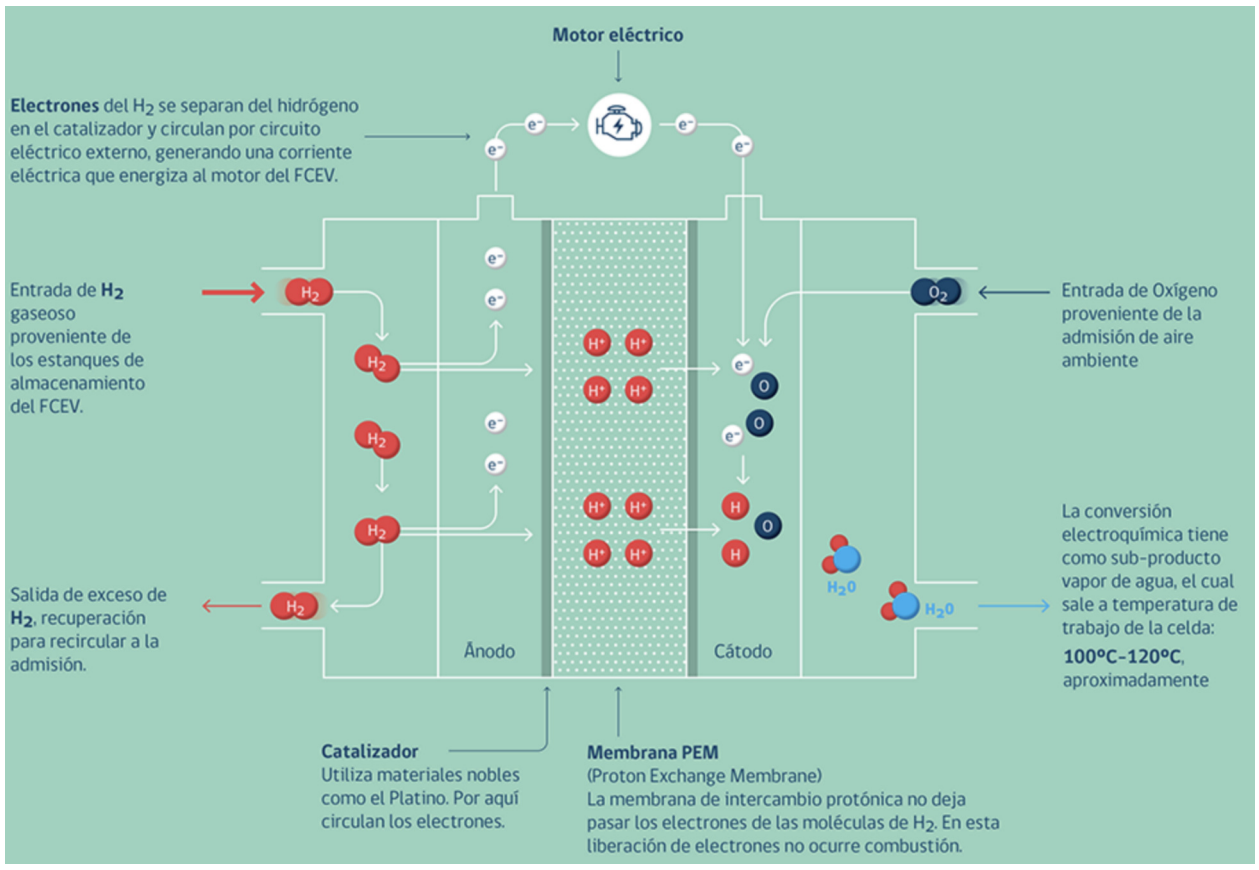


Figura 1.7: Funcionamiento de una celda de combustible.

A nivel industrial, debido a la alta velocidad de reacción y poder calorífico del hidrógeno se ha buscado generar mezclas con amoníaco y gas natural para permitir su uso de manera estable y segura. También pensando en la utilización de las redes de distribución ya instaladas en las ciudades, se ha logrado mezclar de manera exitosa el hidrógeno con gas natural para la utilización doméstica, apoyando la descarbonización de la matriz energética. A la fecha en la ciudad de La Serena y Coquimbo se encuentra implementada la central de hidrógeno verde incorporando a la red de gas natural un 20 % de hidrógeno. Este proyecto cuenta con la colaboración de la Universida de La Serena monitoreando su consumo para comprobar la compatibilidad del hidrógeno verde en las líneas de gas natural, la calidad de la combustión y la reducción en las emisiones[17].



Figura 1.8: Central de incorporación de hidrógeno verde a la red de gas natural.

1.4. Motivación de la investigación

La creciente demanda energética mundial, y la contaminación ambiental producida por los procesos de generación de ésta, fuerzan a la búsqueda de nuevas fuentes y procesos de producción energética [9]. Una de las fuentes energéticas mas utilizadas son los combustibles fósiles, su explotación y utilización tienen directa relación con la excesiva emisión de gases de efecto invernadero. La búsqueda de nuevos combustibles y formas de generación energé-tia que emitan menos contaminantes y posean mejor aprovechamiento energético, estimulan investigaciones y experimentos como el que se desarrolla en este trabajo de título.

Dentro del marco de investigación de nuevos combustibles que no emitan contaminantes, se encuentra el hidrógeno como vector energético, ya que puede ser utilizado de diferentes maneras para generar energía. El hidrógeno no se encuentra de manera natural en nuestro ambiente, puesto que desarrollar nuevas formas de producirlo es muy importante. El fuerte apoyo al desarrollo de estas actividades presenta una oportunidad para aportar con avances teóricos y experimentales que puedan servir para promover la utilización del hidrógeno como combustible en remplazo de los combustibles fósiles[7].

Una forma eficiente de producir energía es por medio de la gasificación de combustibles sólidos produciendo principalmente gas de síntesis, utilizado para producir combustibles gaseosos, productos químicos o produciendo energía eléctrica. No obstante, es sabido que el proceso de gasificación convencional de combustibles genera compuestos volátiles, semi volátiles, desechos orgánicos e inorgánicos y emisión de material particulado, el cual es nocivo para la salud humana.

1.5. Objetivo general y específicos

En el marco del proyecto FONDECYT Nº 1190654, se encuentra en desarrollo la investigación sobre la producción de hidrógeno y gas de síntesis mediante el reformado de combustibles gaseosos y sólidos en un reactor de medio poroso de flujo recíproco. El objetivo general es evaluar las emisiones gaseosas de material particulado en base a la diferentes condiciones de operación del reactor MPI de flujo recíproco.

Los objetivos específicos son:

- Implementar un sistema de medición de emisiones gaseosas (hidrógeno y gas de síntesis) y de material particulado (MP10, MP2.5 Y MP1.0) utilizando un GC-TCD y Espectrómetro de láser de aerosoles en tiempo real para acomplar al reactor de flujo recíproco.

- Desarrollar pruebas experimentales en un reactor de flujo recíproco, variando los parámetros de relación de equivalencia, velocidad de filtración y duración de ciclo.

- Analizar y compara los resutlado obtenidos en cuanto a composición del gas de síntesis producido y de las emisiones de material particulado atmosférico.

- Definir los puntos de operación óptimos y condiciones necesarias para la máxima eficiencia y producción de hidrógeno a partir de combustibles sólidos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Combustión en medios porosos

La combustión filtrada en medio poroso ocurre cuando se instala una matriz sólida inerte, con grandes propiedades de transferencia de calor, en la zona de reacción. Cuando la mezcla de combustible y oxidante pasan a través de esta matriz y reaccionan en su interior generan una recirculación de calor producto del medio poroso, esta recirculación de calor se produce por medio de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Presenta varias ventaja en comparación a la combustión convencional de llama libre. El principio de funcionamiento se basa en que la combustión propiamente tal, ocurre dentro de una matriz sólida con cavidades lo suficientemente grandes como para permitir la combustión. Dichas cavidades representan el medio poroso y es la característica que ofrece las ventajas sobre los quemadores convencionales. Estas ventajas se dan gracias a la recirculación interna de calor que se produce en el medio poroso desde la zona de productos hacia la zona de reactante, aumentando las temperaturas de combustión y del oxidante que ingresa a la zona de reacción. Esta recirculación de calor permite un aumento de las temperaturas del sistema de tal forma que logra mejorar las difusión del combustible, favoreciendo la cinética de reacciones químicas permitiendo su estabilidad en mezclas muy pobres de combustible. Permite estabilizar la combustión en un mayor rango de inflamabilidad.

De esta manera la combustión en medio poroso presenta ventajas sobre los quemadores convencionales, ya que gracias a la recirculación de calor, se alcanzan mayores temperaturas de combustión permitiendo una mayor potencia, disminuyendo las emisiones de contaminantes. En el caso de la operación con mezclas pobres la disminución de NO_x. La operación de estos quemadores puede darse en dos modalidades: estacionario y transiente.

Durante la combustión en un medio poroso inerte se pueden reconocer 3 zonas:

- Zona de pre calentamiento: es la región donde la mezcla aire/combustible aumentan su temperatura y se mezclan gracias a la recirculación de calor.
- Zona de combustión: región donde ocurre la combustión formando el frente de llama, liberando una gran cantidad de entalpía que es absorbida por el medio poroso y que posteriormente es recirculado generando el fenómeno de exceso de entalpía. Este frente

de llama se desarrolla con un ancho determinado, y se puede desplazar por medio de la matriz porosa dependiendo de la relación de equivalencia.

- Zona de gases de combustión: lugar de post combustión hacia donde son liberados los gases que se generan durante las reacciones, estos gases transfieren calor al medio poroso ayudando a la recirculación de calor.

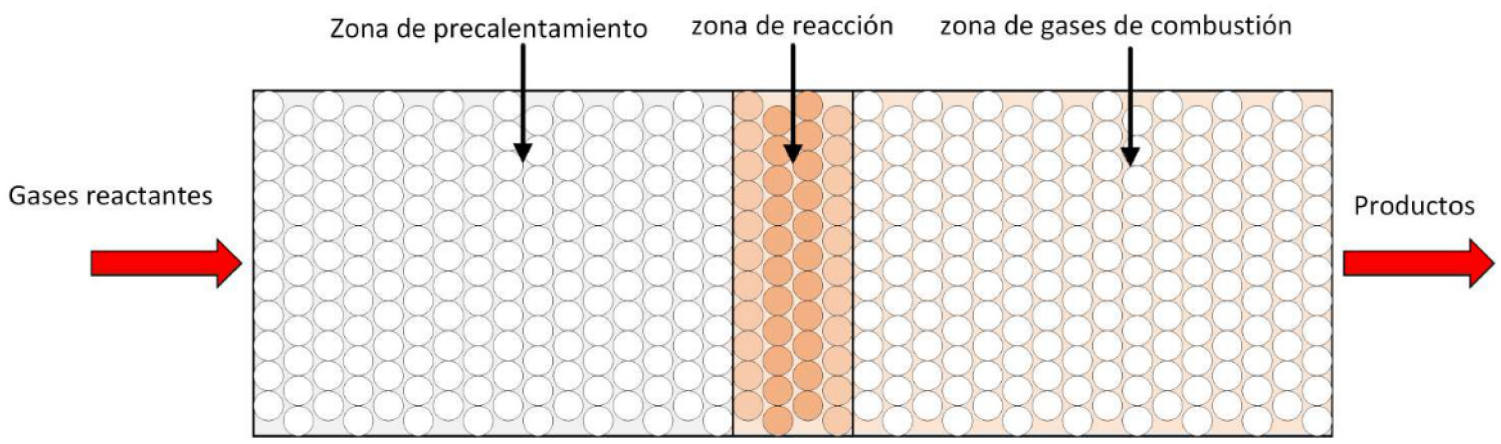


Figura 2.1: Medio Poroso Inerte.

La modalidad estacionaria es utilizada principalmente en estufas y quemadores radiantes, gracias a la gran capacidad radiativa del medio poroso. El frente de combustión queda estabilizado en una zona del quemador que está determinada por la geometría, tamaño y porosidad de la matriz sólida.

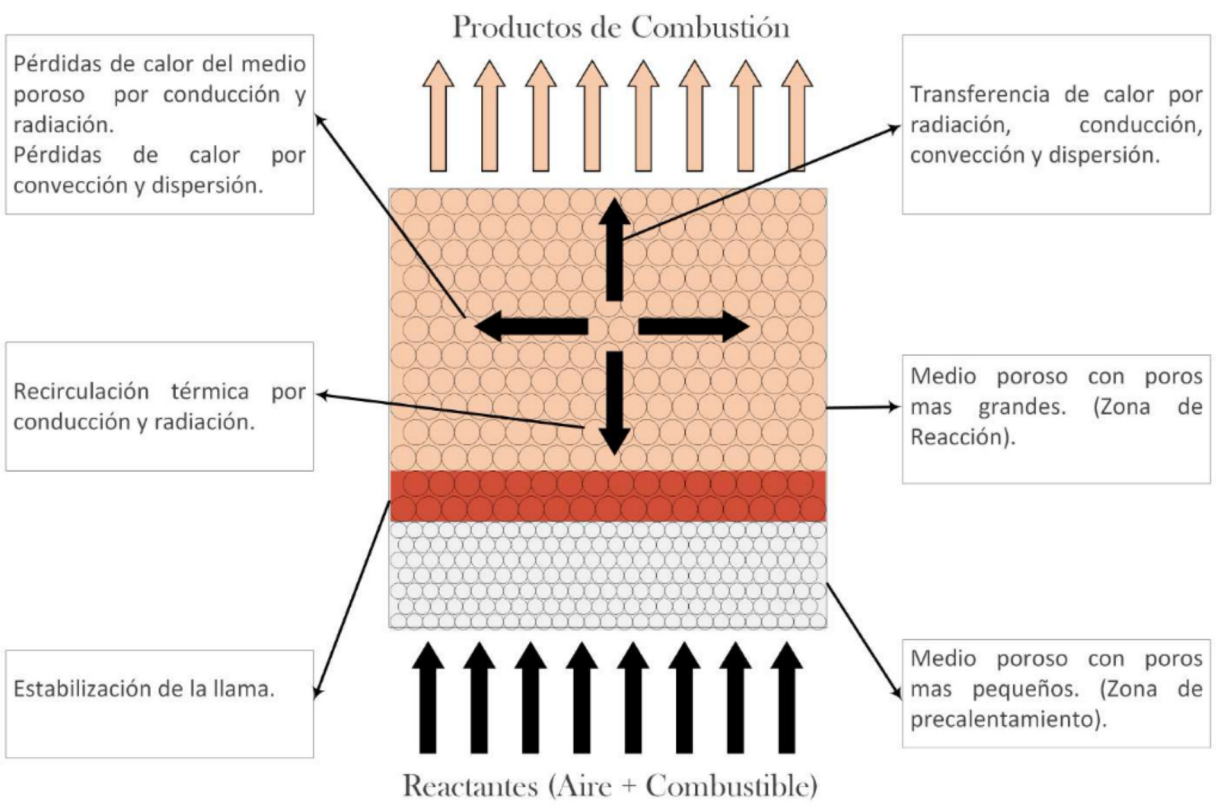


Figura 2.2: Quemador medio poroso.

En cuanto a la operación transiente, ésta se basa en la teoría de exceso de entalpía y se puede efectuar en 3 regímenes distintos, aguas arriba; aguas abajo; y estabilizado.

- Propagación aguas arriba: la dirección de desplazamiento del frente de combustión es contrario al flujo de reactantes, esto debido a que el contenido de combustible en la mezcla se encuentra entre los límites superior e inferior de inflamabilidad.
- Propagación aguas abajo: la dirección del frente de combustión es el mismo que del flujo de reactante. Debido al exceso de entalpía en el sistema el medio poroso eleva su temperatura permitiendo el movimiento del frente de combustión.
- Combustión estabilizada: en este régimen de operación el frente de combustión se encuentra estático en el medio poroso, el poder calórico del combustible de la mezcla se encuentra en uno de los dos límites de inflamabilidad (superior o inferior).

Los regímenes de operación aguas arriba y aguas abajo hacen referencia a la dirección en la cual se mueve el frente de combustión con respecto a la inyección del combustible. En el caso de que sea una modalidad aguas abajo, el frente de combustión se desplazará en el mismo sentido de la inyección del combustible, en tanto la modalidad aguas arriba refiere al movimiento del frente de combustión en dirección contraria al flujo, moviendo el frente de combustión hacia el lugar de inyección.

2.1.1. Parámetros operacionales

Los parámetros que permiten modificar el comportamiento del frente de combustión son los siguientes: relación de equivalencia (ϕ), velocidad de filtración (u), material de la matriz porosa. En cuanto a la relación de equivalencia se habla de mezclas ricas o mezclas pobres dependiendo de su valor.

Relación de equivalencia:

Valor de ϕ	Tipo de mezcla
$\phi = 1$	Estequiométrica
$\phi < 1$	Pobre
$\phi > 1$	Rica

Figura 2.3: Tipos de mezclas según relación de equivalencia.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{V_a}{V_a} \tag{2.1}$$

Relación de equivalencia

Según el valor de ϕ la combustión se puede dar de 3 maneras:

- $\phi = 1$: Combustión estequiométrica. Se produce cuando la relación aire/combustible, estequiométrico y real utilizado son iguales.
- $\phi < 1$: Combustión pobre. Se dice de una combustión pobre cuando la relación de equivalencia es menor a 1, una combustión pobre se da cuando la relación aire/combustible real y teórico es menor a 1, la mezcla presenta menos combustible del estequiométrico.

- $\phi > 1$: Combustión rica. Se habla de una combustión rica en combustible cuando la relación aire combustible es mayor a 1. La mezcla presenta exceso de combustible en relación al estequiométrico.

Velocidad de filtración: La velocidad de filtración es aquella donde la mezla aire/combustible fluye a través de la matriz porosa. Se define como la relación entre la velocidad lineal del fujo y la porosidad de la matriz.

$$u = \frac{v}{\epsilon} \tag{2.2}$$

Velocidad de filtración.

Velocidad del frente de combustión: La distancia por unidad de tiempo que recorre el frente de combustión a través del medio poroso en sentido longitudinal. Esta se calcula a través de la medición del tiempo que demora el frente en desplazarse desde una termocupla hacia otra. Puede variar dependiendo de las condiciones de la combustión.

Características de la matriz porosa inerte: Dependiendo del material del medio poroso, éste tiene variación en sus propiedades termofísicas tales como: conductividad térmica, emisividad, tamaño medio de poro, temperatura de fusión, porosidad.

2.1.2. Teoría de exceso de entalpía

Una de las ventajas de este tipo de quemadores es la gran recirculación de calor que se produce a su inteior, desde la zona de productos hasta la zona de reactantes. De esta manera se produce un aumento en la entalpía gracias al calor recirculado, logrando posteriormente temperaturas super adiabáticas. Estas mayores temperaturas alcanzadas generan una mayor cinética de reacción, emitiendo menor cantidad de material particulado al momento de la combustión que el caso de una combustión de llama libre.

$$\int_{T_0}^{T_f} C_p \, \mathrm{d}T = Q_c + Q_a = H_f - H_0 \tag{2.3}$$

Ecuación de energía generada.

Siendo Q_c la energía liberada por la combustión, Q_a la energía añadida al sistema. A la vez H_f y H_0 las entalpías en dos estados distintos, de esta forma la entalpía total del sistema será mayor a la de combustión, por lo que se le denomina combustión con exceso de entalpía. Este concepto de recirculación de la energía y el alcance de temperaturas "super adiabáticasçomo se le denominan, es lo que permite que sean quemadores compactos, de bajo costo de generación, y generen muy pocas emisiones contaminantes. La combustión de la llama por sobre las condiciones adiabáticas permite que el calor generado pre caliente los compuestos reactantes.

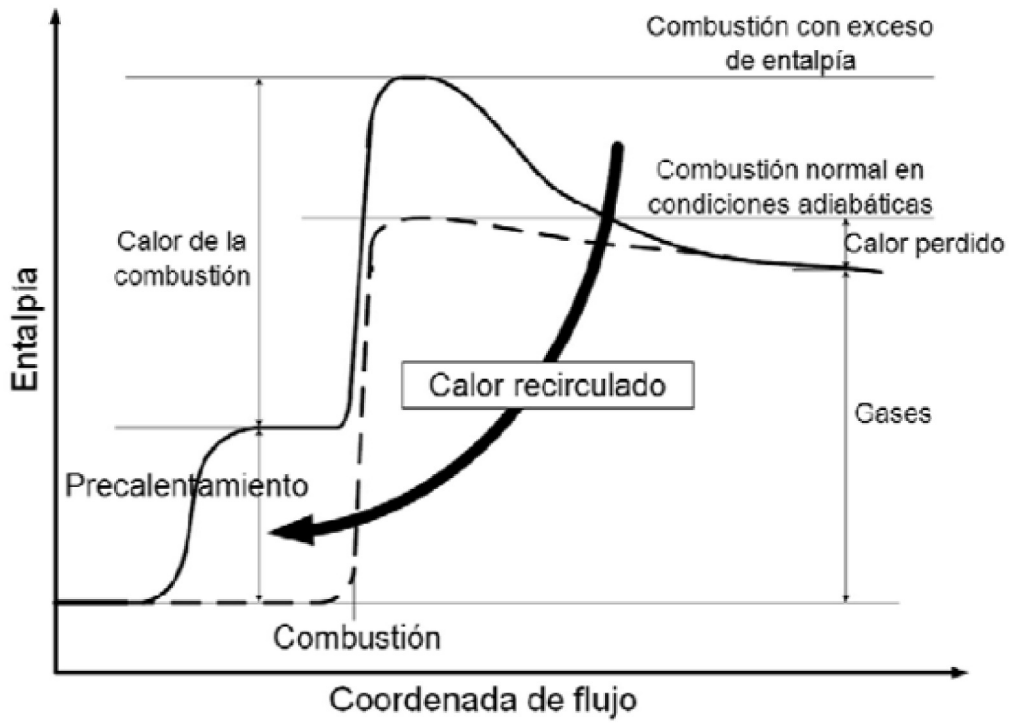


Figura 2.4: Esquema de comparación exceso de entalpía.

Para representar de mejor manera cómo se transfiere el calor por medio de los 3 mecanismos dentro del reactor y cómo se alcanza este exceso de entalpía, se presenta la figura 2.5:

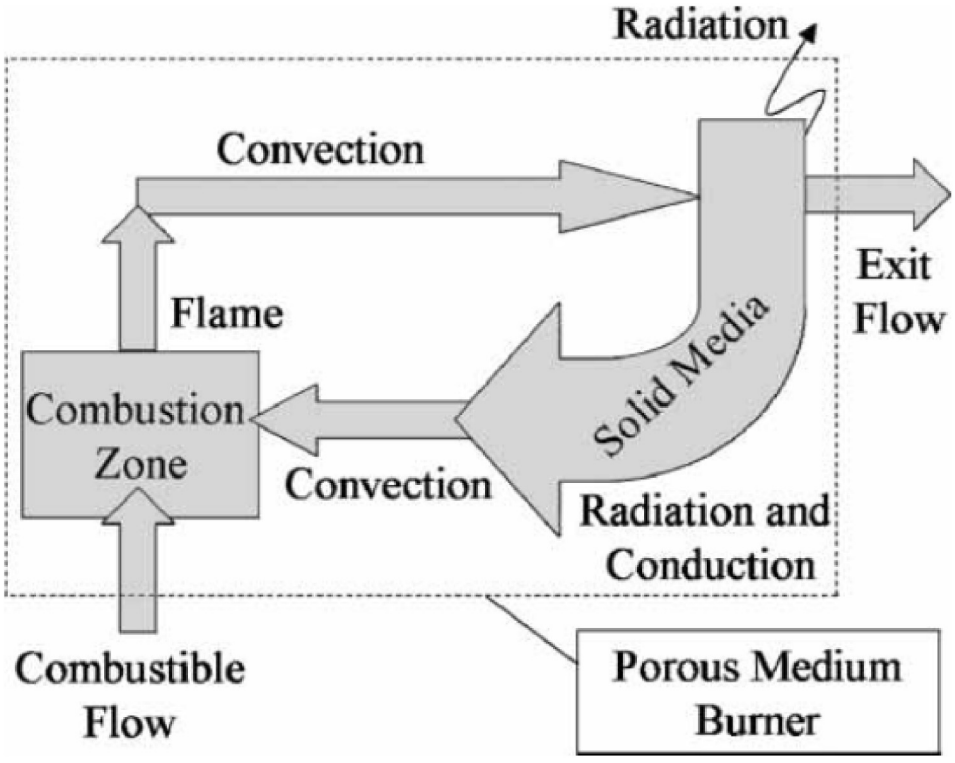


Figura 2.5: Esquema recirculación de calor.

En este esquma se observa la forma en la que la llama, la matriz sólida, y los gases productos transmiten el calor y cómo la configuración en la que se encuentran permiten la circulación de calor desde los productos hacia la zona de reactantes.

2.1.3. Estabilización del frente de combustión

La estabilización de un frente de combustión o llama dentro de un medio poroso está determinada por dos factores principales que son la velocidad de filtración (u_f) y la relación entre el flujo de combustible y de oxidante que se se mezclan para generar la reacción. Otros factores que influyen la estabilización, ya sea en una modalidad estacionaria o transiente, son los apectos físicos tanto del medio poroso y del combustible. Estas propiedades son incluidas en una ecuación modificada que resulta en un número adimensional, el número de Peclet (Pe).

$$Pe = \frac{S_l d_m C_p \rho}{k} \tag{2.4}$$

Número de Peclet.

Donde cada término corresponde a : (S_l) velocidad laminar del flujo, (d_m) diámetro equivalente de poro, (C_p) calor específico del combustible, (ρ) densidad del combustible y (k) conductividad térmica del combustible.

Para la operación en un medio poroso se define un número de Peclet crítico (Pe^*) que define la estabilización estacionaria o un régimen de propagación.

Pe^*=65

- $Pe < Pe^*$ frente de combustión se fija en una zona determinada
- $Pe > Pe^*$ frente de combustión se propaga

2.2. Medio Poroso Inerte

Dentro de los grandes beneficios que otorga los quemadores de medio poroso se encuentra permitir un mayor rango de inflamabilidad en comparación a los quemadores de llama libre, incrementando la cinética de reacción, y disminuyendo considerablemente las emisiones contaminantes. Tanto en el aspecto económico como el tecnonlógico se ha comprobado que los quemadores de MPI tienen las capacidad de aprovechar de mejor manera la energía generada por los compuestos reactantes debido a dos características fundamentales. La primera es su altamente compleja estructura interna que permite la transferencia de calor entre el mismo medio poroso y los reactantes. La dispersión a lo largo de toda la matriz permite una difusión efectiva entre las distintas fases. Esto asegura que el proceso de combustión se estabilice con mayor facilidad, la posibilidad de formación de compouestos como NO_x y CO se minimiza [18].

El quemador de medio poroso inerte se utiliza en combustión para aprovechar sus ventajas térmicas, ya que tienen la capacidad de lograr temperaturas de combustión muy elevadas en la zona donde ocurre la reacción, y a la vez las temperaturas aledañas se mantiene relativamente bajas. Otro factor que estimula el uso de estos quemadores es su capacidad para recircular el calor a través de la misma matriz sólida gracias a las cavidades porosas que lo conforman. Esta recirculación de calor permite un precalentamiento de la mezcla aire/combustible favoreciendo la combustión. Las principales características físicas que determinan el medio

poroso son el material del cual está hecho, porosidad (proporción del volumen que ocupan las cavidades con respecto al total de la matriz sólida), forma geométrica, dimensiones físicas.

Dependiendo del objetivo para el cual se emplea el quemador de medio poroso, se definirá el elemento del medio poroso, las dimensiones requeridas y la porosidad necesaria. Estos factores son los que determinan los rangos de operación del quemador, es decir, trabajar con mezclas muy pobres y muy ricas, en régimen estacionario o transiente. Principalmente para trabajos en reactores de flujo transiente, o para filtración híbrida se utilizan medios porosos de alúmina estabilizada en circonio o de carburo de silicio.
Se presentan ejemplos de los medios porosos mencionados:



Figura 2.6: "Medio poroso de Alúmina (izq.) y Carburo de Silicio(der.)".

2.3. Reactor de medio poroso inerte de flujo recíproco

Este tipo de reactores son utilizados bajo una modalidad transiente, transportando un frente de combustión. Esta operación es definida por la mezcla de combustible/oxidante, y el sentido de propagación del frente. Su estructura se basa en un cilindro de acero en el cual se aloja en su interior el medio poroso inerte, por el cual la mezcla de combustible/oxidante atraviesa mientras se produce la reacción de combustión. En sus extremos posee la entrada y salida de los gases reactantes y productos respectivamente. En la siguiente figura se representa el funcionamiento del reactor en una modalidad transiente aguas arriba.

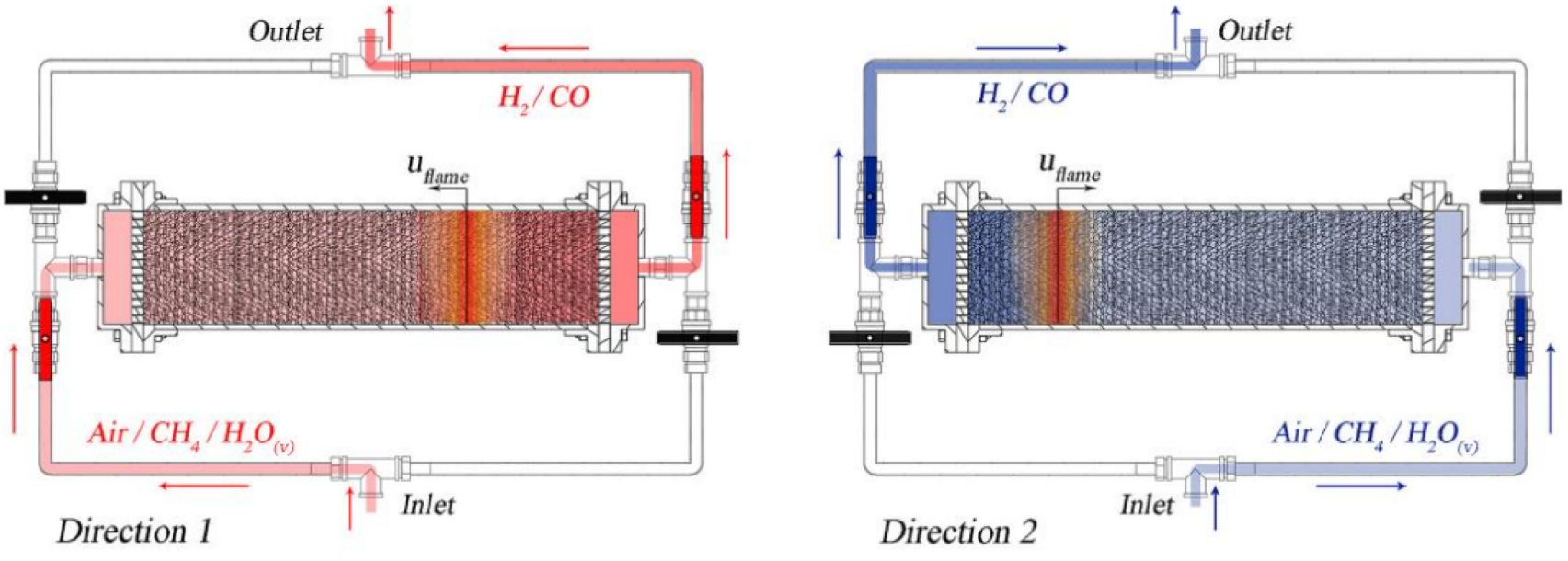


Figura 2.7: "Funcionamiento flujo recíproco en un reactor MPI".

De esta manera, a medida que se cambia el sentido en el que viaja el frente de combustión, recircula el calor generando un aumento en la entalpía del sistema y así obteniendo temperaturas super adiabáticas. En esta configuración el frente puede viajar aguas arriba o aguas abajo. En esta última modalidad el frente viaja en el mismo sentido en el que se inyecta la mezcla, el medio poroso conserva las altas temperaturas alcanzadas por los gases productos y permite que al momento que se produzca la alternancia entre la entrada y salida de la mezcla combustible/oxidante, el frente se encuentre con este calor recirculado en el MPI y su combustión se de en condiciones super adiabáticas.

El modelo de funcionamiento recíproco se basa en la alternancia de la entrada y salida de la mezcla combustible/oxidante por los dos extremos del reactor. El tiempo que demora el frente en viajar desde un lado del reactor hacia el otro, y volver, se le denomina tiempo de ciclo y a medida que se logra ajustar la velocidad del frente de combustión se observa que el perfil térmico describe una forma trapezoidal. Dicha forma trapezoidal en su perfil térmico solamente es posible en reactores de medio poroso.

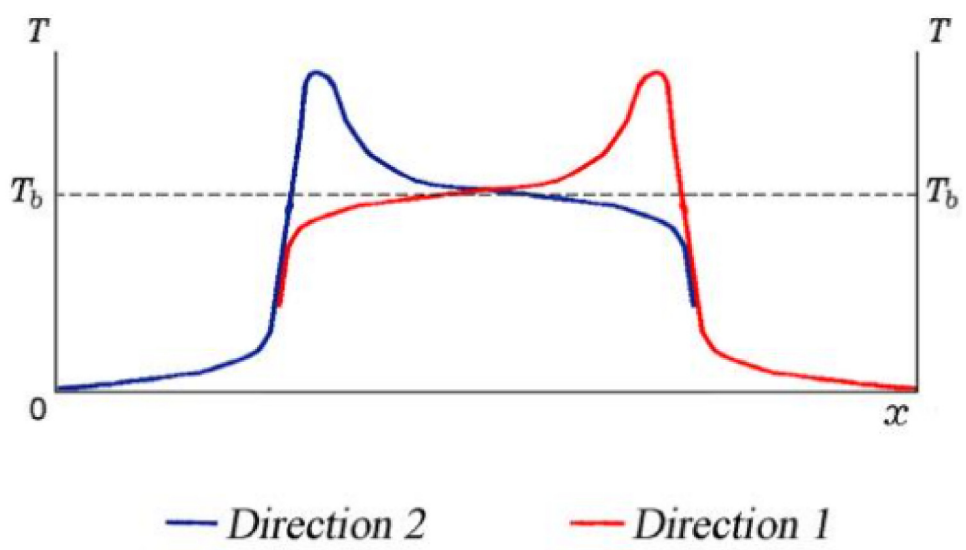


Figura 2.8: "Perfil térmico modalidad recíproca".

2.3.1. Estado del arte en reactores MPI

Se realizó un estudio sobre las investigaciones tanto experimentales como teórico-numéricas en relación a la utilización de estos reactores de medio poroso inerte de flujo recíproco. Los estudios abarcan desde condiciones específicas con respecto a la relación de equivalencia, velocidad de filtración, diámetro equivalente y porosidad del medio poroso, adición de vapor de agua, y los gases producto y la proporción de estos.

En cuanto a los estudios experimentales se puede comentar que para estudios leídos, según Marcus drayton [19] utilizando un reactor de medio poroso de flujo recíproco se puede trabajar en mezclas extremadamente ricas ($4< \Phi <8$) incrementando el límite de inflamabilidad para mezclas de metano/aire, y que la temperatura máxima alcanzada es función de los parámetros operacionales del mismo. Matias Fierro, Pablo Requena realizaron ensayos en un reactor de medio poroso, midiendo perfiles térmicos, velocidad del frente de combustión y también gases producto. Utilizaron relaciones de equivalencia ricas en combustible (Φ=2;3;4) y aire premezclado, no premezclado y no pre mezclado con adición de vapor de agua. En ensayos con Φ=2 obtuvieron las temperaturas mas altas alcanzando los 1301 [ºC], con gases productos en porcentajes de 31 y 68 para H_2 y CO_2 respectivamente [20]. En los casos para metano/aire no premezclado no se obtuvieron resultados favorables en cuanto a la producción de gas de síntesis, comparado con el caso de pre mezcla. En cuanto a la adición de vapor de agua, no se percibieron mayores cambios en cuanto a la producción de gas de síntesis.

Hoffmann y colab[20] estudiaron experimetalmente el comportamiento de un reactor de medio poroso con modalidad recíproca, con el objetivo de analizar los límites de flamabilidad y los parámetros que mas influyen. A la vez analizar los gases contaminantes como los compuestos NO_x y CO, y en que proporción, que se producen al operar el reactor con mezclas extremadamente pobres (Φ=0.026). Los principales parámetros que se busca tengan directa influencia sobre la establidad del frente de combustión son: velocidad del flujo, relación de equivalencia, tiempo de ciclo. Determinaron perfiles térmicos para cada configuración a modo de observar temperaturas máximas, eficiencia de combustión, concentraciones de gases contaminantes. En cuanto al perfil térmico se obtiene un perfil trapezoidal, alcanzando temperaturas cerca de los 1200[K]. Este perfil trapezoidal está marcado por dos máximos en los extremos indicando los cambios en el sentido del frente de combustión, característicos de la modalidad recíproca. En cuanto a la generación de CO concluyeron que a menor velocidad de filtración mayor era la generación, debido a combustión incompleta a pesar que la relación de equivalencia sea pequeña (mezcla muy pobre). En cuanto a los NO_x, en todos los ensayos se mantuvo una generación minima de 1[ppm], solamente alcanzado cuando la temperatura del reactor superaba los 1500[K]. Debido a que las temperaturas alcanzadas no eran tan altas, y la baja relación de equivalencia utilizada no se esperaban altas concentraciones de NO_x.

En tanto para a la revisión de trabajo en base a estudios numéricos se analizó el trabajo realizado por Dobrego en donde se estudia la adición de vapor en la oxidación parcial de la mezcla metano/aire en una modalidad recíproca[21]. Su trabajo muestra que la concentración de Hidrógeno en el gas de síntesis aumenta en un rango de 0.5-1 %, a la vez mencionan un aumento en la tasa de conversión de metano a hidrógeno en un rango de 10-15 % en ensayos con adición de vapor. La concentración de vapor que permiten una máxima generación de hidrógeno se establece en un rango de 5-10 %. En cuanto a relación de equivalencia, se observó

que la misma utilizada en el caso de no adición de vapor maximiza la conversión. Contarin y colab. realizaron estudios numerico-computacionales a un reactor de medio poroso con un intercambiador de calor integrado en su interiorlo que limitaba la zona de reacción[22]. Para la realización de los ensayos utilizaron factores operacionales tal que lograron temperaturas entre 1300-1600[K], utilizando un Φ entre 0.15-0.70 con velocidades de filtración en un rango de 0.15-0.45 [m/s]. La eficiencia del proceso alcanzó un máximo de 80 % con una proporcionalidad directa con la relación de equivalencia. Para todas estas configuraciones en los rangos establecidos se observó la formación de un perfil térmico trapezoidal. Valeri Bubnovich y colab. realizaron un estudio numérico de un reactor de medio poroso de flujo recíproco para definir su zona de estabilización en función de la velocidad de filtración (0.25-1.0 [m/s]) y relaciones de equivalencia en un rango de Φ= [0.1-1] y el diámetro de dos configuraciones diferentes (con y sin intercambiador de calor). Los resultados obtenidos indicaron una mayor región de estabilización para los ensayos con el intercambiador de calor integrado (mayor diámetro de particula), por ende se concluye que aumentar el diámetro genera un aumento en la región estable del reactor, para ambos casos[23].

Para poder comparar las diferencias entre una llama libre y una llama formada dentro de una matriz sólida de medio poroso inerte (zirconio estabilizado parcialmente) Amanda J. Barra realizó ensayos correspondientes, y la forma en la cual el calor recircula en los quemadores de medio poroso (conducción, convección y radiación)[24]. El calor recircula a través de la matriz por medio de conducción aguas abajo del reactor, y también por medio de la radiación que emite el MPI a medida que su temperatura se eleva. La transferencia de calor entre la matriz y el gas se produce por medio de convección, y ésta se produce aguas arriba precalentando los gases reactantes mejorando su cinética de reacción, dicha cinética se analiza en términos de relación entre la velocidad efectiva del frente de combustión y la velocidad laminar. Define la eficiencia de recirculación como el porcentaje de calor que recircula hacia la zona de pre calentamiento en relación al calor total generado. Evaluó distintos parámetros con respecto a las formas de recirculación de calor (conducción y radiación) y velocidad de llama, concluyendo que a mayor relación de equivalencia, disminuye la eficiencia de recirculación.

2.3.2. Combustión híbrida en un reactor de medio poroso

La combustión filtrada híbrida describe un proceso que combina las propiedades de la combustión en medio poroso inerte con la gasificación de un combustible sólido. Esto se logra incorporando combustible sólido en conjunto con un materia inerte, el cual pode ser una matriz sólida o esferas inertes. Se le llama combustión híbrida ya que combina el material poroso inerte y el combustible sólido en una sola zona, en donde se formará el frente de combustión. En este proceso el frente de combustión es estabilizado y opera en un régimen aguas abajo, a medida que avanza sobre el medio poroso híbrido genera la conversión simultánea de combustible sólido y gaseoso en energía y gas de síntesis. Para esto se han realizado estudios numéricos y experimentales para definir los rangos operacionales en los que deben funcionar los reactores para maximizar el proceso.

Mario Toledo, Khriscia S. Utria y col realizaron ensayos experimentales para combustión de mezclas ricas y ultra ricas de metano/aire en un medio poroso híbrido compuesto por esféras de alumina y partículas de carbón. Buscando la convenicencia del uso de estos reactores

en la producción de hidrógeno y gas de síntesis. En primera instancia se operó un reactor de MPI combustionando gas natural, a velocidades de filtración de 12, 15 y 19 [cm/s], relación de equivalencia en un rango de Φ= [1-3.8]. En segunda instancia el reactor de medio poroso híbrido compuesto por esferas de alumina y partículas de carbón de diferentes tamaños, añadiendo cada vez mas carbón hasta llegar a una proporción del volumen ocupado del 75 %, a una relación de equivalencia constante de Φ=2.3 y una velocidad de filtración de 15 [cm/s]. En el caso del medio poroso puro se observa un aumento en la temperatura y la produccion de hidrógeno junto al aumento de la velocidad de filtración, en cuanto al caso del medio poroso hibrido las temperaturas decrecen en cuanto la fraccion de carbón aumenta. Se observa que los gases hidrógeno y monóxido de carbono son los gases productos dominantes en el proceso de oxidacion parcial. Comparando los dos casos, el ensayo con medio poroso híbrido generó considerablemente mas gas de sítesis, logrando un máximo de conversión de hidrógeno de aproximadamente el 55 %[25].

En cuanto a los estudios numérico-computacionales, Mario Toledo y Carlos Rosales realizaron experimentos simulando el movimiento de un frente de combustión a traves de una matriz híbrida compuesta por un medio poroso y biomasa. Se operó en un rango de relaciones de equivalencia de [0.2-1.1] Utilizando un modelo basado en el análisis de aproximacion de temperaturas y química de combustión. Determinaron temperaturas sobre las adiabáticas y se estima que el proceso es altamente sensible hacia la producción de metano. En cuanto a la biomasa utilizada, se evidenció que a menor relación de equivalencia la produccion de hidrógeno es aumentada en cuanto aumente la proporción de biomasa[26].

Para analizar la influencia de la adición de vapor de agua en la producción y conversión de H_2 en la oxidación parcial de metano, Dobrego y Gnezdvilov realizaron ensayos experimentales en conjunto con modelaciones numéricas para establecer mejoras y/o modificaciones en los resultados. Para el ensayo con vapor se realizó un modelo numérico tomando como base el funcionamiento experimental de un reactor de medio poroso que en este caso son esferas de un material cerámico. En cuanto a la relación de equivalencia óptima para operar con vapor de agua se mantiene igual que en el caso de la oxidación parcial sin vapor[27]. El modelo numérico arrojó que la adición proporcionaría un aumento en la produccion de Hidrógeno entre un 0.5 y 1 %. Mientras que en cuanto al grado de conversión de Metano a Hidrógeno aumentaría entre un 10 a un 15 %.

Capítulo 3

Diseño y Procedimiento Experimental

En este trabajo de título se utilizó un solo reactor, siendo operado en dos modalidades. Como reactor puro de medio poroso inerte para establecer una línea base con operación de mezcla gas natural y aire. También fue operado como reactor de medio poroso híbrido, para permitir la incorporación de combustibles sólido y de esta forma analizar la gasificación de dicho combustible. Para la segunda configuración como medio poroso híbrido, fue necesaria una modificación en la forma la cual estaba inicialmente diseñado el reactor para permitir el funcionamiento de la modalidad recíproca. El reactor recibido fue el utilizado en el trabajo de título de Rodrigo Fernandez [28] y fue utilizado durante todo el desarrollo de este trabajo de título.

La utilización de este reactor en las condiciones planteadas busca establecer los parámetros operacionales óptimos para la producción y conversión de hidrógeno, establecer la influencia del vapor de agua en la gasificación de un combustible sólido y en la oxidación parcial de gas metano, analizar gases productos contaminantes como medida de mitigación para la producción de hidrógeno en base a materia carbonosa. Para lograr estos objetivos se utilizó el reactor ya construido realizándole modificaciones de re diseño para lograr las condiciones necesarias. Para el proceso de re diseño revisar ANEXO[D].

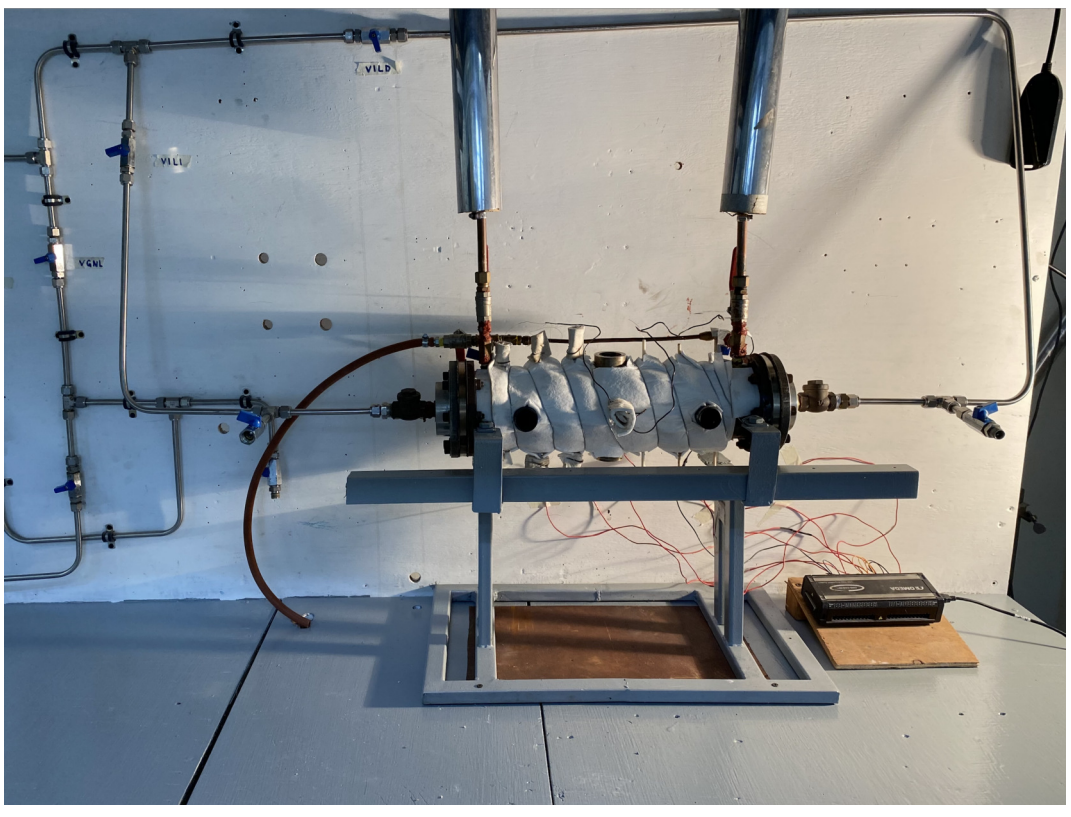


Figura 3.1: Vista frontal reactor MPI de flujo recíproco.

3.1. Diseño y operación del reactor de medio poroso inerte

El reactor se construye en base a una cañería de acero tipo ASTM A-53, con un diámetro exterior de 73[mm], un espesor de 5.16 [mm] y un largo total de 480 [mm](ver propiedades en tabla 3.1). Estas dimensiones hacen que el reactor sea relativamente pequeño, lo que permitirá que el frente de combustión se demore menos en viajar desde un extremo a otro, pudiendo obtener mayor cantidad de resultados en menor tiempo. El reactor se construye incorporando medio poroso inerte en su interior, el cual está conformado por discos de carburo de silicio dispuestos de manera axial para construir una matriz sólida y porosa a lo largo de todo el reactor. Se utiliza un tipo de manto cerámico "Fiberfrax" como aislante térmico, tanto para asilar el medio poroso por dentro, y como recubrimiento exterior para disminuir lo mas posible la pérdida de energía durante la operación.

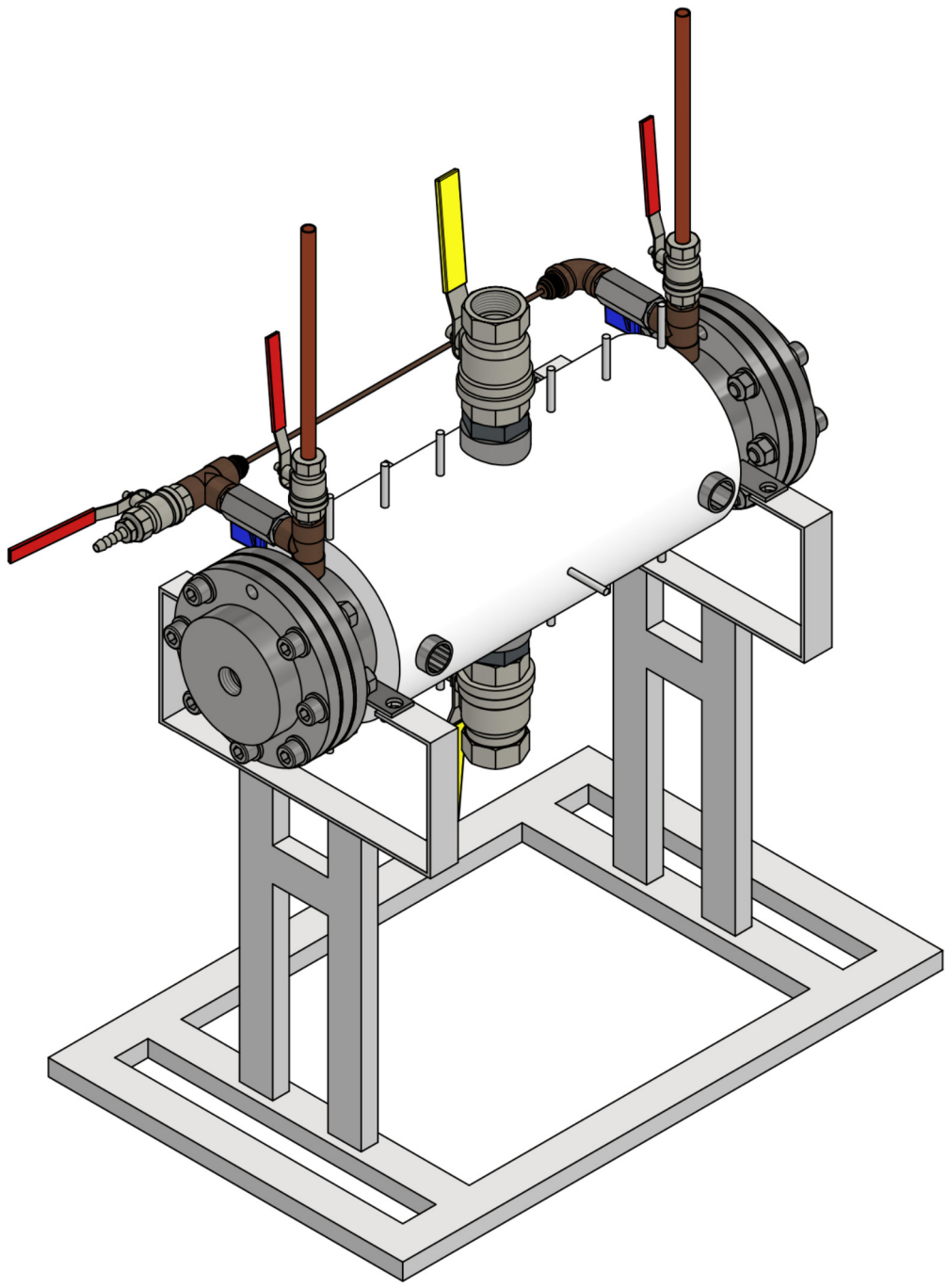


Figura 3.2: Modelo 3D del reactor MPI de flujo recíproco.

Se presentan las partes del reactor en las siguientes figuras:

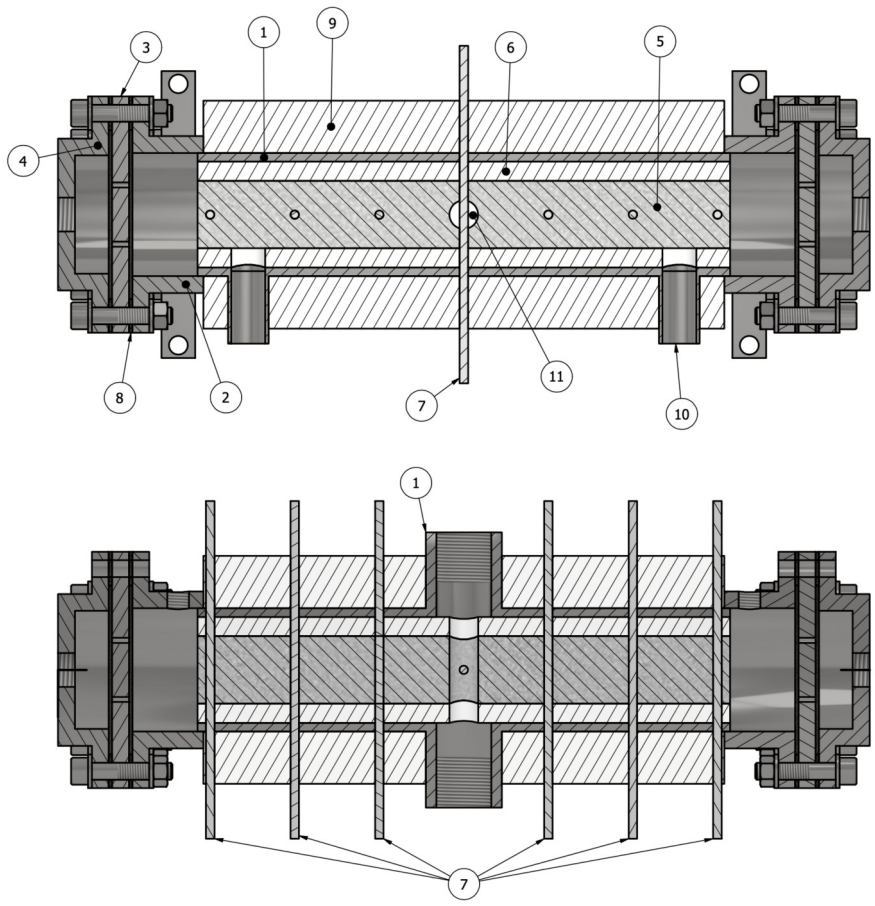


Figura 3.3: Vista en corte reactor MPI de flujo recíproco.

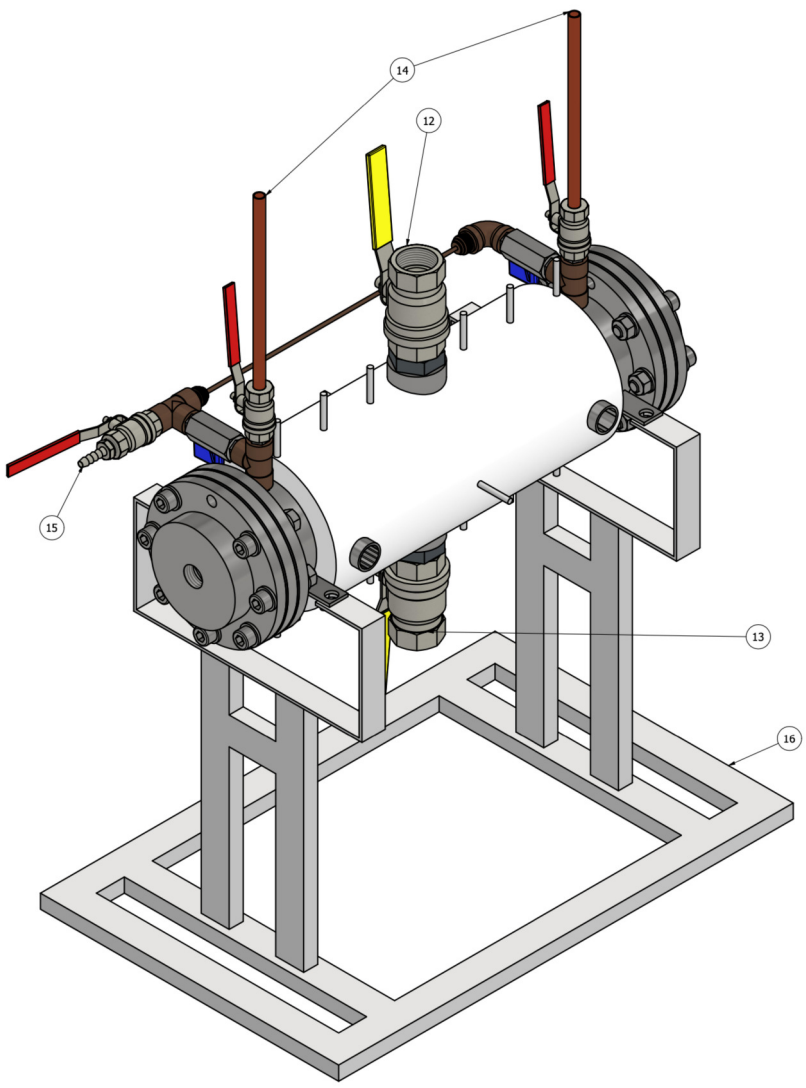


Figura 3.4: Vista reactor MPI de flujo recíproco ensamblado.

La tabla 3.1 detalla las piezas:

Tabla 3.1: Piezas del reactor MPI de flujo recíproco.

(1)	Estructura de acero ASTM A-53
(2)	Cámara de gases de escape
(3)	Placa de inyección lateral
(4)	Cámara de pre mezcla
(5)	Medio poroso inerte(Carburo de Silicio)
(6)	Manto cerámico aislante interior
(7)	Varillas porta termocupla tipo “S”
(8)	Empaquetadura cámara de pre mezcla
(9)	Manto cerámico aislante exterior(36[mm] de espesor)
(10)	Tubo para encendido del reactor(pre calentamiento)
(11)	Cámara para combustile sólido de 17 [mm]
(12)	Válvula de entrada combustible sólido
(13)	Válvula de salida combustible sólido
(14)	Sistema de salida gases de escape
(15)	Sistema de extrcción de gases para muestreo
(16)	Base del reactor

3.1.1. Dimensiones

La sección mas importante del reactor es la cámara de combustión, esta posee un largo de 305 [mm] y un diámetro de 40 [mm]. Las dimensiones de esta cámara son las siguientes:

- Largo total, $L_t = 480$[mm]
- Largo del medio poroso, $L_{MP} = 305$[mm]
- Diámetro exterior, $\phi_e = 73$[mm]
- Diámetro interior, $\phi_i = 62.68$[mm]
- Diámetro varillas termocuplas, $d_v = 50$[mm]

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas reactor.

Calidad	ASTM A53-Gr A
Tensión minima de fluencia Fy $[Mpa]$	211
Tensión máxima de Ruptura Fu $[Mpa]$	337
Densidad $[g/m^3]$	7.85
Punto de fusión [C]	1450-1510

3.1.2. Cámara de combustión

La cámara de combustión está conformada por un material sólido que posee cavidades llamadas poros, este material es de forma cilíndrica y se denomina medio poroso inerte (MPI). Esta matriz sólida con poros permite que la reacción de combustión se desarrolle, aumentando el rango de inflamabilidad de la mezcla aire combustible inyectada.

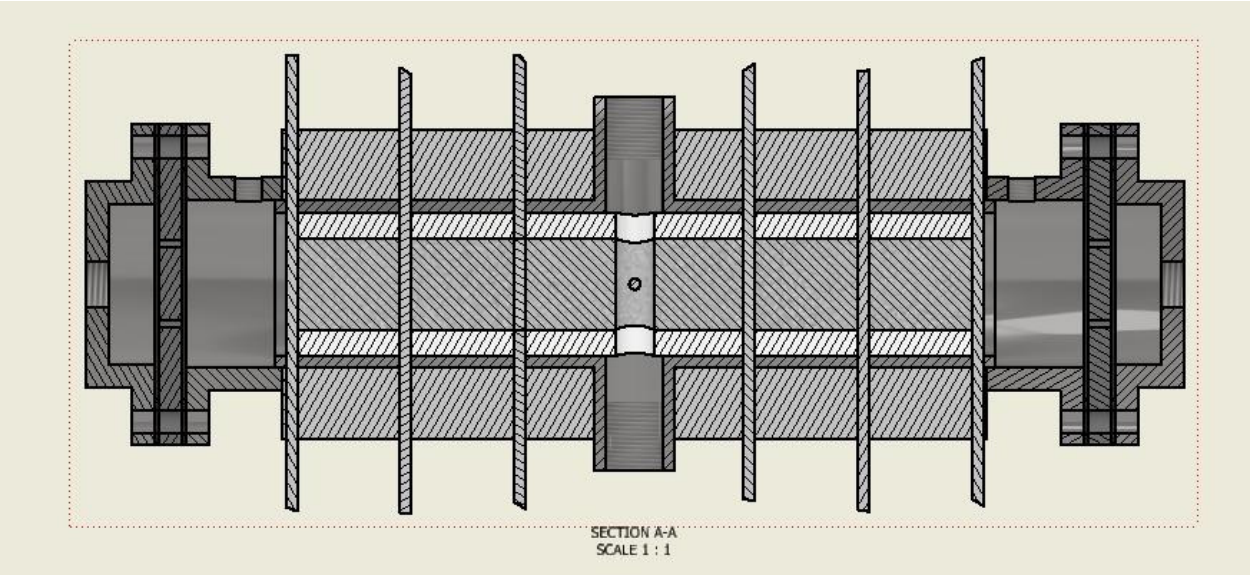


Figura 3.5: Vista en corte reactor MPI.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas material medio poroso.

Designación del producto	Carburo de silicio
Composición del material	100 % carburo de silicio
Temperatura de uso	1480[ºC]
Evaluación del ciclo térmico	6 (en escala 1-10)
Color	Plomo



Figura 3.6: Medio Poroso Inerte.

El medio poroso tiene las siguientes dimensiones:

- **Espesor**: 30 [mm]
- **Diámetro**: 40 [mm]
- **Porosidad**: 82.5 %
- 20 [ppi]

3.1.3. Aislación

Para el ensamblaje interior del reactor se posicionaron los discos de carburo de silicio uno junto al otro, y posteriormente se enrollaron en manto aislante alcanzando un espesor de 11.3 [mm]. De esta forma el medio poroso inerte, en conjunto con su aislante interno, son introducidos en el ractor.

El material del que se encuentra hecho el aislante es una tela cerámica, compuesta principalmente de fibra de aluminosilicato incorporada en una matriz por medio de aglutinante de látex[29].



(a) Vista Frontal (b) Vista Lateral

Figura 3.7: Aislación del MPI.

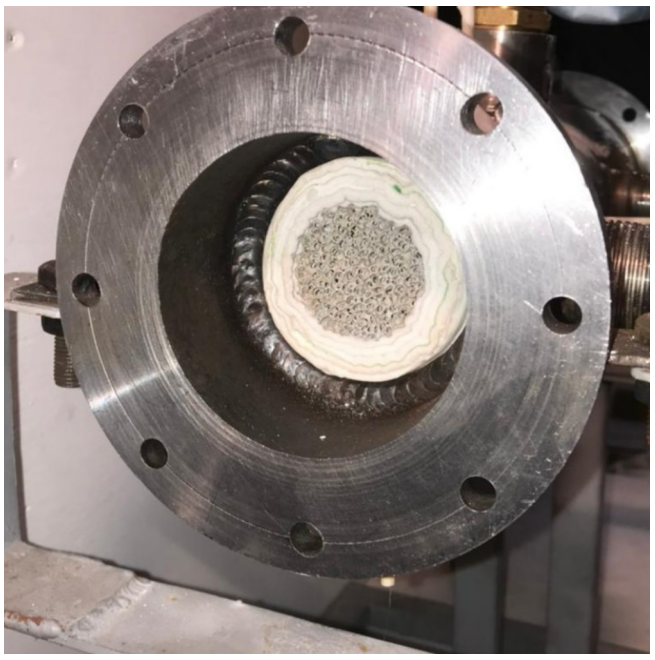


Figura 3.8: MPI aislado e instalado en el reactor.

El reactor se cierra con tapas de acero empernadas a su cámara de combustión, estas tapas operan como cámara de pre mezcla del aire y combustible que entran al reactor, permitiendo así generar una llama de pre mezcla. Éstas tapas son selladas con empaquetaduras resistentes a altas temperaturas, de manera que la mezcla aire combustible no filtre hacia el exterior.

En esta sección se describe paso a paso los procesos de encendido y operación para los distintos y cada uno de los ensayos, línea base con y sin vapor, operación con combustible sólido con y sin vapor. Previo a la realización del ensayo es necesario realizar actividades de seguridad para asegurar que no ocurra ningún accidente. Es necesario que todos los usuarios estén en conocimiento de los riesgos que lleva operar el reactor y cómo actuar en caso de un accidente, utilizando siempre los elementos de protección personal correspondientes.

La primera actividad es encender el detector de hidrocarburos para asegurarse que no existe ninguna filtración de gas natural en la red. Luego se acciona el compresor de aire, abriendo las válvulas correspondientes y regulando la presión a 1[bar] en el FRL correspodiente. Se abren las válvulas de gas natural respectivas. Se enciende la campana de extracción de gases del laboratorio. Es necesario contar con un soplete y una bombona de gas licuado listo para utilizar en el pre calentamiento del reactor.

Para la medición de la temperatura a lo largo del reactor, se instalan 7 termocuplas tipo "S"dentro de varillas dispuestas transversalemente. Estas varillas poseen un diámetro de 5 [mm] y se ubican a una distancia de 50 [mm] una de la otra.

Las termocuplas se denominan según la figura 3.6 para los prodecimientos. Habiendo realizado esto, se está en condiciones de comenzar con el encendido del reactor.

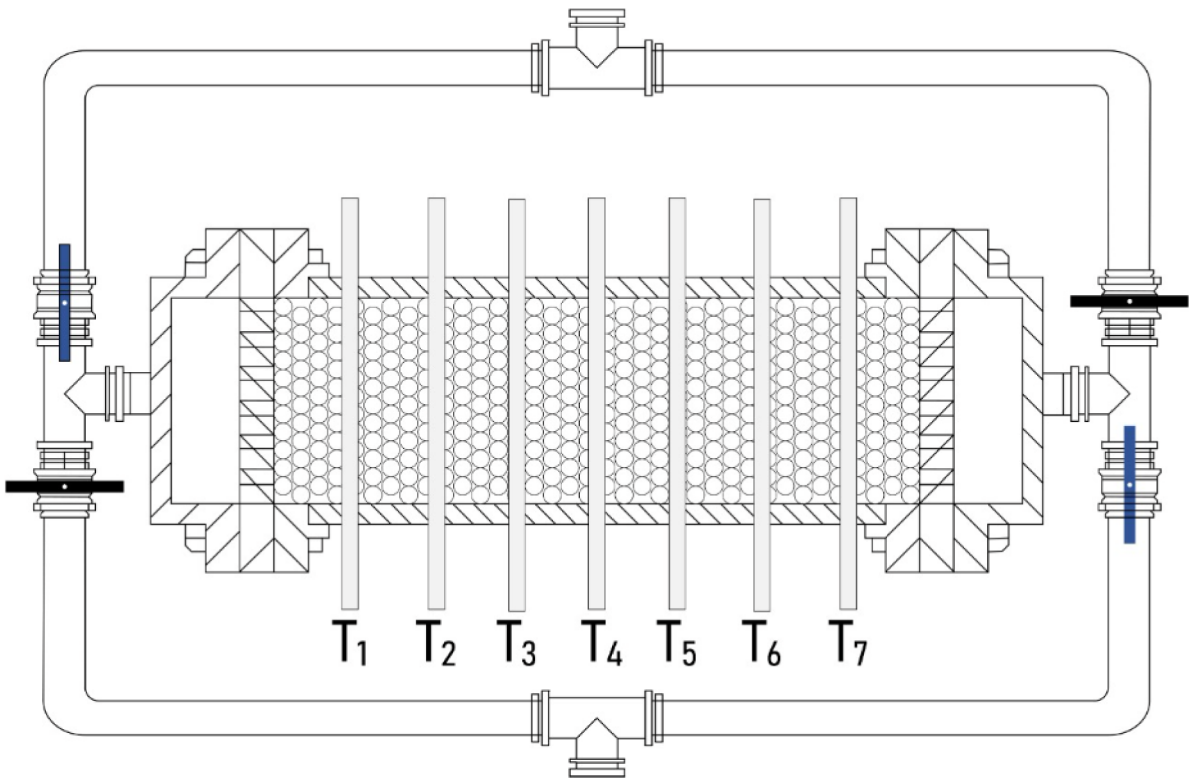


Figura 3.9: Termocuplas tipo “S” Reactor MPI.

3.1.4. Encendido del reactor:

- Se encienden todos los equipos electrónicos (computador, controladores de flujo).

- Comprobar presión de gas natural y aire (1[bar]).
- Abrir programa DAQ-Central, comprobar que la lectura de las termocuplas sea correcta.
- Crear carpeta para guardado de datos del ensayo.
- Instalar soplete para pre calentamiento del reactor.

  El soplete se instala con un pedestal apuntando la entrada lateral del reactor. Sobre el mismo reactor se instalan un serie de bloques de un material aislante para proteger los cables y conexiones del calor generado por el soplete.

- Se enciende el soplete y se abren las válvulas V.G.E.D y V.G.E.I, esto favorece el flujo del aire.
- Se monitorea la temperatura en la termocupla T1, debe superar los 545[ºC] para encender el reactor.
- Se regulan los caudales de aire y gas natural a una relación de equivalencia ϕ=1.
- Una vez alcanzada la temperatura necesaria en T1 se cierra la V.G.E.I.
- Se comienzan a grabar los datos.
- V.A. y V.G.N. se abren simultáneamente .
- Se procede a dar encendido abriendo la válvula V.I.I.
- El reactor emanará una llama por el lugar del pre calentamiento, y luegoo el frente de combustión se estabiliza.

  A medida que el frente de combustión se estabiliza en una zona intermedia entre la termocupla T1 y T2, la temperatura de todo el reactor comienza a aumentar. Se espera que el frente de combustión alcance su máxima temperatura mientras se mantiene estático en esta zona, una vez alcanzada esta temperatura se utilizará un tapón de greda para sellar esta zona de pre calentamiento.
- Una vez alcanzados los 1300[ºC] se procede a cerrar la entrada con el tapón de greda.
- Posterior al cierre se modifican los caudales de aire y gas natural para la relación de equivalencia a ensayar.
- Ya modificado el ϕ se observa por medio del software el avance del frente de combustión a través de las distintas TC.
- Una vez llegado el frente de combustión a la T5 (máxima temperatura) se da por completado 1 semi ciclo.

  De esta manera se logra operar el reactor moviendo el frente de combustión aguas abajo

Para el apagado del reactor:

- Cerrar V.I.I. y abrir V.G.E.I.
- Cerrar toda la red, V.G.N y V.A.

Se presenta una imagen (figura 3.10) y esquema de las instalaciones del laboratorio de termofluidos.



Figura 3.10: Instalación Laboratorio Termofluidos.

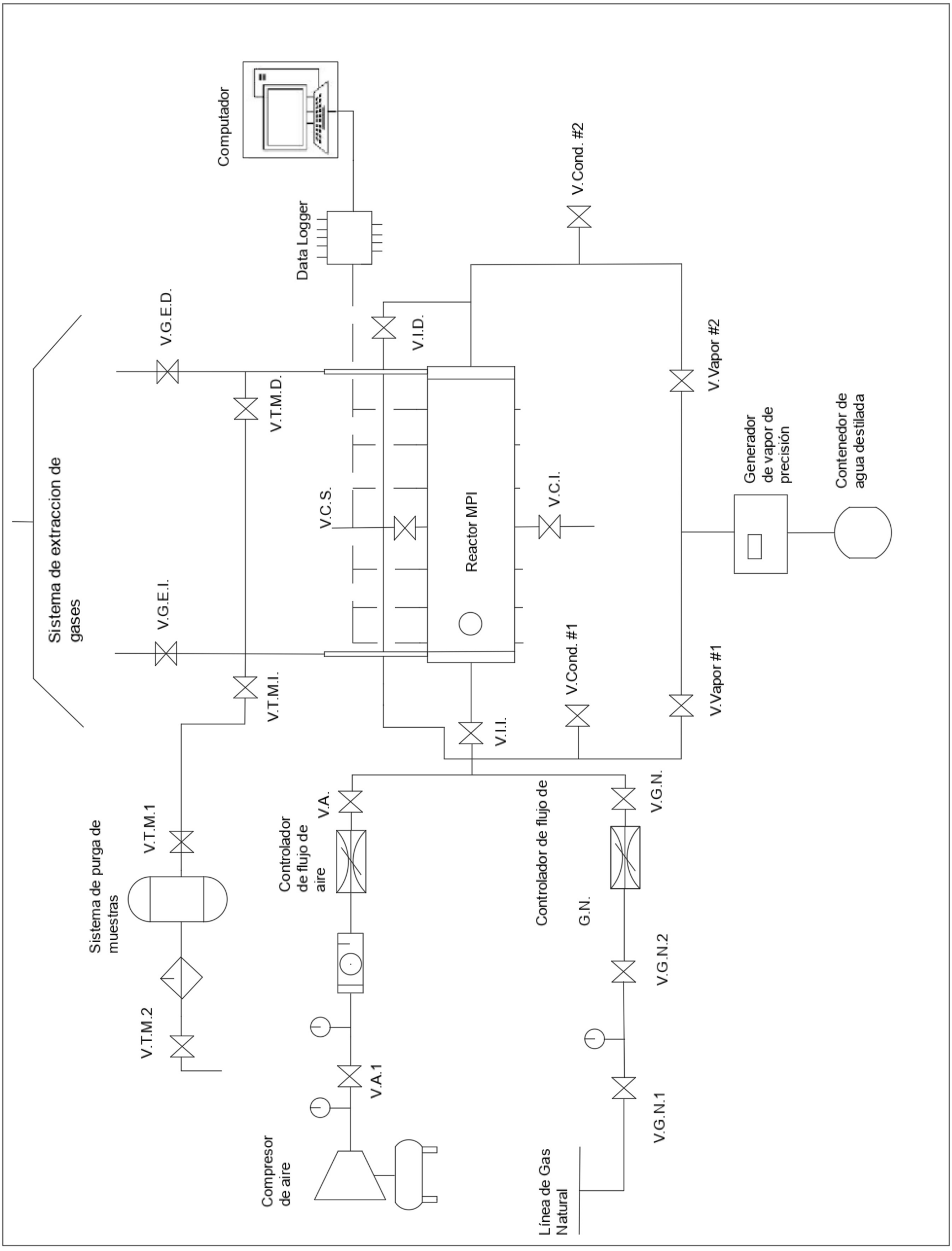


Figura 3.11: Esquema instalación Laboratorio de Termofluidos.

3.1.5. Operación en modalidad recíproca

Definición de válvulas y modo de operación:
Para la operación del reactor en modalidad recíproca fue necesario modificar la configuración interna del MPI. Esto ya que inicialmente el reactor presentaba una cámara central sin matriz sólida, lo que afectaba el Peclet local, impidiendo que el frente de combustión viajase en las dos direcciones. Una vez realizado el re diseño interior, manteniendo el medio poroso constante a lo largo de todo el reactor, se logra la modalidad recíproca tanto para ensayos de línea base como con combustible sólido. Revisar el ANEXO[D] para secuencia de re diseño

Se definen las válvulas que componen la instalación completa, señaladas anteriormente en la figura 3.7.

Tabla 3.4: Definición de válvulas.

Línea	**Descripción**
Inyección Lateral	**V.I.I.** Válvula Inyección Izquierda
	V.I.D. Válvula Inyección Derecha
Aire	**V.A.1** Válvula de Aire 1
	V.A. Válvula de Aire
Gas Natural	**V.G.N.1** Válvula Gas Natural 1
	V.G.N.2 Válvula Gas Natural 2
	V.G.N. Válvula Gas Natural
Vapor	**V.Cond.1** Válvula Condensado #1
	V.Cond.2 Válvula Condensado #2
	V.Vapor1 Válvula Vapor #1
	V.Vapor2 Válvula Vapor #2
Combustible Sólido	**V.C.S.** Válvula Combustible Superior
	V.C.I. Válvula Combustible Inferior
Gases de escape	**V.G.E.I** Válvula Gases de Escape Izquierda
	V.G.E.D. Válvula Gases de Escape Derecha
Toma de muestras	**V.T.M.I.** Válvula Toma de Muestra Izquierda
	V.T.M.D. Válvula Toma de Muestra Derecha
	V.T.M.1 Válvula Toma de Muestra 1
	V.T.M.2 Válvula Toma de Muestra 2

La modalidad recíproca se logra realizando la secuencia de cierre y apertura de las válvulas de inyección y de escape.

- Apertura de las válvulas V.I.I. y V.G.E.D.
- El frente de combustión se desplaza en sentido A-B
- Máxima temperatura en termocupla #5

- Cierre de la válvula V.G.E.D.
- Apertura silmultánea de las válvulas V.I.D. y V.G.E.I.
- Cierre de válvula V.I.I.
- Desplazamiento del frente de combustión en sentido B-A
- Máxima temperatura en termocupla #3
- Cierre de la válvula V.G.E.I.
- Apertura simultánea de las válvulas V.I.I. y V.G.E.D.
- Cierre de válvula V.I.D.

Siguiendo esta secuencia de apertura y cierre de válvulas, se asegura el funcionamiento recíproco del reactor. Esta operación se acotó a un segmento del reactor, este segmento corresponde desde la termocupla (#3) hasta la (#5). Se buscó lograr el funcionamiento en este sector ya que posteriormente con el ingreso del combustible sólido (se ubicará en la zona de la termocupla (#4)) el frente de combustión podrá tener ciclos de menor tiempo.

3.1.6. Operación con vapor de agua

Para el funcionamiento con vapor de agua se configura el generador de vapor de precisión según el caudal necesario. La temperatura del vapor se establece en 150 [ºC] y una presión de 1 [bar].

Tabla 3.5: Cálculo de flujo de vapor.

Relación V:C	**Caudal Vapor[g/min]**	**Caudal Metano[l/min]**
0.5:1	1.4	5.5
1:1	2.8	5.5
1.5:1	4.2	5.5
2:1	5,6	5.5

El caudal de metano no se modifica ya que para todos los ensayos con vapor se utiliza una misma relación de equivalencia a una misma velocidad de filtración.
ϕ=2.5[-] ; v=40 [cm/s]

El vapor se incorpora al momento en que se modifica la relación de equivalencia después del encendido. Se sigue la siguiente secuencia de pasos:

- Encender el generador de vapor.
- Drenar el generador de vapor utilizando el modo manual de la bomba.
- Una vez drenado el sistema se encuentra listo para comenzar a calentar el vapor.
- Seleccionar los parámetros de vapor.
- Establecer temperatura en 150[ºC] y el caudal correspondiente.

- Al momento de cambiar los caudales de aire y combustible, se abre la válvula V.Vapor1.
- Se observa el movimiento del frente de combustión en dirección A-B.
- Una vez llegado el frente de combustión a T5, se realiza el cambio de sentido.
- Se cierran las válvulas V.Vapor1 y V.I.I. simultáneamente.
- Luego se cierra V.G.E.D.
- Se abren las válvulas V.Vapor2, V.I.D. y V.G.E.I. de manera simultánea.
- El frente de combustión comenzará a viajar en dirección B-A.
- Una vez alcanzada la máxima temperatura en la termocupla T3 se realiza el cambio de dirección nuevamente.
- Se alcanza la máxima temperatura en T3, se completa 1 ciclo.
- Se cierran las válvulas V.Vapor2, V.I.D y V.G.E.I.
- Se abren las válvulas V.I.I, V.Vapor1 y V.G.E.D.
- De esta manera el frente vuelve a dirigirse en dirección A-B, hasta que llegue a T5.

3.1.7. Operación con combustible sólido

El reactor posee una cámara central donde se incorporará el combustible sólido. En esta zona se ubica la termocupla T4, de esta forma la medición de la temperatura de reacción del combustible depende sólamente de una termocupla.

En primer lugar se define el tipo de combustible y su tamaño a ensayar. Cada tamaño posee una masa estándar de ensayo que se definió en función al volumen de la cámara central, y cuánta masa de cada combustible cabe dentro hasta llenarla sin sobrepasar.

La cámara de combustible se realizó por medio de una perforación de 17 [mm] de manera transveral al medio poroso, justo en la zona central. Ver ANEXO[D] para el proceso de construcción de la cámara para el sólido.

Tabla 3.6: Masa estándar para ensayos.

	Masa estándar [g]		
Granulometría	#1	#2	#3
Biomasa	7.5	6.5	8.0
Carbón	13.0	10.0	8.0



Figura 3.12: Cámara para combustible sólido vista superior.

La secuencia para el ensayo con combustible sólido una vez seleccionado el tipo y tamaño:

- Masar en la balanza la cantidad necesaria para el ensayo.
- Fijar en la zona inferior de la cámara la rejilla de cierre y cerrar V.C.I.
- Introducir el sólido con un emmbudo, permite que el sólido no quede atrapado en el MPI.
- Cerrar V.C.S.
- Comenzar con el pre calentamiento del reactor.
- En caso de utilizar analizador de gases TESTO, encenderlo.

El resto del ensayo se opera en condiciones similares a las de la modalidad recíproca, incorporando unos pasos finales con respecto al sólido. Una vez apagado el reactor:

- Se abren V.C.S y V.C.I.
- Se retira la rejilla de cierre con las cenizas y restos de combustible sólido.
- El sólido que se retira se masa en la balanza
- De esta forma se calcula el porcentaje de reacción en base a la masa restante

3.2. Cálculo de flujos para la mezcla

Para lograr la combustión filtrada en los reactores de medio poroso se requiere de un gas combustible y un gas oxidante. Es necesario contar con el cálculo del flujo másico requerido de cada reactante y de esta forma configurar el suministro de cada uno.

Los reactantes que se utilizan son aire como oxidante, el cual esta compuesto en un 21 % de oxígeno, 78 % de nitrógeno principalmente. Para el combustible se utiliza gas natural, está compuesto principalmente por metano (95 %) y etano (5 %), para efectos de este trabajo se consideró como metano (100 %).

3.2.1. Caudal y velocidad de filtración

El caudal necesario a suministar estará definido por la velocidad de filtración que se defina a ensayar.

El caudal se calcula de la siguiente forma:

$$Q = u \cdot A \tag{3.1}$$

Caudal total.

Realizando la equivalencia correspondiente para una velocidad de mezcla en [m/s]:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q[l/min]}{\pi \cdot d^2[m^2]} \cdot \frac{1min}{60seg} \cdot \frac{1m^3}{1000L} \tag{3.2}$$

$$u = \frac{Q[l/min]}{15,000 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{1}{\epsilon} \tag{3.3}$$

Incorporando el factor de porosodiad

.

$$u = \frac{Q[l/min]}{15,000 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot d^2} \tag{3.4}$$

Se tiene como información los siguientes datos que permiten desarrollar la ecuación:

Tabla 3.7: Datos ecuación de velocidad.

Parámetros	Valor	Unidad
Porosidad (ϵ)	0.835	-
Diámetro (d)	0.04	[m]
Área (A)	0.00502655	[m^2]

Se realiza una tabla con distintos caudales en función de la velocidad de filtración. Se escogieron las velocidades de filtración: [0.35-0.40-0.45].

Tabla 3.8: Velocidades de filtración

Velocidad de filtración u [cm/s]	Caudal Q [l/min]
10	6.30
20	12.59
30	18.89
31	19.52
32	20.15
35	**22.04**
38	23.92
40	**25.18**
45	**28.33**

Ecuación de combustión:

Se define una ecuación de combustión para mezcla rica (3.5) y para mezcla pobre (3.6):

$$CH_4 + \frac{1}{\phi}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow Productos \tag{3.5}$$

$$CH_4 + \frac{2}{\phi}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow Productos \tag{3.6}$$

Se calculan las cantidades másicas de cada elemento, carbonon e hidrógeno en función a la combustión de 1[kmol] de combustible:

$$m_c = (1kmol \cdot 1) \cdot 12.01kg/kmol = 12.01[kg] \tag{3.7}$$

$$m_H = (1kmol \cdot 4) \cdot 1.008kg/kmol = 4.032[kg] \tag{3.8}$$

$$m_T = m_C + m_H = 16.042 \tag{3.9}$$

Posteriormente es necesario calcular la fracción másica por elemento:

$$X_C = \frac{m_C}{m_T} = 0.749 \tag{3.10}$$

$$X_H = 1 - 0.749 = 0.251 \tag{3.11}$$

Estos datos obtenidos se utilizan para calcular el volumen de aire estequiométrico necesario para combustionar 1[kg] de combustible:

$$V_{a,e} = \frac{22.4}{0.21} \cdot (\frac{X_c}{12.01} + \frac{X_H}{4.032} + \frac{X_S}{32.06} - \frac{X_O}{32})[\frac{m_N^3}{kg \cdot combustible}] \tag{3.12}$$

- Se considera el volumen de aire de 1[mol] en condiciones normales 22.4[L].
- El aire se compone principalmente de O_2 en un 21 % y N_2 en un 79 %.

El volumen de aire estequiométrico necesario es de:

$$V_{a,e} = 13.29[\frac{m_N^3}{kg \cdot combustible}] \tag{3.13}$$

Esto permite calcular los flujos necesarios de aire y de gas natural requeridos para lograr la velocidad de filtración para cada ensayo.

Se expresa en función del flujo total que debe ingresar al reactor:

$$\dot{V}_{Total} = \dot{V}_{combustible} + \dot{V}_{oxidante} \tag{3.14}$$

Se debe expresar en función del combustible ingresado al reactor, para esto se utiliza la ecuación presentada en el capítulo anterior (2.1) que define la relación de equivalencia.

$$\phi = \frac{V_{a,e}}{V_{a,r}} \tag{3.15}$$

Relación de equivalencia.

Reordenando los datos para expresar el flujo de oxidante como el flujo estequiométrico normalizado, queda la expersión:

$$\dot{V}_{oxidante} = \frac{\dot{m}_{combustible} \cdot V_{a,e}}{\phi} \tag{3.16}$$

El flujo másico es representado el producto entre la densidad y el flujo volumétrico.

$$\dot{V}_{oxidante} = \frac{\dot{V}_{combustible} \cdot \rho \cdot V_{a,e}}{\phi} \tag{3.17}$$

Utilizando la relación de los gases ideales, y tomando como condiciones normales de presión y temperatura

$$\rho_{combustible} = \frac{P}{R_{CH4} \cdot T}[\frac{kg}{m^3}] \tag{3.18}$$

como datos:

- Presión: 101.325 [kpa]
- Temperatura: 288.15 K

- Constante del gas metano (R_{CH_4}): 0.5181 [kJ/kg·K]

Remplazando los datos se llega : $\rho = 0.6787$

Utilizando la ecuación (3.14) y (3.17) se puede llegar a la siguiente relación para determinar el flujo de combustible en función del flujo total:

$$V_{Total} = V_{comb}(1 + \frac{\rho_{comb} \cdot V_{a,e}}{\phi}) \tag{3.19}$$

Como ya se calculó previamente el caudal total necesario para cada velocidad de filtración, se realiza una iteración para las relaciones de equivalencia y así llegar a los flujos requeridos. En las siguientes tablas se incorporan los cálculos. Cabe destacar que tanto el flujo de aire como el de gas metano están limitados por el rango de operación de cada controlador. Por esta razón para controlar el flujo de aire se utilizaron dos controladores con rangos de operación que permitieran el flujo requerido.

Tabla 3.9: Flujos para una velocidad de filtración u=35[cm/s].

Caudal	22.04	[l/min]
PHI	Aire[l/min]	Metano[l/min]
0.15	**21.67**	**0.37**
0.2	**21.55**	**0.48**
0.25	**21.43**	**0.60**
0.5	20.86	1.17
0.6	20.64	1.39
0.8	20.22	1.82
0.9	20.01	2.02
1	19.81	2.23
2	**17.99**	**4.04**
2.5	**17.20**	**4.83**
3	**16.48**	**5.56**
3.5	15.81	6.22
4	15.20	6.83

Tabla 3.10: Flujos para una velocidad de filtración u=40[cm/s].

Caudal	25.18	[l/min]
PHI	Aire[l/min]	Metano[l/min]
0.15	**24.77**	**0.42**
0.2	**24.63**	**0.55**
0.25	**24.44**	**0.69**
0.5	23.84	1.34
0.6	23.59	1.59
0.8	23.11	2.08
0.9	22.87	2.31
1	22.64	2.54
2	**20.56**	**4.62**
2.5	**19.66**	**5.52**
3	**18.83**	**6.35**
3.5	18.07	7.11
4	17.37	7.81

Tabla 3.11: Flujos para una velocidad de filtración u=45[cm/s].

Caudal	28.33	[l/min]
PHI	Aire[l/min]	Metano[l/min]
0.15	**27.86**	**0.47**
0.2	**27.71**	**0.62**
0.25	**27.56**	**0.77**
0.5	26.82	1.51
0.6	26.54	1.79
0.8	25.99	3.34
0.9	25.73	2.60
1	25.47	2.86
2	**23.13**	**5.20**
2.5	**22.12**	**6.22**
3	**21.19**	**7.14**
3.5	20.33	8.00
4	19.54	8.79

3.3. Sistemas de control y medición

3.3.1. Suministro de gas natural

El gas natural es suministrado desde la red local de la Universidad Técnica Federico Santa María. Ingresa al laboratorio de termofluidos a una presión manométrica de 1 [bar] y su composición generalmente es de 97 % metano. Antes de ingresar al módulo de trabajo pasa por dos válvulas de seguridad que son aperturadas y cerradas todos los dias. En el módulo de trabajo el flujo de gas natural es regulado por un controlador de flujo marca Aalborg, su unidad de de medida es de [l/min]. Se utilizaron dos modelos de controlador para el gas natural debido al rango de operación que limita cada uno, para los ensayos con ϕ pobre se utilizó el modelo GFC17, mientras que para los ensayos de ϕ rico se utilizó el GFC47. Cada controlador de flujo es regulado manualmente por medio de un tornillo sinfín el cual permite aumentar o disminuir el caudal entregado.



(a) Controlador GFC17 (b) Controlador GFC47

Figura 3.13: Controladores de flujo Gas Natural

Tabla 3.12: Especificaciones técnicas controlador de flujo de gas natural.

Marca	Aalborg	
Modelo	GFC17	GFC47
Unidad de medida	[l/min]	[l/min]
Rango	[0-5]	[0-20]
Resolución	[0.01]	[0.1]

3.3.2. Suministro de aire

El aire se suministra a través de un motocompresor de dos cilindros sin aceite. El compresor es de marca SCHULZ, posee un regulador de presión incluido lo que permite entregarle al controlador de flujo el aire a 1 [bar]. La red posee su unidad de FRL por la cual pasa el aire luego de salir de compresor. Posteriormente el flujo es regulado por medio de un regulador de flujo marca Aalborg con característias similares al que se utiliza para controlar el flujo de gas natural.



(a) Estanque de compresión



(b) Motor eléctrico



(c) Motocompresor

Figura 3.14: Motocompresor SCHULZ “elaboración propia”

Tabla 3.13: Especificaciones técnicas motor eléctrico.

Marca	SCHULZ
Modelo	MSV6
Potencia	750 [W]

Tabla 3.14: Especificaciones técnicas estanque compresor.

Marca	SCHULZ
Modelo	MSV6
Presión máx.	120[psi]
Volumen	30 [L]]



Figura 3.15: Controlador de flujo de aire.

Tabla 3.15: Especificaciones técnicas controlador de flujo de aire.

Marca	Aalborg
Modelo	GFC37
Unidad de medida	[l/min]
Rango	[0-30]]
Resolución	[0.1]

3.3.3. Suministro de vapor de agua

La incorporación de vapor de agua a la operación del reactor se realiza en dos tipos de ensayos. El primero es para analizar el % de producción y % de conversión de H_2 en el reformado de gas natural, condición denominada como línea base en donde el reactor se opera solamente combustionando gas natural con aire en el MPI. El siguiente tipo de ensayo en el que se utiliza vapor es con la presencia de biomasa o carbón, observando como influye el vapor de agua en la gasificación de un combustible sólido.

El caudal de vapor a incorporar se establece en funcion al combustible gaeoso incorporado. Los ensayos realizado tomaron como referencia una relación volumétrica 1:1 entre vapor y combustible gaseoso, de esta manera se realizaron diferentes ensayos probando distintas relaciones. La temperatura y presión del vapor se mantuvieron constantes.

El suministro y control del vapor sobre calentado es otorgado por un generador de vapor de alta precisión con el cual se permite establecer temperatura, presón y caudal. El generador marca Cellkraft es de tipo escritorio, lo que permite que su transporte sea fácil. El suminstro de agua destilada es desde un bidón de 20[L] dispuesto especialmente para la utilización en este generador.

El equipo entrega el caudal en [g/min], por lo que se requiere transformar a la unidad equivalente de [l/min], se relacionan por medio del volúmen específico según la tabla termodinámica de vapor de agua A-6[30].

El volumen específico del vapor sobre calentado, a 150[ºC] y 0.1[Mpa] es de: v =1.9367[m^3/kg].



(a) Vista panel de control (b) Vista salida de vapor

Figura 3.16: Generador de vapor de precisión

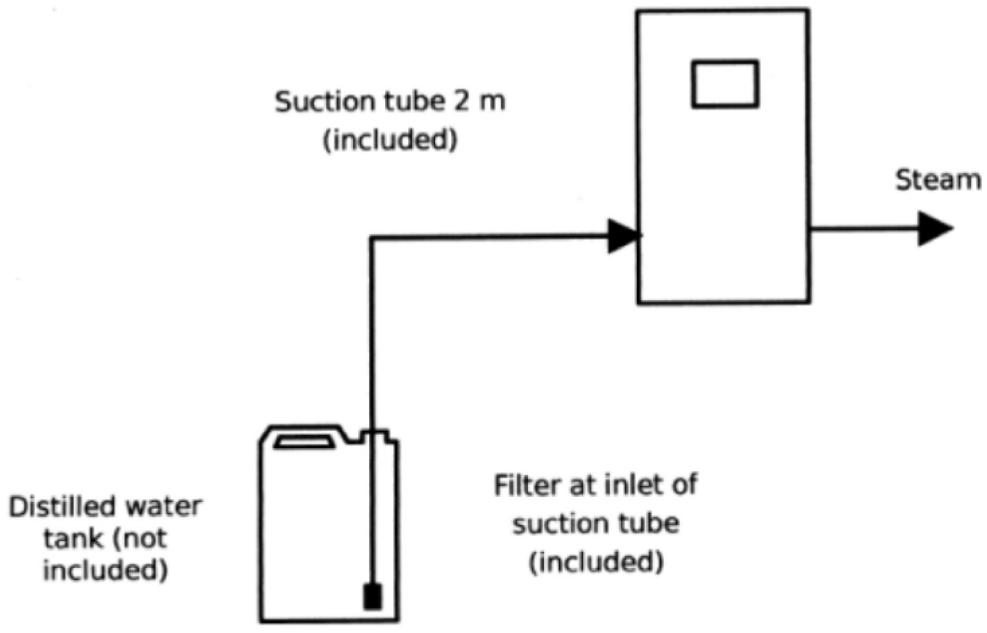


Figura 3.17: Esquema suministro de vapor.

Tabla 3.16: Especificaciones técnicas generador de vapor.

Marca	Cellkraft
Modelo	E-1500
Caudal de vapor	0-25 [g/min]
Temperatura de vapor	40-400 [ºC]
Presión de vapor	1-6 [bar]
Calidad del agua	Destilada (máx. 10 S/cm)
Potencia	1500 [kW]
Tiempo de partida	5 min

3.3.4. Suministro de combustible sólido

El reactor de medio poroso inerte de flujo recíproco es utilizado con 2 tipos de combustibles sólidos: pellets de biomasa (eucaliptus globulus) y fragmentos de carbón sub bituminoso. Cada uno de estos combustibles fue ensayado en tres tipos de tamaño de partícula, fueron divididas por medio de un tamiz para asegurar su uniformidad en la medida. Ambos combustibles fueron suministrados por la universidad.



(a) Pellet de biomasa



(b) Carbón sub bituminoso

Figura 3.18: Combustibles Sólidos “elaboración propia”

El análisis elemental de los combustibles carbonosos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.17: Análisis elemental combustibles sólidos.

Análisis	**Unidad**	**Pellet de Biomasa**	**Carbón**
Carbono	gC/100g de muestra	46.2 ±0.1	68.2 ±0.4
Hidrógeno	gH/100g de muestra	6.2 ±0.1	5.03 ±0.03
Nitrógeno	gN/100g de muestra	0.89 ±0.01	2.03 ±0.04
Oxígeno	gO/100g de muestra	27.7 ±0.06	10.15 ±0.05
Azufre	gS/100g de muestra	<0.5	0.55 ±0.07

Se presentan las propiedades físicas de cada combustible:

Tabla 3.18: Poderes caloríficos, densidad y humedad.

	Unidad	**Pellet de Biomasa**	**Carbón**
Poder calorífico superior	[kJ/kg]	18,811	26,565
Poder calorífico inferior	[kJ/kg]	17,371	24,996
Densidad	$[g/cm^3]$	1.36	1.18
Humedad	[%]	9.43	8.61

Se define un tamaño de grano (diámetro equivalente) para cada grado, este tamaño se define luego de realizar una cantidad total de 10 mediciones con un pie de metro a muestras aleatorias dentro del mismo grado. Posteriormente se calcula un promedio de las mediciones realizadas para definir un diámetro equivalente de la partícula de carbón o biomasa:



Figura 3.19: Tamaño de grano biomasa.



Figura 3.20: Tamaño de grano carbón.

Se define un diámetro equivalente para cada tamaño:

Tabla 3.19: Diámtero equivalente promedio.

Granulometría [mm]	#**3**	#**2**	#**1**
Biomasa	5.13	2.90	0.76
Carbón	6.47	4.21	0.81

Se realiza un análisis del porcentaje de reacción de cada tamaño, de esta forma se busca encontrar una relación entre tamaño de combustible sólido y tanto su porcentaje de reacción como los gases producto generados.

3.3.5. Medición de temperatura

La medición de la temperatura interior del reactor se realiza por medio de 7 termocuplas tipo "S". Se instalaron en posición radial con respecto al reactor, a 50 [mm] una de la otra. Cada termocupla se introduce en una varilla cerámica, que posteriormente se instala en el reactor, el diámetro de cada varilla es de 5[mm]. Las termocuplas estas diseñadas de dos materiales distintos, uno de platino y el otro de platino/rodio, los cuales se fusionan para generar un solo filamento. Su temperatura de operación es de 1600[ºC].

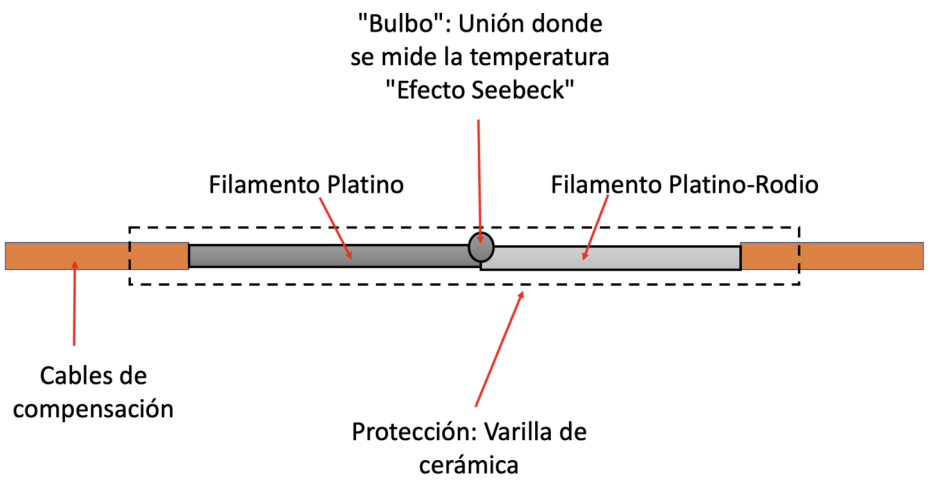


Figura 3.21: Esquema de una termocupla tipo "S".

El principio de funcionamiento es el efecto “Seebeck”, el cual se basa en el diferencial de potencial eléctrico que se genera al momento de unir dos materiales metálicos y someterlos a un aumento de temperatura. Este diferencial de potencial es leído por el adquisidor de datos y lo presenta por medio del software DAQ-CENTRAL, en el computador. De esta manera se mide la temperatura, lo que permite saber el lugar en el que se encuentra el frente de combustión y su temperatura máxima alcanzada.



Figura 3.22: Adquisidor de datos OMEGA.

Tabla 3.20: Adquisidor de datos OMEGA.

Marca	OMEGA
Modelo	OMB-DAQ-56

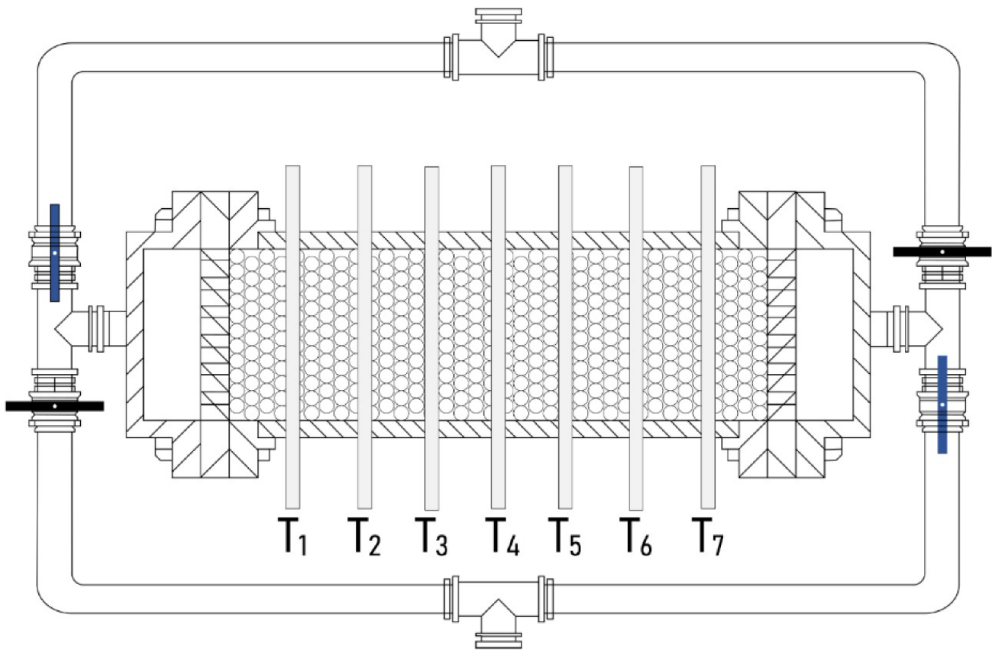


Figura 3.23: Esquema instalación de termocuplas.

3.4. Sistema de análisis de gases producto y material particulado

Los gases producto se analizan para definir la composición, esto varía según el tipo de reacción. Por ejemplo, en el caso de ocurrir una reacción rica en combustible, se espera obtener altos índices de gases como el metano y monóxido de carbono, mientras que si se realiza un ensayo con mezcla pobre los gases producto que se esperan son oxígeno y dióxido de carbono en su mayoría. La medición de material particulado se realiza por medio de dos equipos: un analizador de gases TESTO, y un espectrómetro láser de aerosoles el cual entrega una separación del matrial particulado según tamaño (PM10, PM4, PM2.5, etc).

3.4.1. Toma de muestras de emisiones gaseosas

La cromatografía gaseosa es utilizada para caracterizar la composición del gas producto que generan las reacciones en el reactor MPI de flujo recíproco. Para poder realizar la toma de muestras se tiene incorporado al reactor un sistema de válvulas que permiten la extracción y almacenamiento del gas mientras se desarrolla el ensayo. Por medio de válvulas que desvían las emisiones gaseosas desde el tubo de gases de escape hacia la red de extracción se logra la toma de muestra.

Sistema de extracción de muestras:

Está compuesto por una manguera, un recipiente lavador de gases con silica gel, sistema de válvulas para la extracción, jeringa de succión y una bolsa para muestras con cierre hermético.

El reactor posee una válvula de toma de muestra a ambos lados, lo que permite que se pueda extraer gas en cualquiera de los dos sentidos de operación (sentido A-B ó B-A). Para tomar una muestra de gas es necesario purgar la línea de muestra y así asegurar la no contaminación de la muestra. La limpieza o purga de la lína y bolsa de muestra, se realiza bombeando la línea y todo el sistema con la jeringa de succión. La bolsa de mustras utilizadas son de polipropileno SKC, estan hechas de un material “Flexfoil” o “Tedlar”, poseen una boquilla ajustable que permite facilitar la inyección para su muestra en cromatografía.



Figura 3.24: Bolsa para muestra de emisiones gaseosas.

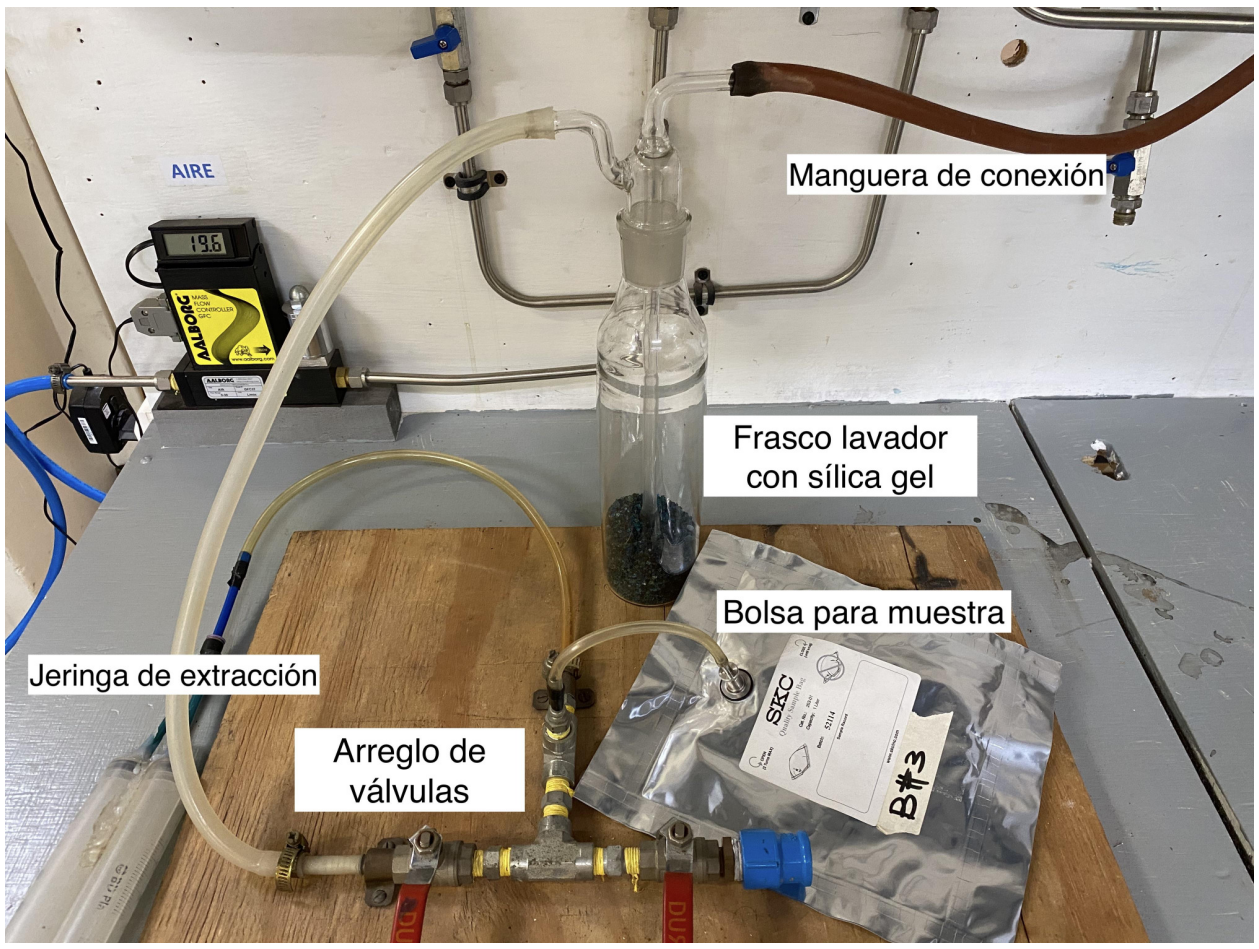


Figura 3.25: Sistema de extracción muestras.

Para la purga de la línea y posterior toma de muestra es necesario seguir la siguiente secuencia:

- Conectar el frasco lavador de gas coon silica gel al reactor y al sistema de válvulas.
- Conectar bolsa de muestra.
- Abrir las válvulas V.T.M.D. y V.T.M.I.
- Se observa el movimiento del frente de combustión, esperando que alcance la máx temperatura en la T3.
- Cuando el frente alcanza la T3, se comienza con la purga de la línea y de la bolsa de muestra.
- Se abre la llave inicial y se comienza a succionar con la jeringa
- Una vez llenada la jeringa, se cierra la primera llave y se abre la segunda, expulsando el contenido de la jeringa.
- Esto se repite 5 veces
  Luego se debe purgar la bolsa:
- Abrir la primera llave del sistema.
- Llenar la jeringa
- Cerrar ambas llaves y vaciar el contenido de la jeringa en la bolsa, se debe cerrar la bolsa inmediatamente después.
- Se repite hasta llenar la bolsa.
- Luego se vacía la bolsa con la jeringa y vaciando al exterior.
- El sistema se ecuentra listo para la muestra.

La muestra tiene una duración de máximo 24[hrs] en la bolsa, y debe ser guardada en un lugar seco y sin exposición a luz solar directa.

Equipo de medición:

El equipo de medición es un cromatógrafo gaseoso, proporcionado por el Departamento de Ingeniería Química, lugar donde se envían las muestras para ser analizadas.

Para cada muestra es necesario definir los compuestos a analizar, ya que de esto depende la configuración del cromatógrafo. Para los ensayos con ϕ ricos se pide el análisis para metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno. En el caso de los ensayos con ϕ pobre, se pide análisis de oxígeno, dióxido y monóxido de carbono.



Figura 3.26: Cromatógrafo gaseoso.

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-128-22

Fecha emisión: 21.10.2022

Información del cliente		
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María	
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica	

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 1 LB	**CI 542**	
	# 2 LB	**CI 543**	
Fecha de recepción	17 de octubre de 2022	Fecha Inicio Análisis	18 de octubre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

Análisis	Unidad	Resultados (*) CI 542	CI 543
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	13,95 ± 0,07	13,98 ± 0,04
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	6,1 ± 0,2	6,7 ± 0,1
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,658 ± 0,002	0,812 ± 0,006
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	3,89 ± 0,01	5,41 ± 0,04

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: No se presentan observaciones

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio — Fecha de edición: junio de 2020 — v03
Av. España 1680, Valparaíso — servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl — 32 2 654219 — QUI-128-22
Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio. — Página 1 de 1

Figura 3.27: Informe químico cromatografía mezcla rica.

Ver ANEXO[E] para visualizar todos los informes enviados a muestras por cromatografía

gaseosa.

3.4.2. Medición de material particulado

La emisión de material particulado es un factor importante a considerar en cualquier proyecto de generación energética debido a los impactos ambientales que tienen, por lo que se buscó instalar un sistema de medición en línea del material particulado emitido por el reactor de medio poroso para las distintas modalidades de operación.

El equipo instalado en primera instancia, corresponde a un TESTO 380. Este equipo modular está diseñado para una medición en línea. Se conecta al reactor por medio de una sonda. El analizador de gases posee incorporado un dilutor para el flujo ingresado, y un sistema de control. Se conecta al computador de trabajo por medio de un software del propio equipo y permite la entrega de los datos de una forma mas simple y en línea.

Se diseñó una pieza para soportar la sonda sobre la salida de los gases de escape del reactor, y ayudar a canalizar estos gases de forma que el flujo de gases de escape pase a través de la sonda lo mas laminar posible. Ésta pieza consta de un cilindro de latón incorporado al tubo de gases de escape que posee una perforación a un costado, del diámetro de la sonda.



Figura 3.28: Tubo para medición con analizador TESTO



(a) Base Equipo TESTO 380



(b) Sonda TESTO 380

Figura 3.29: TESTO 380

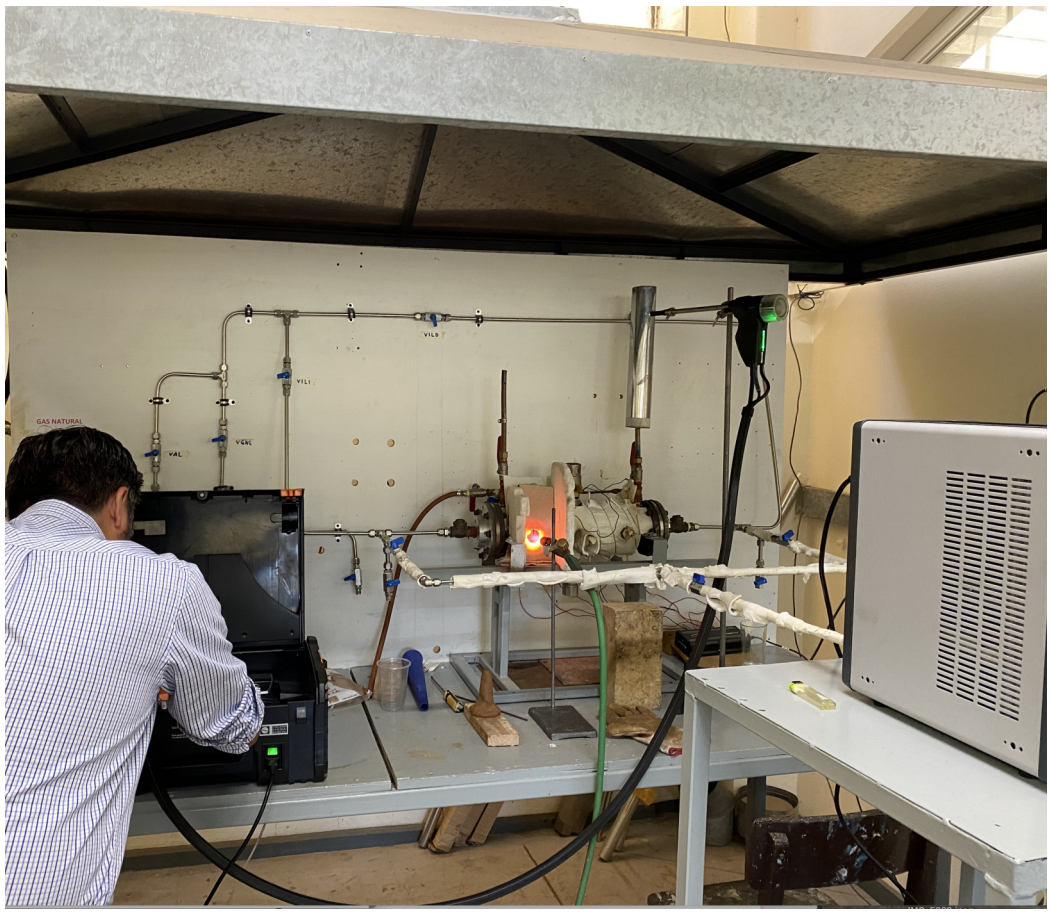


Figura 3.30: Instalación Analizador de Gases TESTO.

Las especificaciones del equipo se presentan en la siguiente tabla[31]:

Tabla 3.21: Datos técnicos TESTO380.

Marca	TESTO
Modelo	380
Peso	7900 [g]
Exactitud	VDI 4206-2
Resolución	0.1 [mg/m^3]
Temperatura de funcionamiento	5-40 [^{o}C]
Rango	0 hasta 300 [mg/m^3]

El siguiente equipo a instalar es un espectrómetro láser de aerosoles, este equipo permite realizar mediciones de gran precisión. El principio de funcionamiento es la difracción de las partículas por medio de un láser[32]. Posee un dilutor que se puede anexar al equipo en caso de ser requerido, tiene una capacidad de diluir en 100 veces la muestra, lo que permite asegurar que el equipo no se sature al medir flujos de alta concentración. El equipo es utilizado por medio de un software de trabajo el cual permite la lectura y almacenamiento de datos en tiempo real lo que permite generar gráficos para las concentraciones de material particulado de diferente tamaño (MP10, MP4, MP2.5 y MP1). Este tipo de equipos son utilizados para; estudio de aerosoles, control de procesos, mediciones de material particulado, medición IAQ en vehículos o edificios[33].



(a) Espectrómetro laser



(b) Espectrómetro laser



(c) Dilutor de gases

Figura 3.31: Espectrómetro Laser Grimm

La instalación del espectrómetro de aerosoles se realiza en el mismo acople en donde se instaló el testo, requirió de un tapón para sellar la boquilla por donde el equipo realiza la succión del gas a medir. Para alcanzar la altura necesaria del reactor se utilizó un banquillo que trae consigo el equipo. La conexión del equipo al reactor se realiza por medio de una sonda termo estática, la cual permite disminuir la temperatura de los gases de escape hasta una temperatura permisible por el equipo. Así también se incorpora un dilutor de carbón activado, el cual puede funcionar como dilutor simple o doble. Para este trabajo se utiliza la dilución doble debido a las altas concentraciones del gas emitido.



Figura 3.32: Instalación espectrómetro de aerosoles GRIMM.

Las características del equipo son presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 3.22: Datos técnicos espectrómetro de aerosoles GRIMM[33].

Marca	GRIMM
Modelo	DUSTDECODER 11-D
Principio de detección	Difracción de partículas por láser
Rango de partículas medidas	0.253-35.15 [μm]
Canales de medición	31 canales de tamaño de partícula
Concentración másica de medición	0-100 [$\mu g/m^3$]
Caudal de la bomba	1.2 [l/min]
Control gravimétrico	Filtro PTFE de 47 [mm]
Condiciones de operación	0-40[ºC] y <90 %HR
Intervalo de medición	6 [s]

El equipo es encedido de manera manual en su parte frontal donde se ubican los botones para su operación, posteriormente se conecta al computador de trabajo por medio de su software de trabajo “Labview” en donde se debe seleccionar el modelo que se está utilizando. Una vez conectados el equipo y el software se puede comenzar con la medición de material particulado.

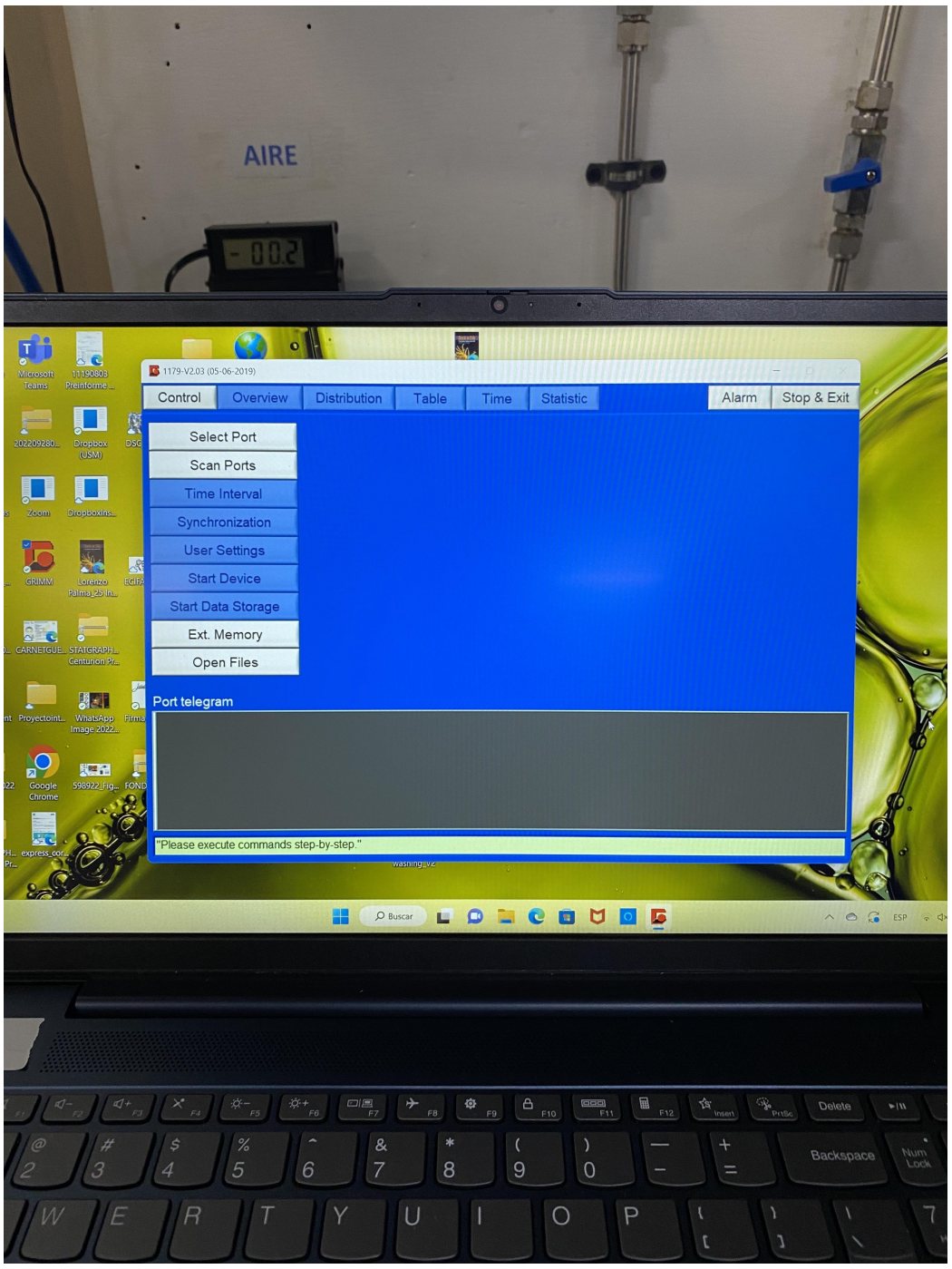


Figura 3.33: Software para operación espectrómetro GRIMM.

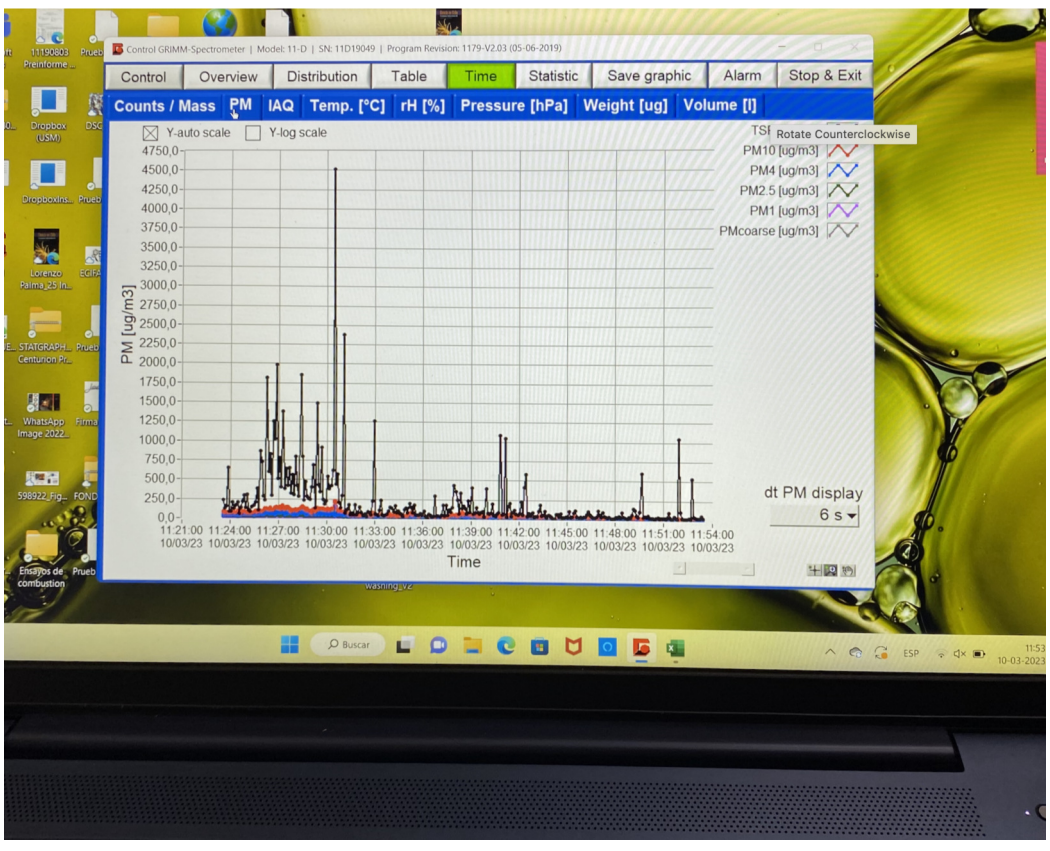


Figura 3.34: Software para operación espectrómetro GRIMM.

Finalmente, se logró la medición de material particulado para una modalidad del reactor como reactor inerte y tambien como reactor híbrido. Se presenta la siguiente figura con la instalación necesaria para lograr estas mediciones.

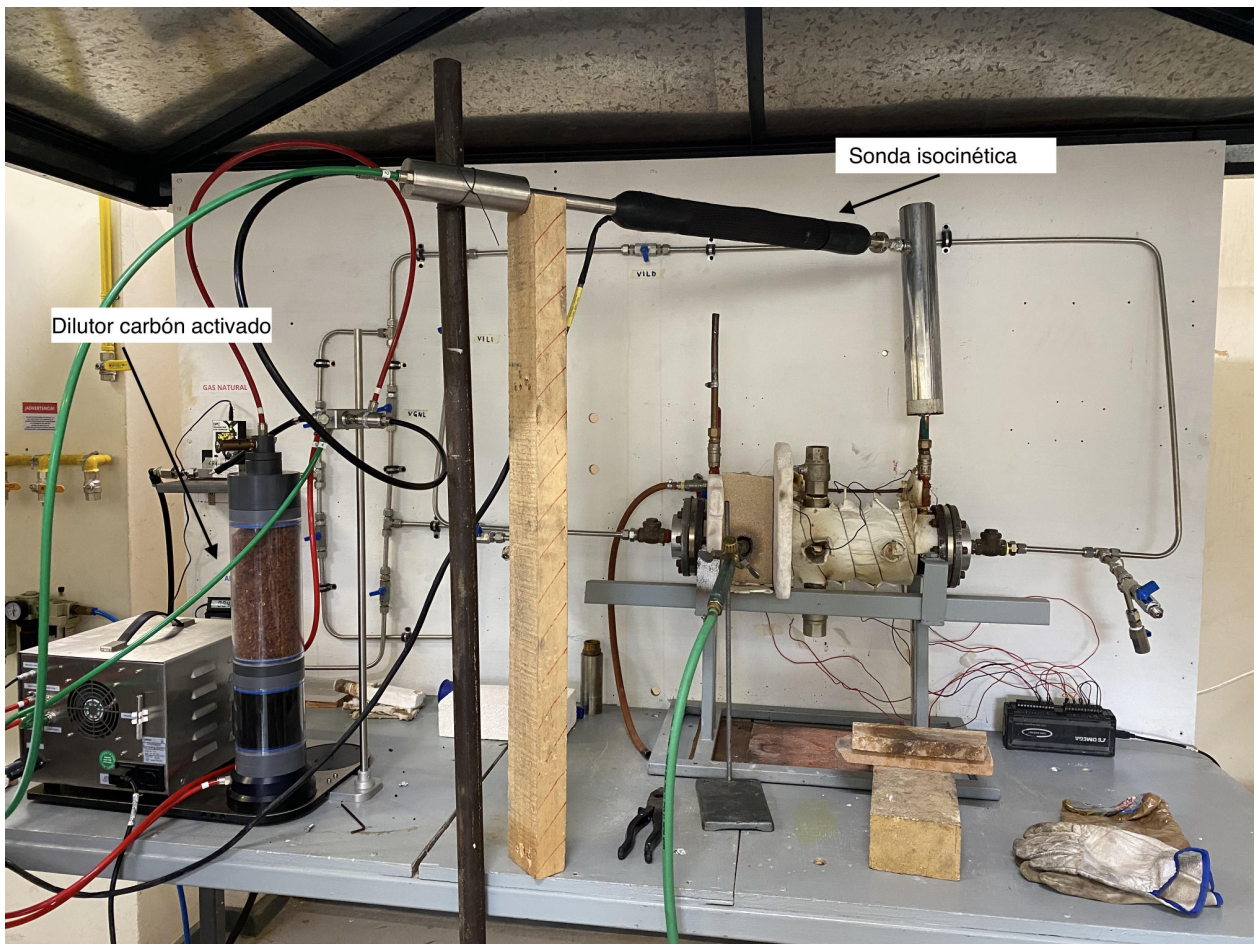


Figura 3.35: Instalación espectrómetro láser con dilutor y sonda termo estática.

Capítulo 4

Presentación y Análisis de Resultados

La presentación de los resultados obtenidos se hace separándolos según el tipo de experimento realizado. En primera instacia se opera el reactor para la caracterización de una Línea base (LB), en donde se busca lograr la estabilización del frente de combustión y su movimiento en una modalidad recíproca. Se establecieron relaciones de equivalencia (ϕ) y velocidades de filtración (u[cm/s]) los que definen el caudal de combustible y aire que deben ser suministrados por medio de los controladores de flujo. Se incorporó vapor de agua en esta operación de tal forma de observar la variación en las emisiones gaseosas. Para el encendido del reactor se utiliza un soplete de gas licuado (GLP) con el cual se genera el pre calentamiento hasta alcanzar la temperatura de autoignición del gas metano.

Cabe destacar que para lograr la modalidad recíproca se debió intervenir el reactor que se recibió para la realización de los ensayos. Esto debido que con el reactor en las condiciones que fue diseñado impedía que el frente de combustión lograra viajar en los dos sentidos (A-B y B-A). Se describe y detalla el proceso de re diseño en el ANEXO[D].

El encendido y estabilización del frente se realiza con un phi=1, el encendido del frente de combustión se produce en la zona izquierda del reactor (visto desde el frente) donde se encuentra la inyección de la mezcla aire-combustible. Posteriormente, modificando la relación de equivalencia se genera el movimiento del frente aguas abajo, ya que en este reactor sólo se operará moviendo el frente de combustión aguas abajo, alternando el sentido de inyección para lograr la modalidad recíproca.

Se realizaron ensayos con dos combustibles sólidos diferentes, pellets de biomasa y fragmentos de carbón sub bituminoso. Para estos ensayos también se incorporó vapor de agua para analizar su efecto en el proceso de gasificación. También se realizarán ensayos de combustible híbrido en donde se mezclarán, en diferentes proporciones, la biomasa y el carbón para analizar tanto los gases producto como la emisión de material particulado.

4.1. Línea base

Se realizaron varios ensayos preliminares a diferentes relaciones de equivalencia y velocidades de filtración. Se determinó que el reactor operará sólo con mezclas muy pobres y muy ricas. Se definen 3 ϕ para cada grupo. A su vez para cada relación de equivalencia se ensayaran 3 velocidades de filtración, con esto se contruyó un perfil térmico, y un perfil de emisiones de gases para caracterizar el funcionamiento base y posteriormente con los combustibles sólidos.

Tabla 4.1: Relaciones de equivalencia y velocidades de filtración.

ϕ	u[cm/s]
3	35-40-45
2.5	35-40-45
2	35-40-45
0.25	35-40-45
0.20	35-40-45
0.15	35-40-45

Para lograr la modalidad recíproca en el reactor fue necesario realizar una modificación en su interior, ya que inicialmente contaba con una cámara de 30 [mm] de largo al centro del reactor en donde había ausencia de medio poroso inerte la cual tenía la función de almacenar el combustible sólido utilizado (biomasa y carbón). La modificación consistió en eliminar esta zona que carecía de matriz sólida, incorporando medio poroso, así teniendo continuidad absoluta del medio poroso a lo largo del reactor y evitar cambios en la velocidad de filtración local, lo que produce cambios en el número de Peclet local (Pe).

De esta forma con las relaciones de equivalencia phi=2; 2,5 y 3 se logró la modalidad recíproca con las 3 velocidades de filtración. En estos ensayos se tomaron muestras para su análisis por medio de cromatografía gaseosa, buscando gases producto de la reacción (H_2, CH_4, CO y CO_2). Por medio de 7 termocuplas dispuestas de manera transversal en el reactor, se realiza la medición de la temperatura, esto permite tener claridad de las temperaturas máximas alcanzadas por cada ensayo y configuración, como también calcular la velocidad del frente de combustión (V_{fc}).

En el caso de los ensayos con phi pobres; 0.15, 0.20 y 0.25 se logró la modalidad recíproca pero no para todas las velocidades de filtración. Utilizando la velocidad de filtración de 35 [cm/s] no se logró la modalidad recíproca para ninguna de las 3 relaciones de equivalencia pobre. En este caso los gases de interés que se buscan como producto de la reacción son: O_2, CO_2, CO y CH_4.

Se presentan los resultados gaseosos y térmicos en función de la relación de equivalencia y de la velocidad de filtración. También se realiza el cálculo de la velocidad del frente de combustión, lo que permite analizar el tiempo de ciclo (t_c).

Para el análisis y lectura de los resultados de esta sección es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El semi ciclo de izquierda a derecha será llamado A-B y el semiciclo de derecha a izquierda será llamado B-A, un semiciclo A-B mas uno B-A será considerado como un ciclo entero.
- Los semiciclos ocurren etre las termocuplas 3 y 5.
- El tiempo que demora el frente de combustión en realizar un ciclo se denomina como tiempo de ciclo (t_c).
- La temperatura promedio corresponde al promedio de las temperaturas máximas y mínimas de las termocuplas 3-4-5, considerando un semicilo A-B y uno B-A.
- Para calcular la velocidad del frente de combustión se utilizó la ecuación 4.1. Donde "d" representa la distancia entre termocuplas, "t_n" representa el tiempo en el que el frente de combustión se encuentra en la termocupla "n". Mientras que "t_{n-1}" representa el tiempo en el que el frente alcanza la termocupla "n-1".

$$V_{fc} = \frac{d}{t_n - t_{n-1}}[m/s] \tag{4.1}$$

4.1.1. Resultados Ensayos Mezclas Muy Ricas:

En las figuras 4.1; 4.2; 4.3 y 4.4 son presentadas las concentraciones de cada elemento gaseoso en función de la relación de equivalencia (ϕ):

- **Metano:**

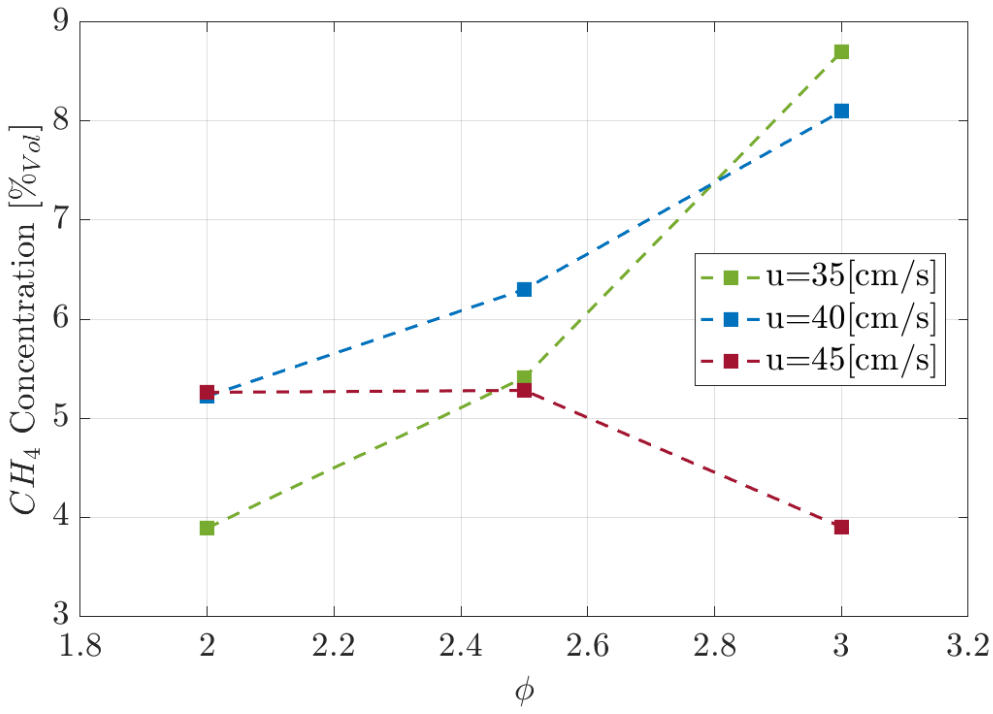


Figura 4.1: Concentración de Metano.

- **Monóxido de Carbono:**

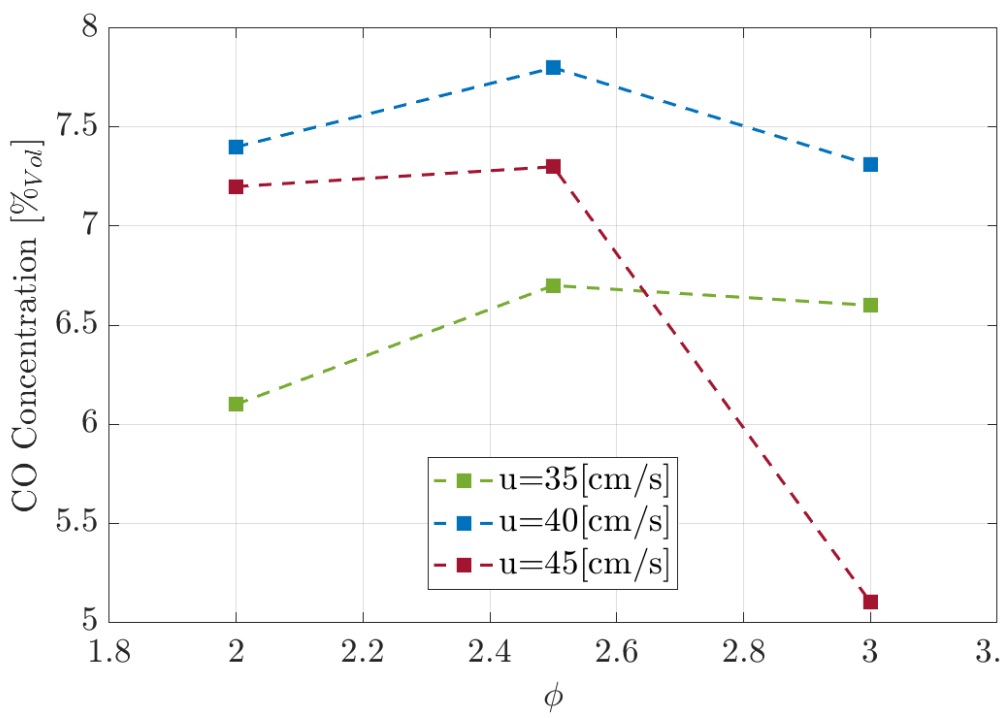


Figura 4.2: Concentración de Monóxido de Carbono.

- **Dióxido de Carbono:**

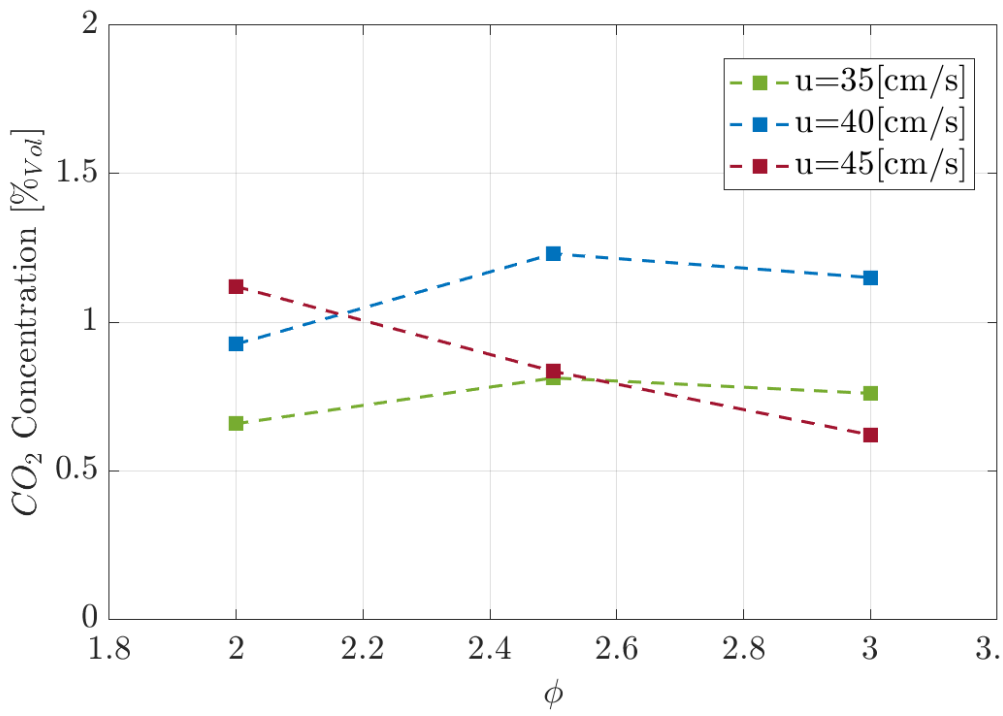


Figura 4.3: Concentración de Dióxido de Carbono.

- **Hidrógeno:**

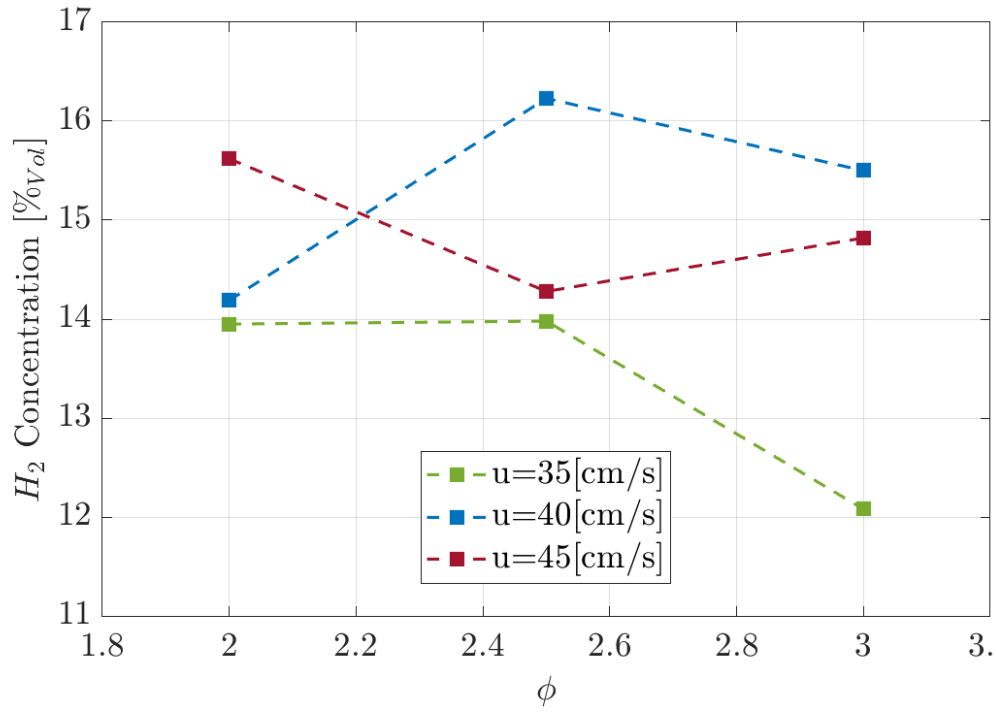


Figura 4.4: Concentración de Hidrógeno.

Las emisiones gaseosas para mezclas muy ricas arrojan que los principales elementos producto son el hidrógeno y el metano. Primordialmente esto se debe al proceso de reformado de gas metano que ocurre dentro del reactor MPI. La cantidad de metano que se mide corresponde a la mezcla rica que se utiliza, revela que del alto contenido de combustible gaseoso (gas natural) que se está inyectando queda un remanente sin reaccionar. El porcentaje de H_2 obtenido ronda el 16 %, marcando un máximo con una relación de equivalencia de 2.5 y una velocidad de filtración de 40 [cm/s]. Esto es respaldado por la literatura en esayos con reactores de medio poroso[34].

Para las tres velocidades de filtración ensayadas se observa que para 40 [cm/s] se obtiene en general niveles mas altos de concentración de todos los elementos analizados (H_2, CO, CO_2 y CH_4). Existe una tendencia al aumento de las emisiones de gaseosas en función de la velocidad de filtración, salvo para la velocidad de 45 [cm/s] en donde las concentraciones disminuyen.

En cuanto a la relación de equivalencia se aprecia una tendencia al aumento en las emisiones a medida que ésta aumenta, excepto por la relación de equivalencia ϕ=3 en donde para cada velocidad de filtración se observa una disminución en los gases emitidos. En general el ensayo con ϕ=3 demuestra un escape en la tendencia de la producción de gases, aumentando o disminuyendo considerablemente la concentración de un determinado gas. Esto se puede deber a la cantidad de ensayos realizados para ϕ=3, ya que al haber podido realizar menos ensayos puede existir un mayor error en la medición.

Para contar con un análisis completo sobre el hidrógeno producido se calcula el porcentaje de conversión, este establece la relación entre los elementos que poseen hidrógeno que ingresaron, versus la cantidad de hidrógeno medido en los gases emitidos por el reactor. Para el caso de la línea base, el único compuesto que posee hidrógeno es el gas natural (metano), por lo que la conversión de hidrógeno se realiza en función del gas metano ingresado y el H_2 medido.

Analisis de Gases:
La reacción química que describe de manera general lo que ocurre:

$$2CH_4 + O_2 \longrightarrow 2CO + 4H_2 \tag{4.2}$$

Para calcular el grado de conversión ("Yield") de hidrógeno se utiliza la ecuación 4.3, se calcula en base al metano incorporado.

$$Y_{H_2} = \%H_2 = \frac{Y_{H2,medido}}{2 \cdot Y_{CH4,inyectado}} \tag{4.3}$$

Para el grado de conversión de monóxido de carbono:

$$Y_{CO} = \frac{Y_{CO,medido}}{Y_{CH4,inyectado}}. \tag{4.4}$$

Donde:

- $Y_{H2,medido}$: Fracción molar o volumétrica obtenida a partir del análisis de gases en el cromatógrafo.
- $Y_{CH4,inyyectado}$: Fracción molar o volumétrica del flujo de metano inyectado al reactor.
- $Y_{CO,medido}$: Fracción molar o volumétrica obtenida a partir del análisis de gases en el cromatógrafo.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos de los analisis de gases en cromatografía:

Tabla 4.2: Resultados Cromatógrafía y cálculo de Yield H_2 y CO.

ϕ	u **[cm/s]**	Y CH_4	%vol $H_{2,medido}$	%vol CO_{medido}	Y H_2	Y CO
2	35	0.183	13.95	6.1	38.03	32.26
2	40	0.183	14.19	7.4	38.67	40.33
2	45	0.183	15.62	7.2	42.55	39.22
2.5	35	0.219	13.98	6.7	31.88	30.55
2.5	40	0.219	16.23	7.8	37.07	35.58
2.5	45	0.219	14.28	7.3	32.53	33.26
3	35	0.252	12.08	6.6	23.94	26.16
3	40	0.252	15.05	7.3	30.73	28.98
3	45	0.252	14.82	5.1	29.40	20.23

Se grafica el (%) de conversión de hidrógeno:

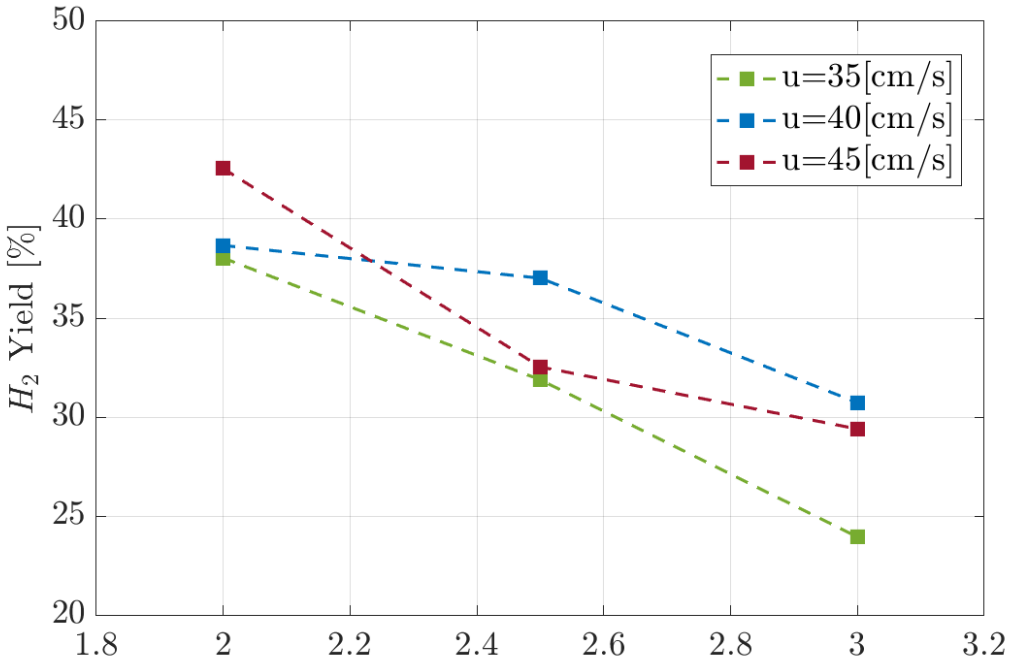


Figura 4.5: Yield de H_2.

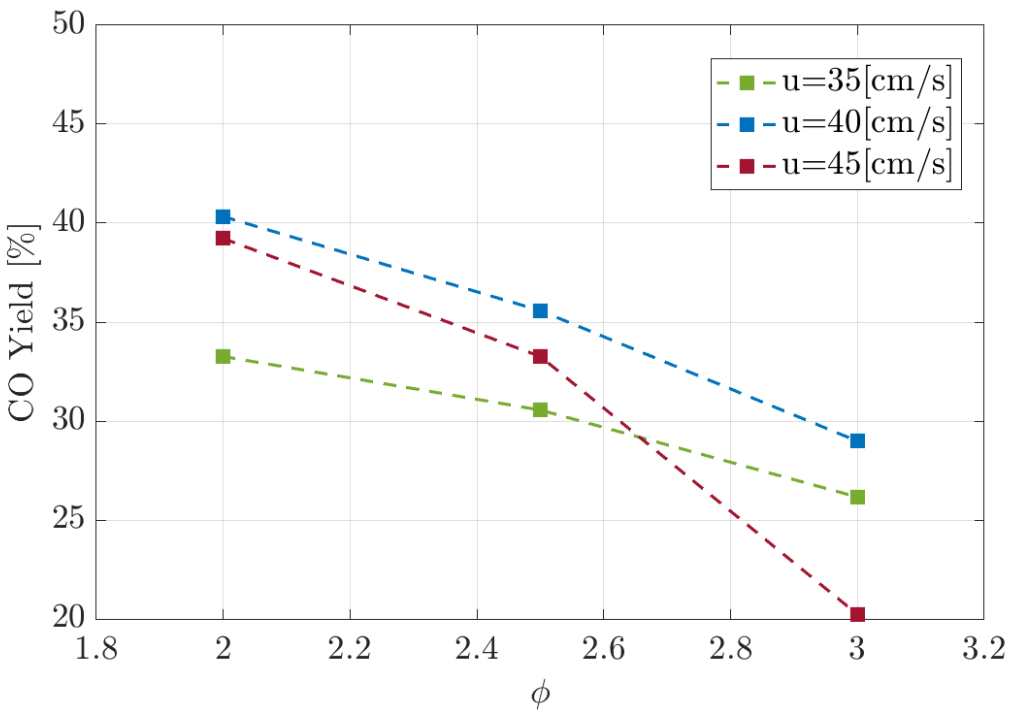


Figura 4.6: Yield de CO.

En cuanto a la conversión de H_2 se observa que se maximiza para una relación de equivalencia de 2 y a una velocidad de filtración de 45 [cm/s], mientras que para las relaciones de equivalencia 2,5 y 3 la máxima conversión de hidrógeno se produce a una velocidad de 40 [cm/s]. De esta forma se observa que para una misma velocidad de filtración pueden existir altos o bajos índices de conversión de H_2 dependiendo de la relación de equivalencia a la cual se produzca la combustión, por lo que el caudal de combustible gaseoso inyectado no es el único factor a considerar sino también flujo de oxidante ingresado.

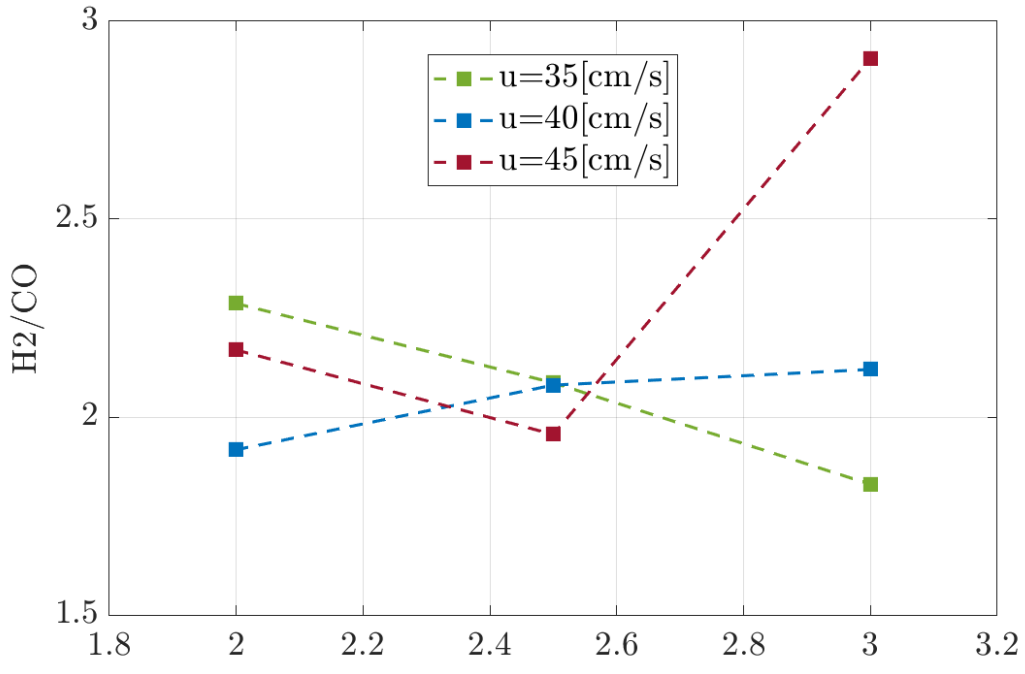
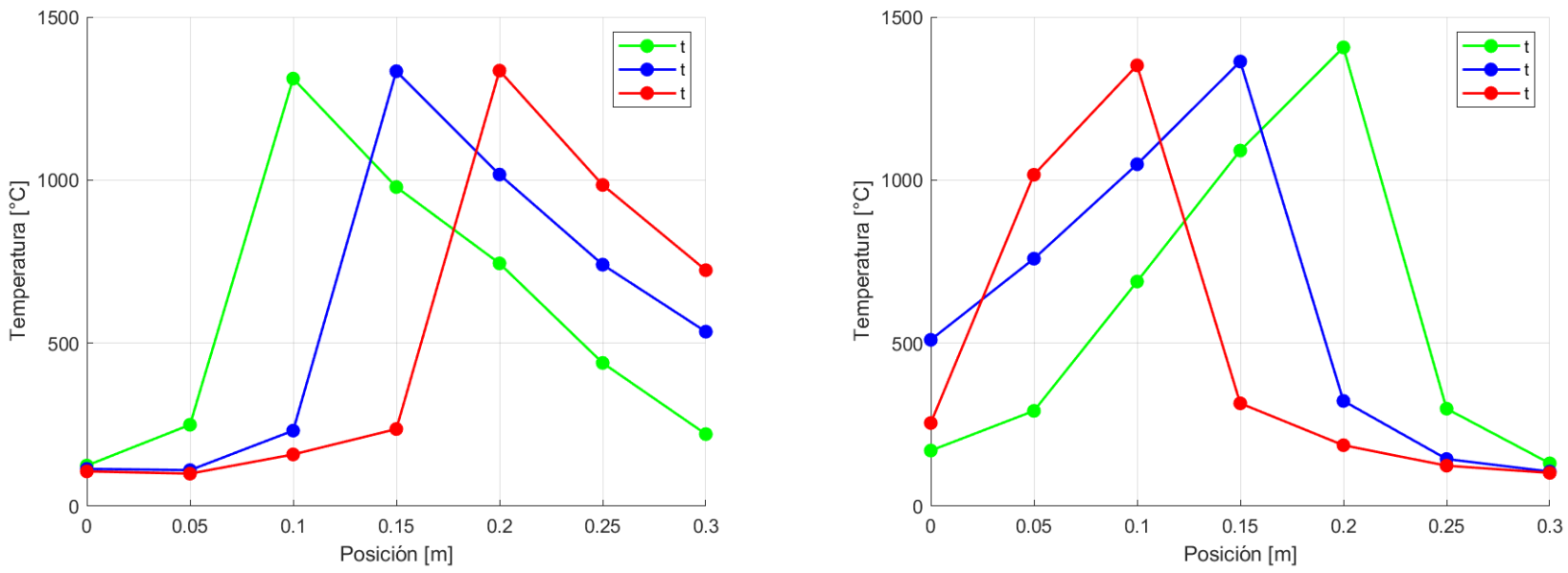


Figura 4.7: Relación de generación de gases H_2/CO.

Se busca que en el proceso se mantenga una relación 1:2 entre las emisiones de CO e H_2 como parámetro óptimo para la generación de combustibles gaseosos. Para las velocidades de filtración de 30 y 45 [cm/s] se observa que a medida que aumenta el ϕ esta relación cae por debajo de 2, con la excepción del punto de operación de u=45 y ϕ=3 en donde la relación se escapa de la tendencia alcanzando un factor de 2.8. Mientras que para la velocidad de filtración de 40 [cm/s] existe una estabilización relativa en cuanto a una relación de 2 para los tres ϕ ensayados.

Los resultados térmicos y de velocidad del frente de combustión (V_{fc}) se presentan según semiciclo, descrito desde la posición A hacia la B.



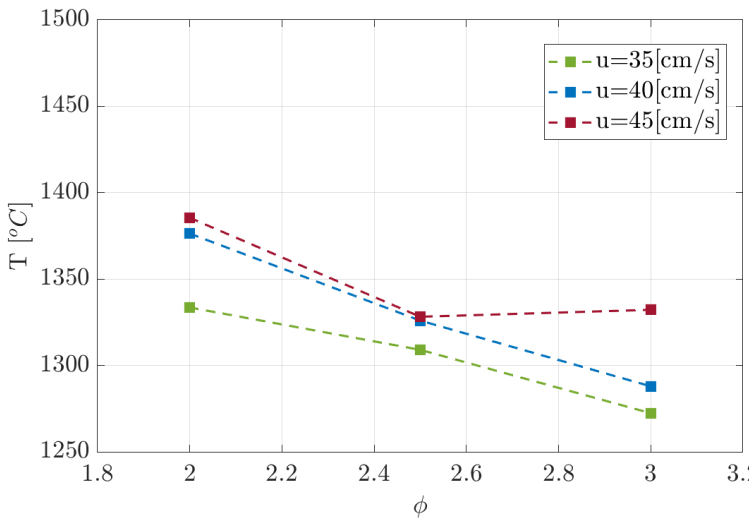
(a) Semiciclo A-B.

(b) Semiciclo B-A.

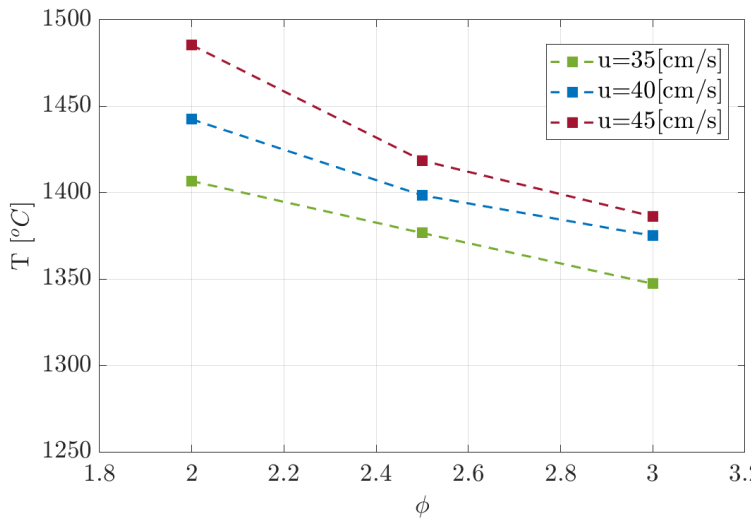
Figura 4.8: Perfil térmico por semi ciclo

En las dos direcciones en las cuales se analiza el comportamiento del frente de combustión, se distingue claramente como avanza desde un tiempo t1(verde), luego t2(azul) y finalmente t3(rojo). Si superponemos los gráficos, en donde cada punto del eje de las abscisas representa

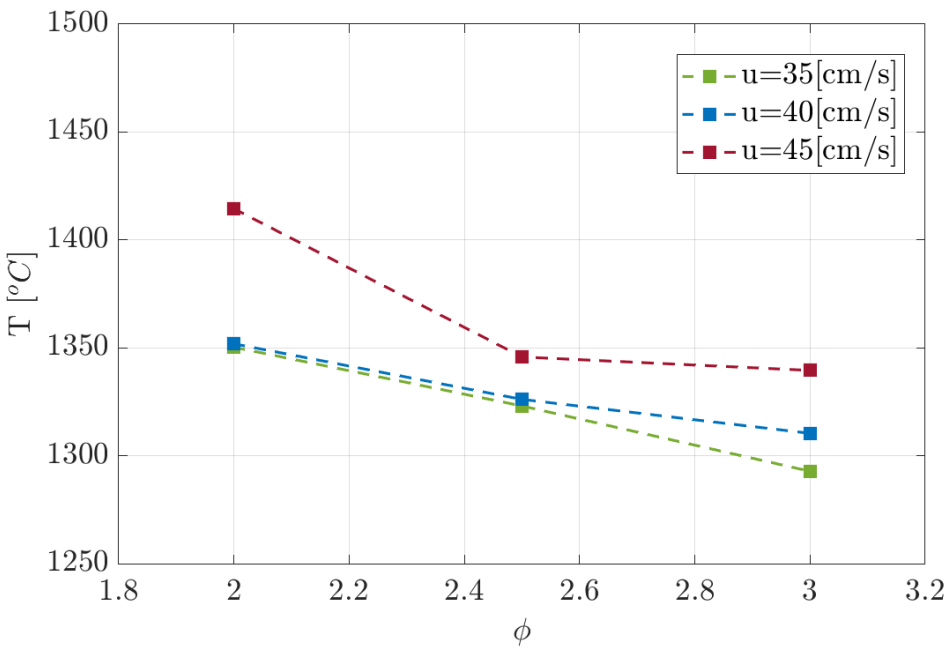
una termocupla, se logra ver el perfil pseudo trapezoidal que se esperaba obtener según los estudios leídos[19, 24]. Las temperaturas máximas alcanzadas, así como la velocidad del frente de combustión, son analizadas por semi ciclo. Para el caso de temperaturas y velocidades promedio se presenta un gráfico general del ensayo.



(a) Temperatura máx. semi ciclo A-B.



(b) Temperatura máx. semi ciclo B-A.



(c) Temperatura máxima promedio.

Figura 4.9: Temperatura máxima alcanzada.

Se aprecia claramente como en el sentido B-A existe un aumento en las temperaturas alcanzadas, se presume que esto se produce debido a la hermeticidad que existe solamente en ese sentido, ya que en el sentido A-B existe la entrada por donde se precalienta el reactor, por lo que se pueden producir fugas a pesar de estar cerrada con greda.

Además de contar con las temperaturas alcanzadas experimentalmente, se realiza el cálculo de la temperatura adibática de las condiciones de combustión planteadas. Esta temperatura es función de la relación de equivalencia de la mezcla y el combustible utilizado. Para esto se utiliza un programa de internet que en base a las condiciones de combustión (presión y relación de equivalencia) entrega los datos de temperatura adiabática en función de la relación de equivalencia[35].

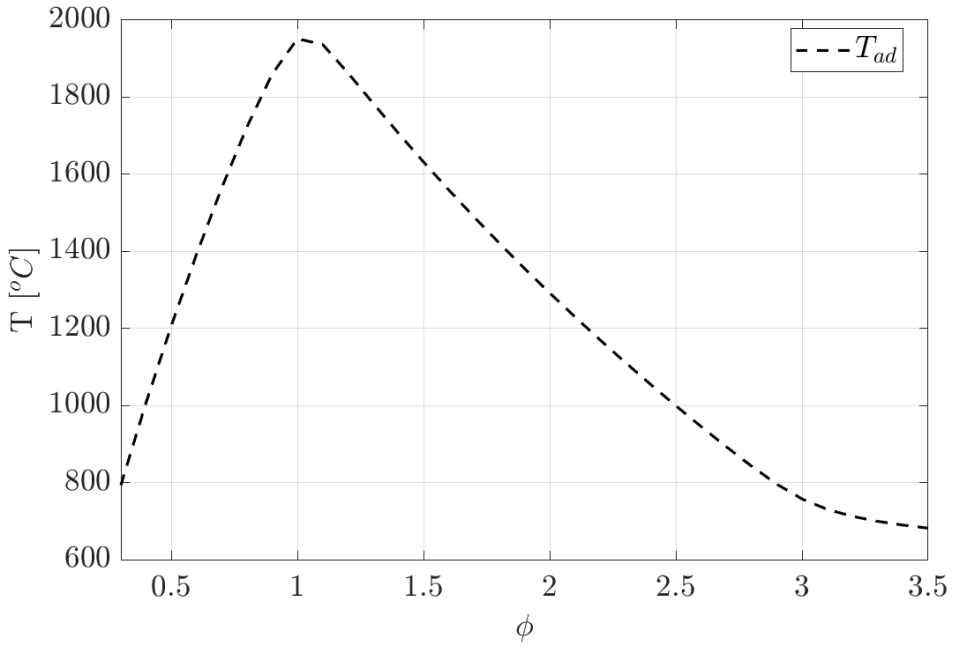


Figura 4.10: Temperatura adiabática del proceso.

Se incorporan en un mismo gráfico las temperaturas experimentales y adiabáticas:

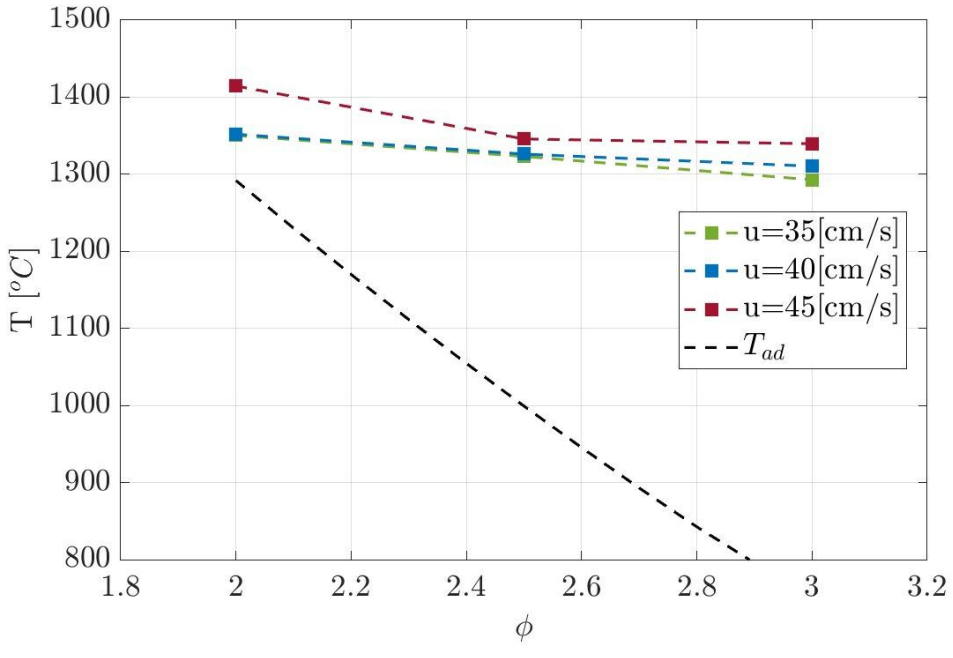
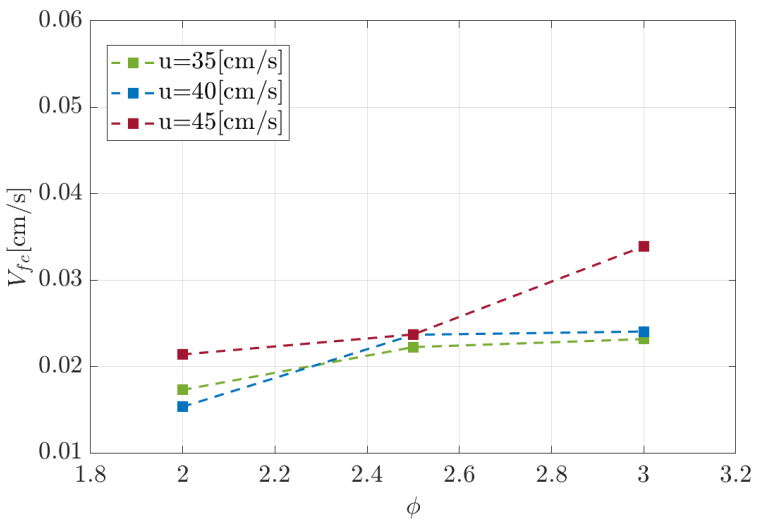


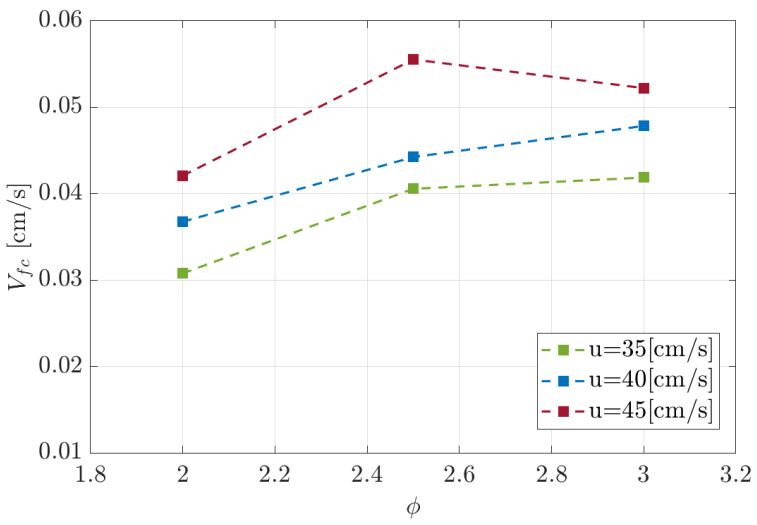
Figura 4.11: Temperaturas experimentales y adiabática del proceso.

En cuanto a la velocidad del frente de combustión, ésta fue calculada encontrando el momento exacto cuando se alcanza la máxima temperatura en cada termocupla. Para objetivos del proyecto se buscó que el frente de combustión viajase solamente entre las termocuplas 3 y 5, por lo que para el cálculo de la velocidad sólo hubo que considerar estos 3 puntos. De esta forma por medio del analizador de datos se midió el tiempo que el frente demoraba en alcanzar cada termocupla. Como cada termocupla se encuentra equidistante una de la otra (50 [mm]) el cálculo de la velocidad se simplifica bastante.

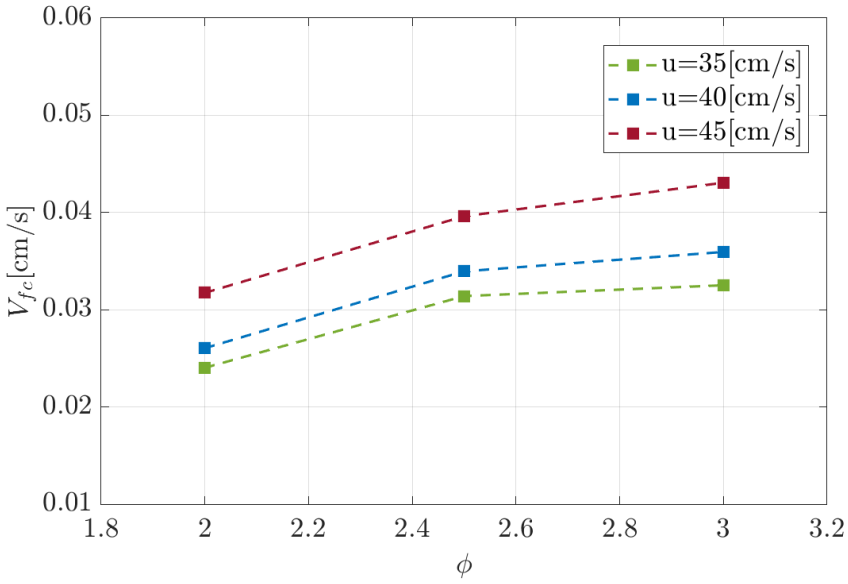
En la figura 4.12 se presentan las velocidades de filtración calculadas para las distintas condiciones. Se puede observar que ésta tiene un régimen aguas abajo en el reactor y es mayor a medida que aumenta tanto la velocidad de filtración y la relación de equivalencia. Esto se debe a que cuando aumentan ambas condiciones existe una mayor transferencia de calor de la mezcla que favorece un flujo más turbulento y genera una mayor velocidad del frente de combustión que viaja a lo largo del reactor.



(a) Velocidad de propagación semiciclo A-B.



(b) Velocidad de propagación semiciclo B-A.



(c) Velocidad de propagación promedio.

Figura 4.12: Velocidad de propagación del frente de combustión.

Tabla 4.3: Temperaturas y velocidades de propagación.

ϕ	u **[cm/s]**	**T[ºC]**	V_{fc} $[cm/s]$
2	35	1350.29	0.024
2	40	1351.87	0.026
2	45	1414.42	0.031
2.5	35	1323.08	0.031
2.5	40	1326.12	0.033
2.5	45	1345.76	0.039
3	35	1292.81	0.032
3	40	1310.39	0.035
3	45	1339.54	0.043

4.1.2. Resultados Ensayos Mezclas Muy Pobres:

Los resultados gaseosos son presentados acorde a las relaciones de equivalencia muy pobre y se presentan los ensayos para los que se logró la modalidad recíproca. Velocidades de filtración (40 [cm/s] y 45 [cm/s]).

- **Oxígeno:**

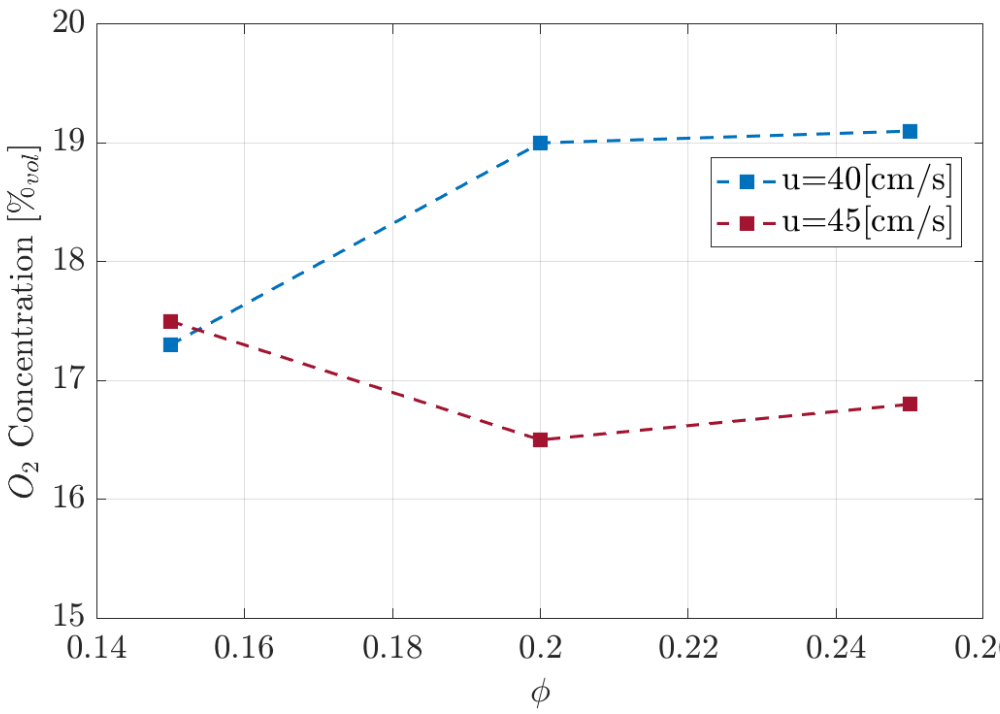


Figura 4.13: Concentración de Oxígeno.

- **Monóxido de Carbono:**

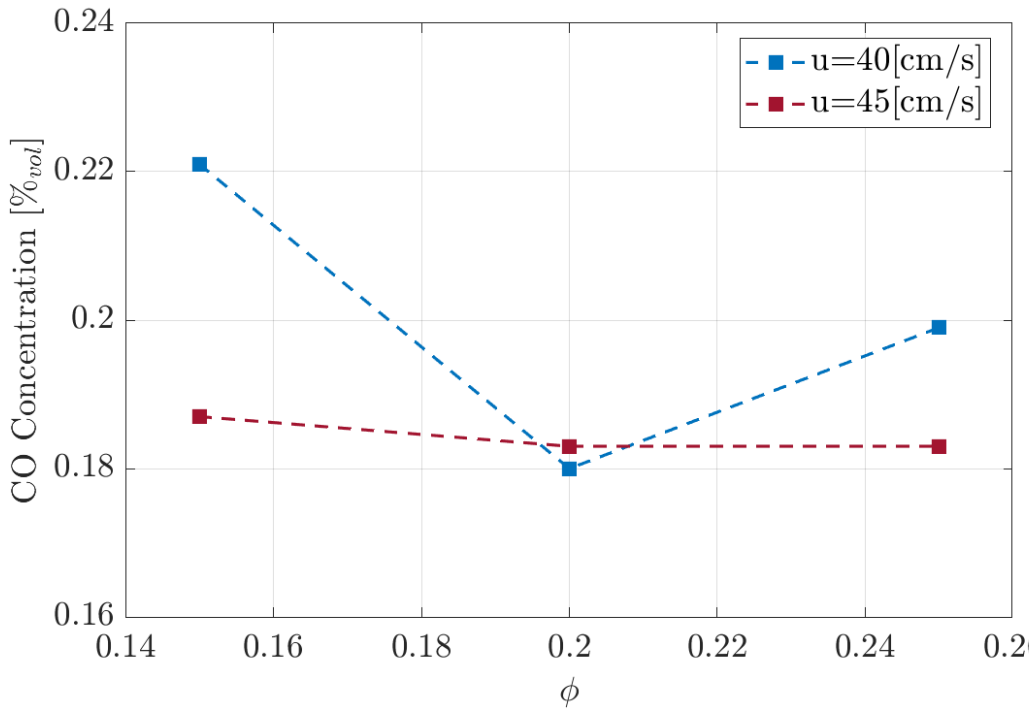


Figura 4.14: Concentración de Monóxido de Carbono.

- **Dióxido de Carbono:**

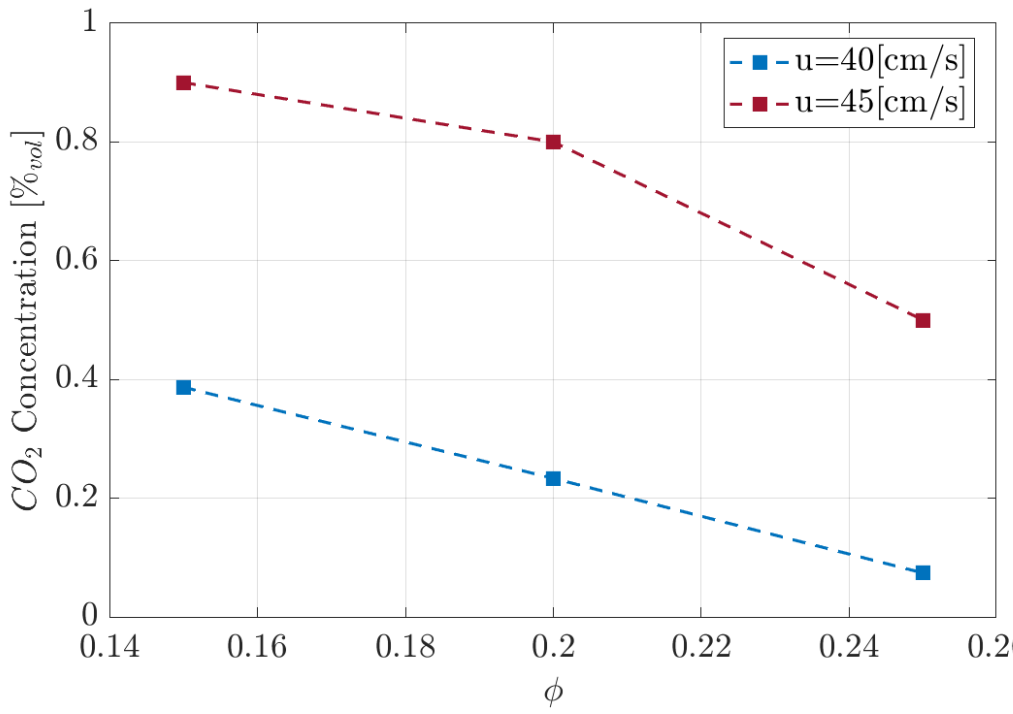
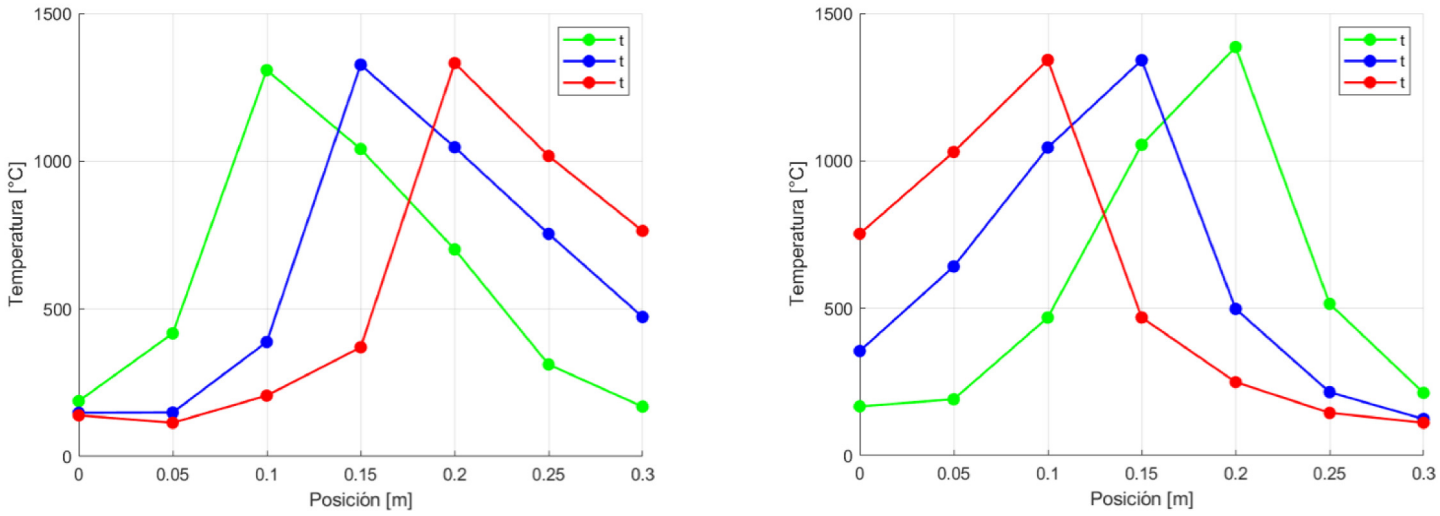


Figura 4.15: Concentración de Dióxido de Carbono.

Los gráficos demuestran que el elemento predominante es el oxígeno, lo que se condice con el tipo de mezcla pobre en comustible, ya que la mezcla se encuentra saturada principalemte con oxidante y no combustible. Para el caso del monóxido de carbono las mediciones demuestran una tendencia a la baja a medida que se aumenta de ϕ, las concentraciones para una velocidad de 40 [cm/s] son las que mas varían, ya que para la velocidad de u=45 [cm/s] se observa uniformidad en la concentración producida. Para el caso del dióxido de carbono se aprecia una clara tendencia a disminuir a medida que aumenta el ϕ, con un máximo en ϕ=0.15 y u=45 [cm/s]. En todo momento la concentración de CO_2 es mayor para una velocidad de 45 [cm/s] que para 40 [cm/s].

El gráfico del perfil térmico muestra la temperatura en tres unidades de tiempo diferentes t1 (verde), t2 (azul) y t3 (rojo) para cada termocupla arregladas a lo largo del reactor cada 50 [mm]. Se presentan los casos en los cuales se logra la modalidad recíproca y por semi ciclo.

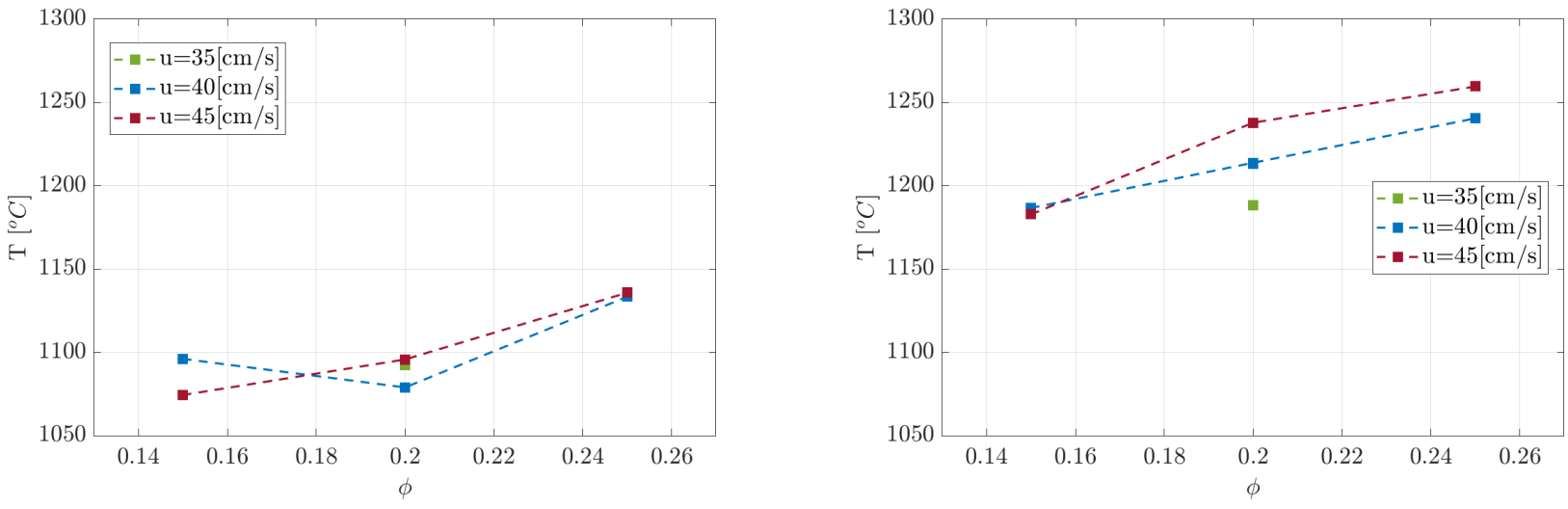


(a) Semi ciclo A-B.

(b) Semi ciclo B-A.

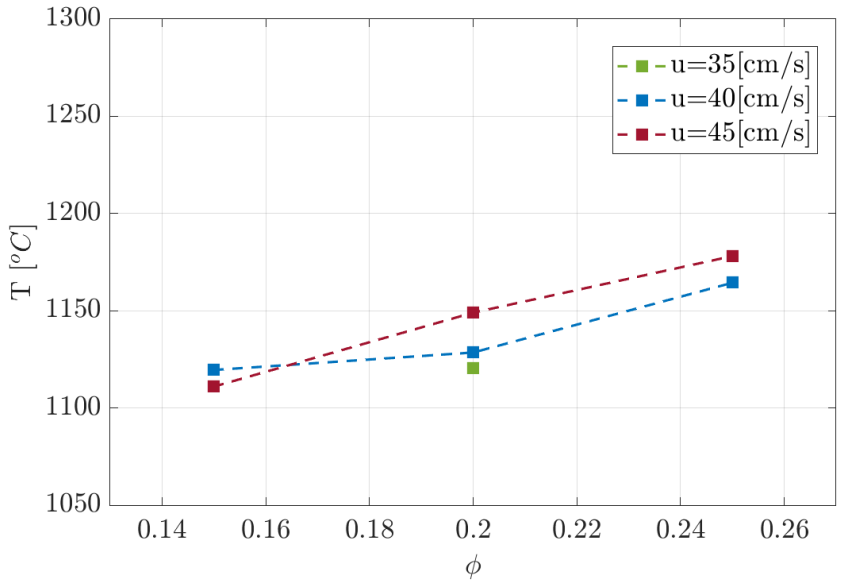
Figura 4.16: Perfil térmico por semi ciclo.

Las temperaturas máximas alcanzadas:



(a) Temperatura máx semi ciclo A-B.

(b) Temperatura máx. semi ciclo B-A.

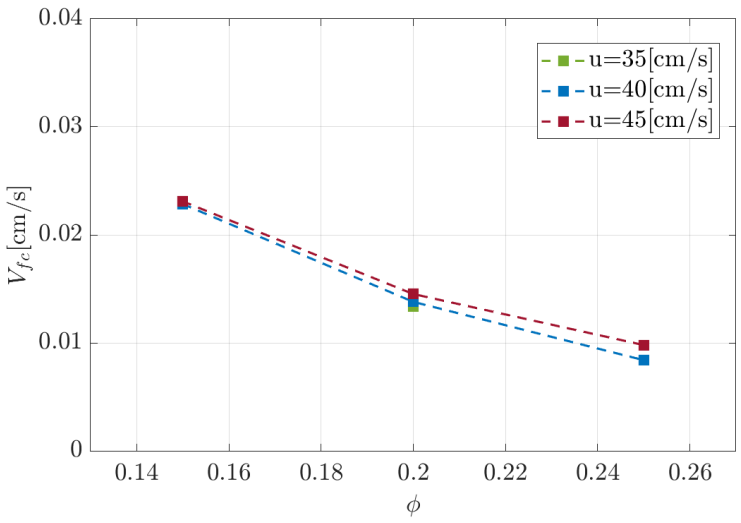


(c) Temperatura máxima promedio.

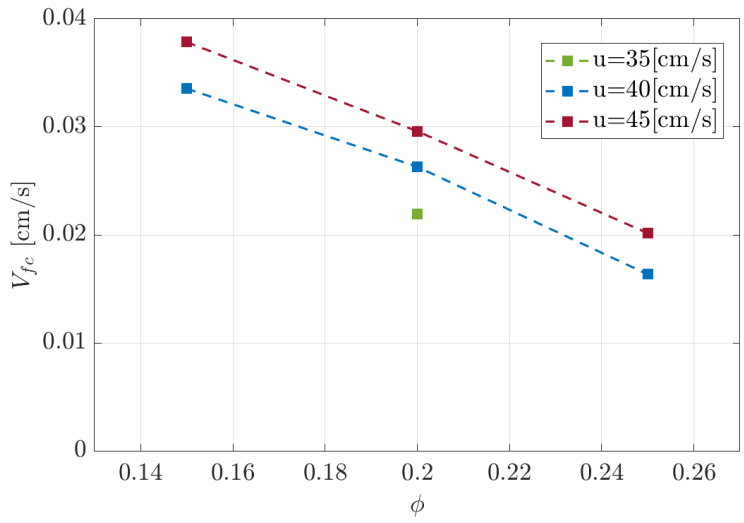
Figura 4.17: Temperatura máxima alcanzada.

Las máximas temperaturas alcanzadas se logran a un ϕ de 0.25 en ambos sentidos de propagación, como también para una velocidad de 45 [cm/s] y estas temperaturas se sitúan entre los 1100-1200[ºC]. De la misma forma que para las mezclas ricas se observa una superioridad de las temperaturas cuando el frente de combustión viaja en sentido B-A. Para estas mezclas, contrastando con la figura 4.10, se puede apreciar como también se logra superar la temperatura adiabática.

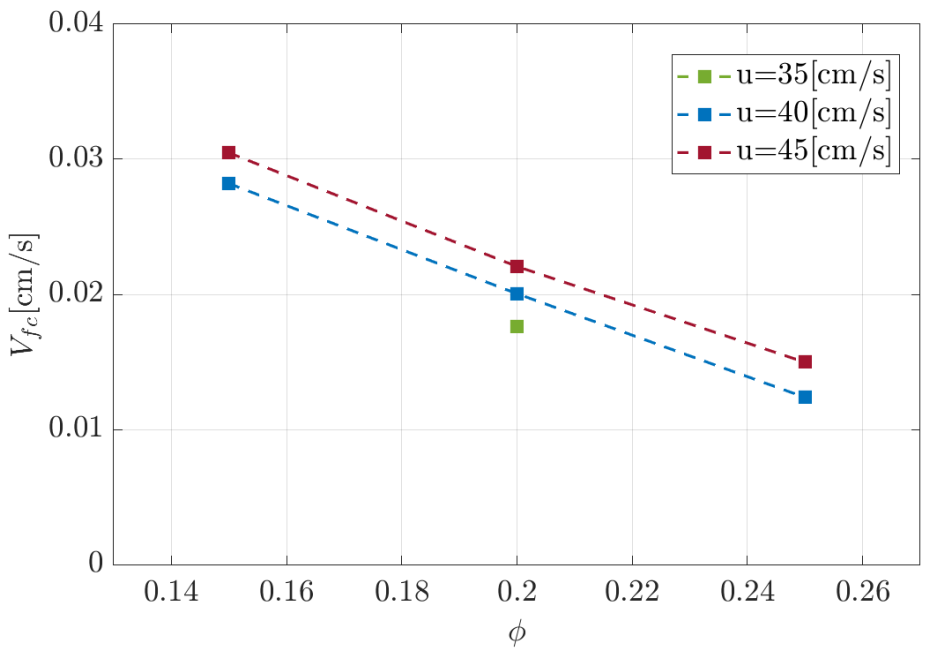
Velocidades del frente de combustión:



(a) Velocidad de propagación semiciclo A-B.



(b) Velocidad de propagación semiciclo B-A.



(c) Velocidad de propagación promedio.

Figura 4.18: Velocidad de propagación del frente de combustión.

En cuanto a las velocidades del frente de combustión (V_{fc}), se observa a medida que aumenta la velocidad de filtración también lo hace V_{fc}, logrando una máxima a una velocidad de filtración de 45 [cm/s] y en un ϕ de 0.15. En cuanto al comportamiento del frente de combustión en relación al ϕ de ensayo, se observa un comportamiento inversamente proporcional para todas las velocidades de filtración, alcanzando un mínimo para un ϕ de 0.25 y u=40 [cm/s].

Tabla 4.4: Temperaturas y velocidades de propagación.

ϕ	u **[cm/s]**	**T[ºC]**	V_{fc} $[cm/s]$
0.15	40	1119.55	0.028
0.15	45	1111.00	0.030
0.20	35	1120.31	0.017
0.20	40	1128.53	0.020
0.20	45	1149.02	0.022
0.25	40	1164.39	0.012
0.25	45	1178.11	0.015

4.2. Línea base con vapor

Para la adición de vapor se instala un generador de vapor de precisión, marca Cellkraft y modelo E-1500. Este generador de vapor de precisión es controlado de manera manual por medio de un panel de control "touchscreen". Permite establecer la temperatura, caudal y presión a la cual se entrega el vapor de agua. Para el caso de todos los ensayos que utilizaron adición de vapor se configuró a una temperatura de 150 [ºC] y a una presión de 1 [bar]. La inyección de vapor se hace por medio de una cañería ingresando al reactor en conjunto con el gas natural y el aire. Los ensayos iniciales se hacen incorporando un caudal equivalente al del combustible, posteriormente se realizarán ensayos aumentando la relación vapor/combustible (relaciones ensayadas 0.5:1- 1:1 – 1.5:1- 2:1).

El caudal de vapor es regulable y el rango de operación que posee la unidad de generación es desde 0-25 [g/min]. Dado que los controladores de flujo de aire y gas natural se encuentran regulado en [l/min] es necesario realizar la equivalencia desde g/min a l/min para poder trabajar. Para los ensayos de vapor se definió una velocidad de filtración y una relación de equivalencia, estas fueron en base a las mejores condiciones de producción de hidrógeno logradas en la caracterización de la línea base.

Tabla 4.5: Relación de equivalencia, velocidad de filtración y caudal de combustible.

PHI	**Velocidad de filtración [cm/s]**	**Caudal de GN [l/min]**
2.5	40	5.5

Para cada relación se obtuvieron distintas temperaturas y concentraciones de los gases producto. Así también la velocidad de filtración varía según el caudal de vapor añadido.

Tabla 4.6: Flujos de vapor utilizado.

Relación V:C	**Caudal Vapor[g/min]**	**Caudal Vapor[l/min]**
0.5	1.4	2.75
1	2.8	5.50
1.5	4.2	8.26
2	5,6	10.84

En base a la ecuación 3.4 presentada en el capítulo 3 para el cálculo del caudal total en función de la velocidad de filtración, se remplaza ingresando el nuevo caudal total:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q} + \dot{Q}_{vapor} \tag{4.5}$$

Incorporando el caudal de vapor al caudal total de la mezcla aire-combustible se obitnen los siguientes valores presentado en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: Caudal total con la adición de vapor.

Relación V:C	**Caudal Vapor[l/min]**	**Caudal Total con Vapor[l/min]**
0.5	2.75	27.93
1	5.50	30.68
1.5	8.26	33.44
2	10.84	36.02

Cabe destacar que el caudal total de combustible y aire a inyectar para lograr una velocidad de u=40 [cm/s] a una relación de equivalencia ϕ=2.5[-] son 25.18 [l/min] según la tabla 3.8. Remplazando el nuevo caudal (Q_{total}) en la ecuación:

$$u = \frac{Q[l/min]}{15,000 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot d^2} \tag{4.6}$$

De esta forma se obtienen los siguientes valores de las nuevas velocidades de filtración modificadas producto de la adición de vapor:

Tabla 4.8: Velocidad de filtración u[m/s] con adición de vapor.

Caudal Vapor[l/min]	**Nueva velocidad de filtración u [m/s]**
2.75	0.44
5.50	0.48
8.26	0.53
10.84	0.57

Se realizaron ensayos para su análisis en cromatografía gaseosa buscando los mismos elementos de combustión que se buscaron para los ensayos con mezclas muy ricas (H_2; CO; CO_2 y CH_4). Se observa que para todos los ensayo a distintos caudales de vapor añadido, el principal elemento obtenido es el Hidrógeno.

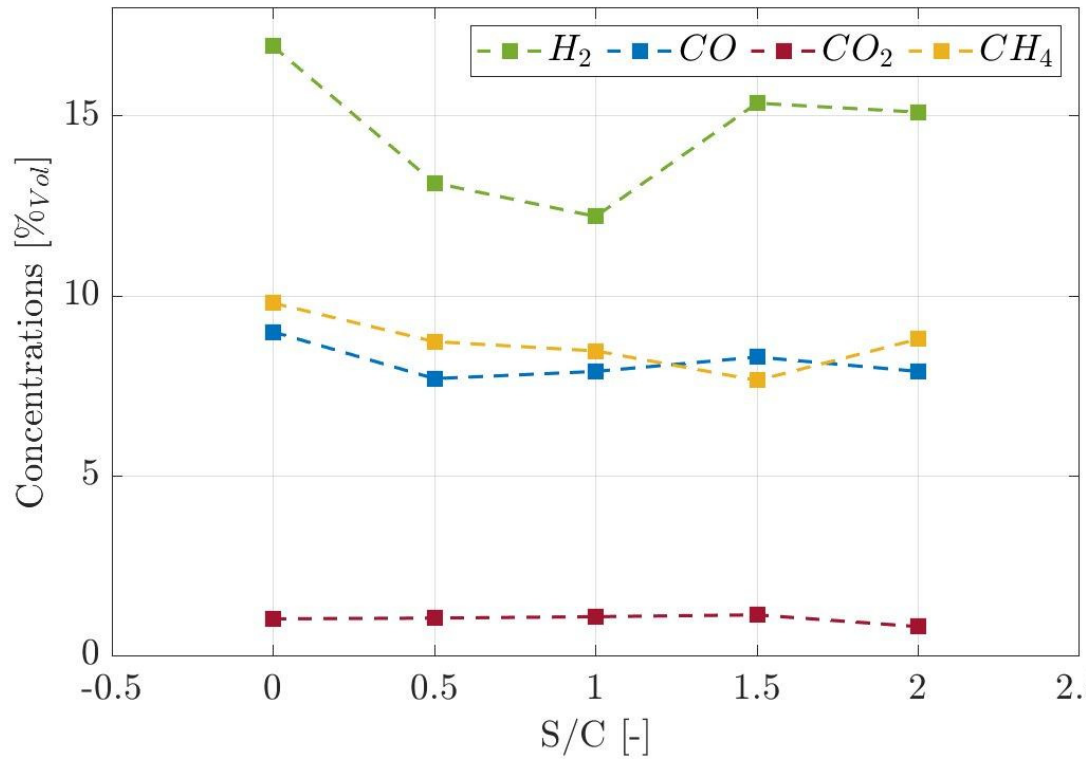


Figura 4.19: Gases producto en relación al vapor añadido.

Análisis de gases:

La ecuación que describe el proceso químico y permite el cálculo de conversión de hidrógeno, es la siguiente:

$$2CH_4 + 0.5O_2 + H_2O \longrightarrow 2CO + 5H_2 \tag{4.7}$$

Para calcular el grado de conversión de hidrógeno se utiliza la ecuación 4.7, se calcula en base al gas metano y vapor de agua que ingresan como gases reactantes.

$$Y_{H_2} = \frac{Y_{H2,medido}}{2.5 \cdot Y_{CH4,inyectado}} \tag{4.8}$$

Tabla 4.9: Resultados Cromatógrafo y cálculo de Yield de H_2.

$S:C$	Y CH_4	%vol $H_{2,medido}$	%vol CO_{medido}	Y H_2	Y CO
0	0.219	16.23	7.8	37.07	35.61
0.5	0.197	13.14	7.7	26.68	39.08
1	0.179	12.21	7.9	27.28	44.13
1.5	0.164	15.36	8.3	37.46	50.61
2	0.153	15.11	7.9	39.50	51.63

En cuanto a la producción de hidrógeno se observa que con respecto a la concentración ésta disminuye con la incorporación de vapor. Dentro de las relaciones de vapor incorporadas la que mejor producción de H_2 genera es la relación de 1.5 alcanzando una concentración de producción de sobre el 15 %. Para el caso del metano, existe una tendencia a la disminución a medida que aumenta el metano incorporado, de la misma forma para el monóxido de carbono. Este punto es muy importante ya que la disminución de gas metano permite una

mejor relación de producción entre el H_2 y CO. En el caso del dióxido de carbono este no sufre mayores modificaciones con la adición de vapor, se mantiene estable en todos los ensayos.

Se calcula el porcentaje de conversión tanto para H_2 como para CO:

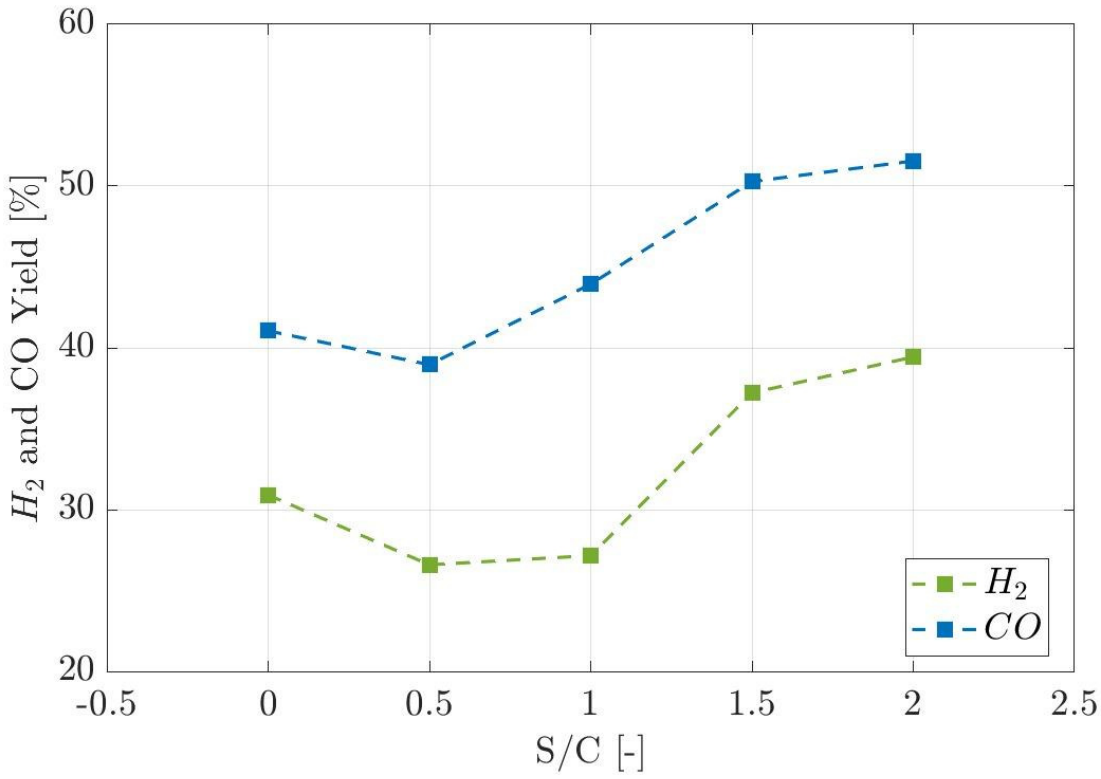


Figura 4.20: Yield de H_2 y CO en función de la adición de vapor.

El porcentaje de conversión de hidrógeno aumenta considerablemente con la adición de vapor, logrando un máximo de conversión del 40 % para una relación de adicion de vapor de 2. Esto concuerda con los estudios realizados en cuanto a la adición de vapor para la producción de gas de síntesis[36].

La temperatura máxima alcanzada y la velocidad del frente de combustión ($u_{fc}[m/s]$) en función de la relación vapor:combustible.

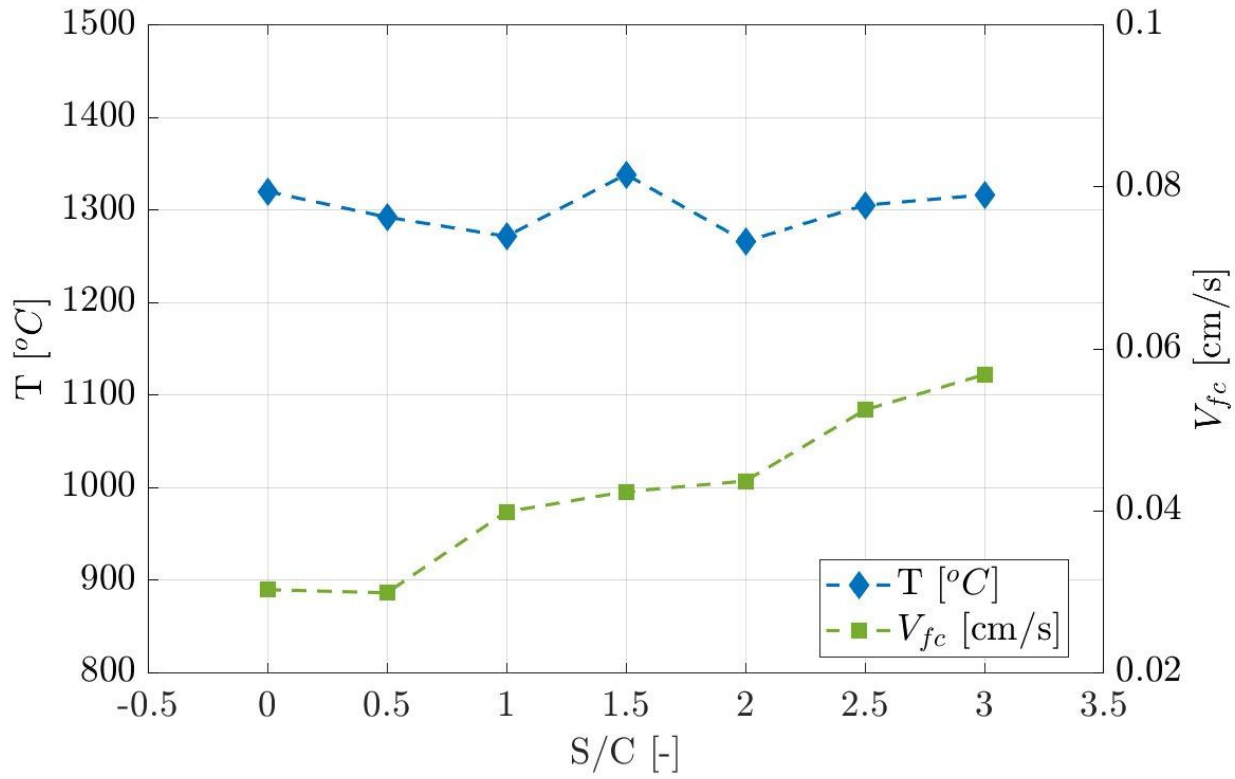


Figura 4.21: Temperatura máxima y velocidad del frente en relación al vapor añadido.

La temperatura de forma general sufre una disminución con la inyección de vapor, con un pequeño aumento sobre la temperatura sin adición de vapor, en la relación 1.5. Se presume que esto se debe a la reacción de reformado que genera una disminución de temperatura como se aprecia en la literatura[36]. Lo que respecta a la velocidad del frente de combustión (V_{fc}), se aprecia una tendencia clara de aumento a medida que aumenta la relación de vapor incorporado, alcanzando una mayor velocidad del frente para una relación de 2. Esto hace sentido ya que a mayor caudal incorporado al reacto, mayor debiese ser la velocidad a la cual el frente de combustión viaja.

4.3. Combustible sólido

Para el estudio del comportamiento de los dos combustibles sólidos se definen dos regímenes. Para el caso de la biomasa se define 1 ciclo para su análisis de gasificación, mientras que para el carbón se realizaron 2 ciclos para su análisis. Se presentan los perfiles térmicos por semi ciclo como en los casos anteriores, con tiempos t1 (verde), t2 (azul) y t3 (rojo). En cuanto a los parámetros operacionales se definieron los mismos que para la línea base con adición de vapor.

Tabla 4.10: Relación de equivalencia y velocidad de filtración.

PHI	**Velocidad de filtración [cm/s]**
2.5	40

Como condiciones de operación, se utilizan tres tamaños diferentes para cada combustible sólido. A su vez se define una cantidad de masa estándar para cada granulometría a ensayar. De esta manera se realiza un análisis entre el tamaño del combustible sólido y su porcentaje de masa restante luego de su gasificación.

Tabla 4.11: Granulometría Combustible Sólido.

Comb. Sólido	**Granulometría**	**Diam. equivalente [mm]**	**Masa estándar[g]**
Biomasa	#1	0.75	7.5
	#2	2.9	6.5
	#3	5.13	8.0
Carbón	#1	0.81	13.0
	#2	4.21	10.0
	#3	6.47	9.0

Los gases producto obtenidos en los ensayos:

- **Biomasa:**

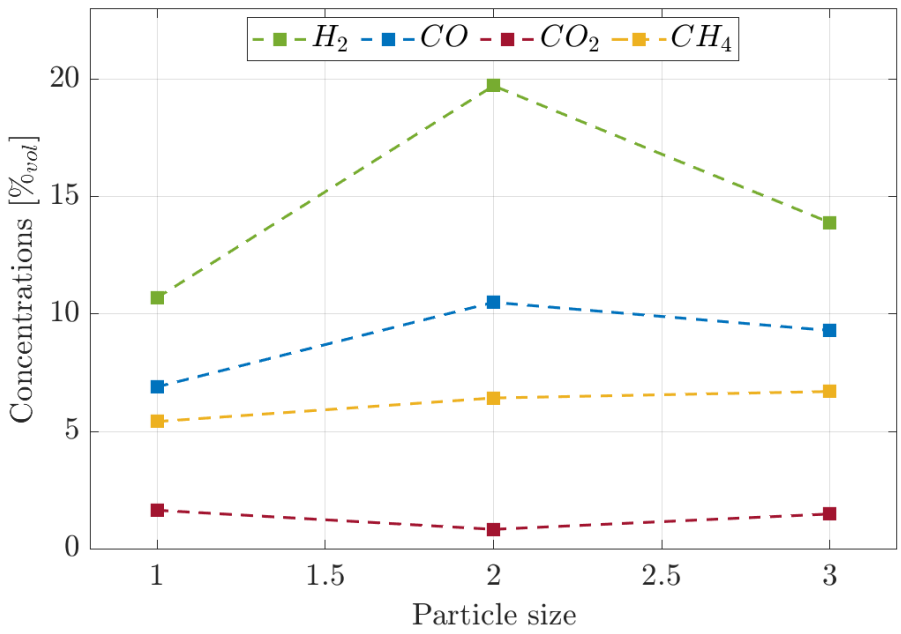


Figura 4.22: Gases producto Biomasa.

- **Carbón:**

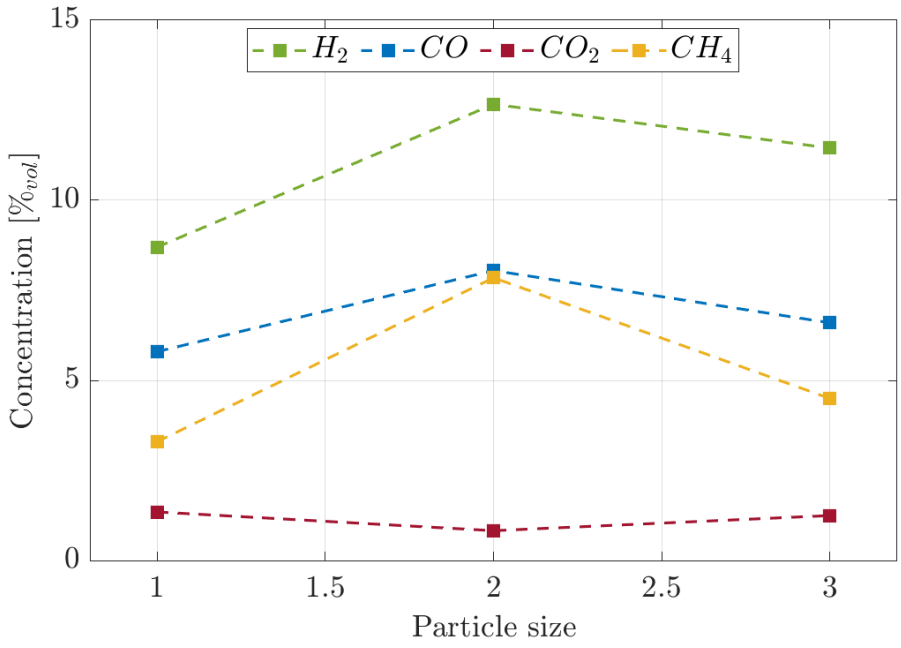


Figura 4.23: Gases producto Carbón.

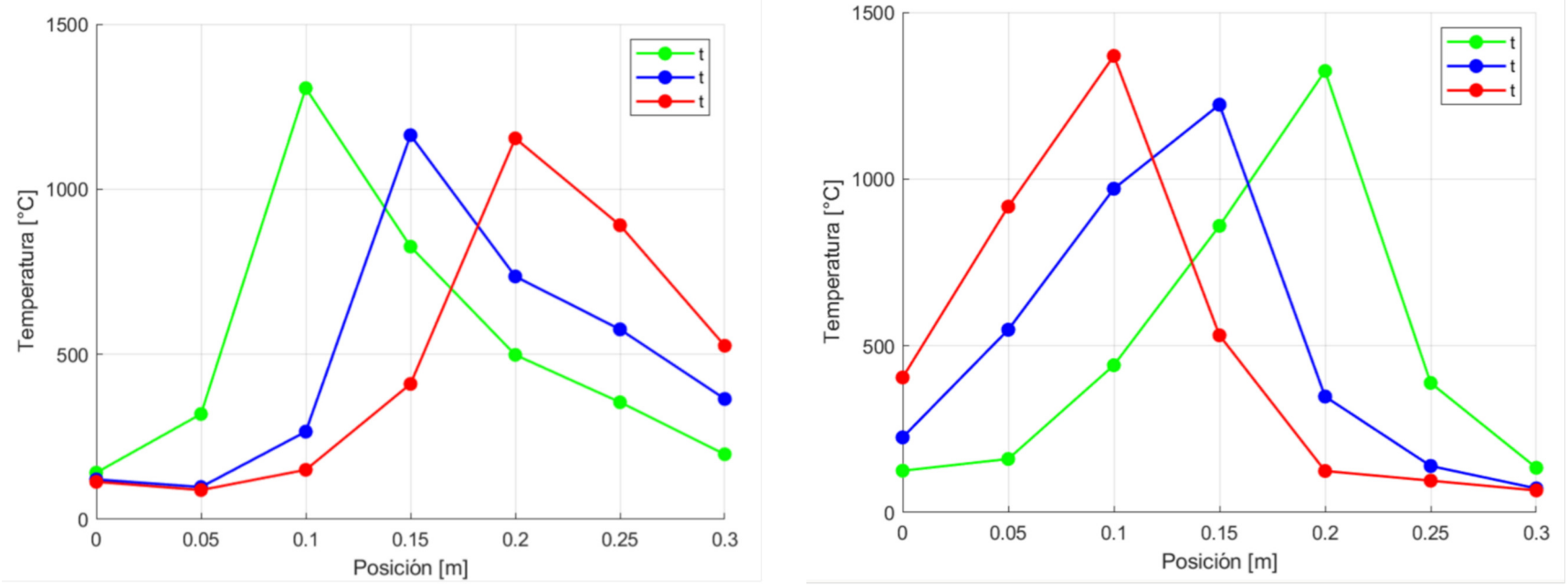
En cuanto a la biomasa, la mayor concentración de H_2 obtenido se da para su tamaño medio donde se alcanza un 20 %, manteniendo la relación 1:2 con la emisión CO. Dada las temperaturas alcanzadas y según lo establecido en la literatura se puede inferir que se produce un proceso de gasificación del combustible sólido biomasa[26, 37]. Para las emisiones de CH_4 se observa poca variación, manteniendo un rango de emisión entre un 5-7 %. La emisión de gas de dióxido de carbono es mínima para los 3 tamaños diferentes rondado un 2 %.

Para el caso del carbón, se observa una máxima emisión de H_2 para su tamaño medio al igual que en el caso de la biomasa alcanzando un 12 %, y a su vez manteniendo una relación 1:2

con la emisión de CO. La emisión de CH_4 es similar a los ensayos con biomasa logrando porcentajes entre 3-8 %. Según los parámetros establecidos por la literatura para la gasificación de carbón[25], se puede estabecer que no se logra una gasificación completa debido a que las temperaturas no fueron lo suficientemente altas, y que la presión de trabajo no supera 1 [bar].

Se presentan los perfiles térmicos por semi ciclo. Se establece 1 ciclo de operación para gasificar la biomasa y 2 ciclos de operación para el carbón.

- **Biomasa:**



(a) Semi ciclo A-B.

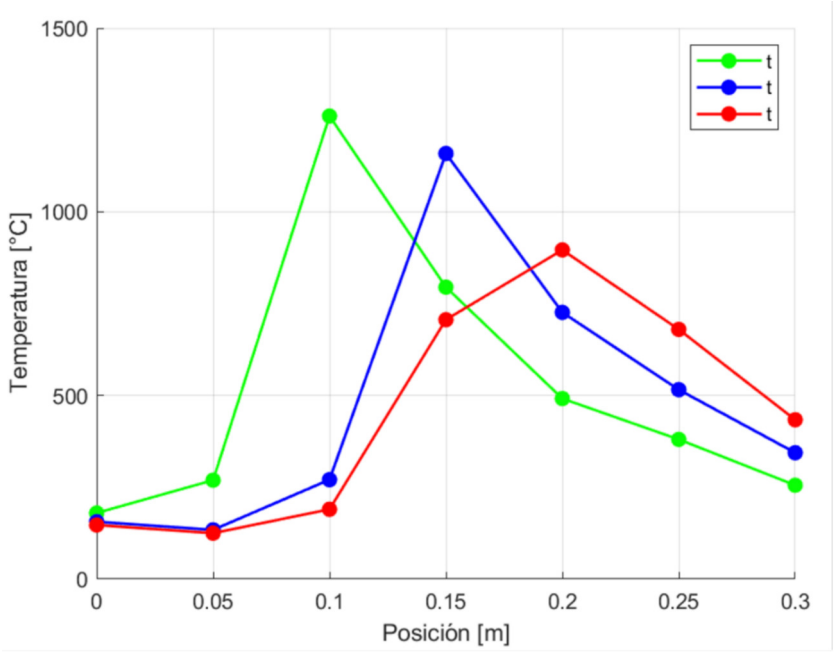
(b) Semi ciclo B-A.

Figura 4.24: Temperatura máxima alcanzada.

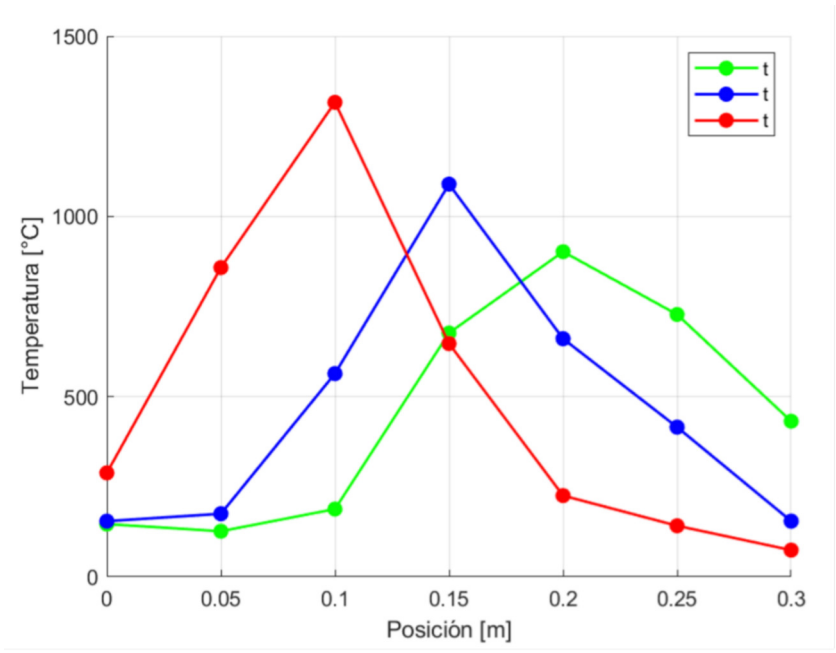
Se aprecia un descenso en la temperatura hacia el centro del reactor en el primer semi ciclo (sentido A-B), a diferencia del segundo semi ciclo en donde la temperatura aumenta alcanzando un nuevo máximo en el centro del reactor donde se encuentra el sólido.

La temperatura máxima en los ensayos con biomasa alcanzó los 1230 [ºC]. Se reconoce que se produce un proceso de gasificación por las temperaturas alcanzadas y los gases producto. La temperatura máxima alcanzada, se produce cuando el frente de combustión viaja en dirección B-A en la termocupla #3.

- **Carbón:**

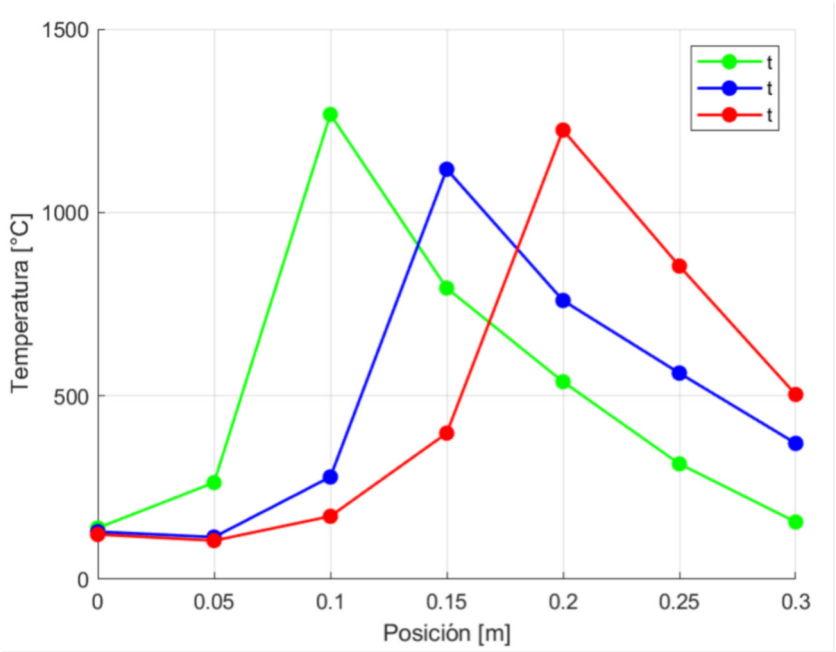


(a) Semi ciclo A-B.

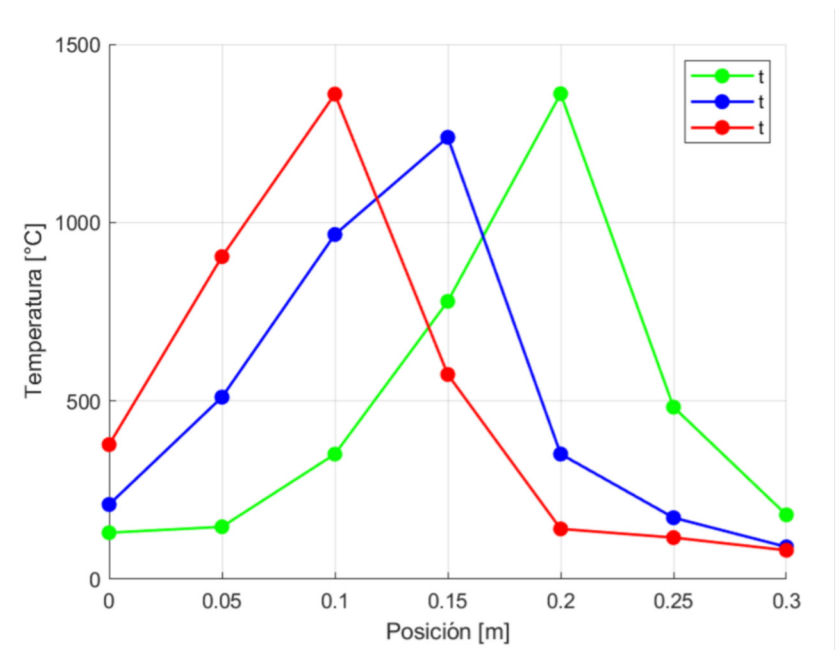


(b) Semi ciclo B-A.

Figura 4.25: Temperatura máxima alcanzada.



(a) Semi ciclo A-B.



(b) Semi ciclo B-A.

Figura 4.26: Temperatura máxima alcanzada.

La temperatura máxima alcanzada en los ensayos con carbón se situó en los 1160[ºC]. Esta temperatura se alcanzó al momento justo cuando el frente de combustión se encuetra en la zona de la termocupla número “3” y en la dirección B-A. Se observa como en el primer ciclo las temperaturas cercanas a la termocupla #7 descienden abruptamente, no obstante en el segundo ciclo las temperaturas se estabilizan logrando un aumento y formanto el perfil trapezoidal que describe el comportamiento recíproco en reactores de medio poroso.

Las temperaturas máximas y velocidades del frente de combustión:

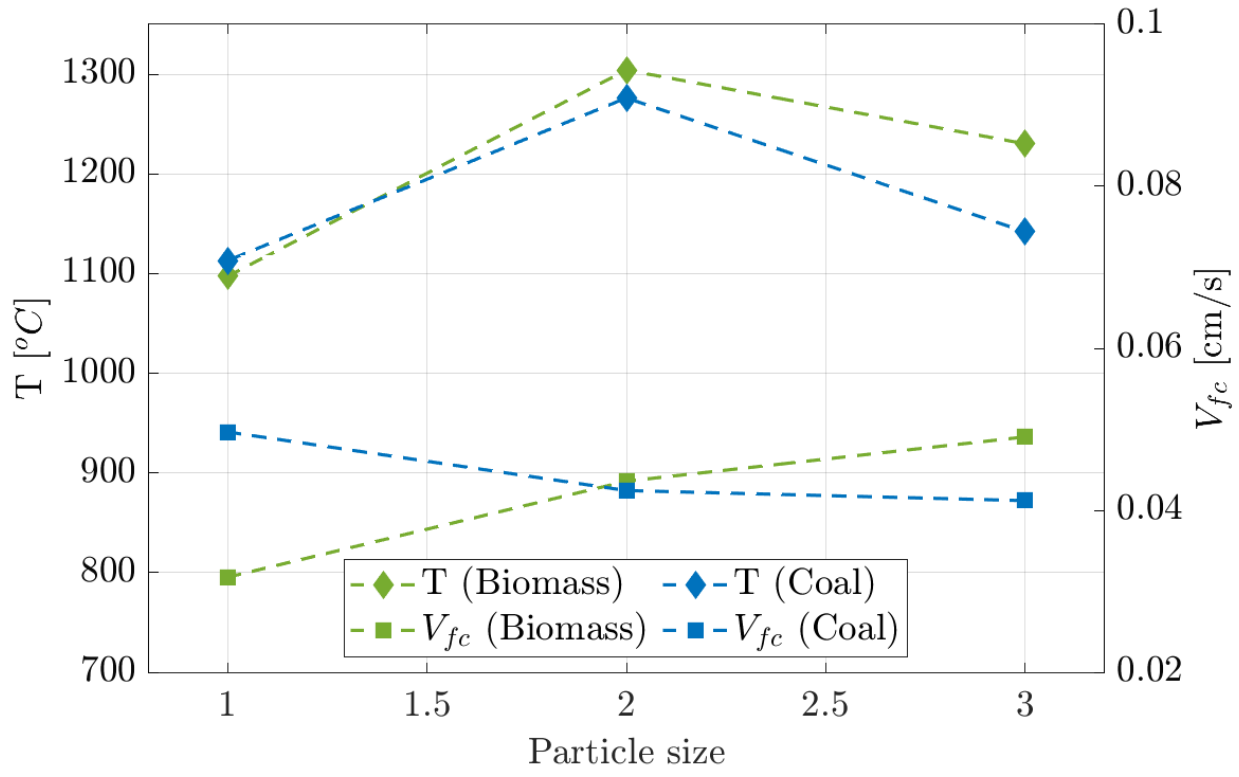


Figura 4.27: Temperaturas máximas y velociddes de propagación.

En el gráfico se puede apreciar como con la biomasa se logran mayores temperaturas para los tamaños #3 y #2 alcanzando los 1300 [ºC], mientras que en el caso del carbón éste alcanza una mayor temperatura para el tamaño fino (#1), no obstante se hace necesario señalar que para la granulometría fina en la biomasa no se logró una modalidad recíproca. Se presume que debido a su pequeño tamaño se produce aglomeración del sólido formando una especie de "tapón" impidiendo el flujo de gases reactantes. La máxima temperatura alcanzada para ambos sólido siempre se alcanzó con un tamaño medio (#2).

En cuanto a la velocidad del frente de combustión (V_{fc}), para el caso de la biomasa, se aprecia una tendendia a aumentar a medida que aumenta el tamaño. Esto coindice con el argumento de que el tamaño fino actúa como tapón impidiendo el paso del frente de combutión. En el caso del carbón, la máxima V_{fc} se da con un tamaño de partícula #1, existiendo una tendencia a disminuir a medida que se aumenta el tamaño del sólido. Una de las razones es la no gasificacion del carbón, impidiendo el desarrollo de las reacciones químicas que permiten un aumento en la velocidad del frente de combustión.

Se presenta en la figura 4.28 el porcentaje de reacción de cada combustible sólido en función de su tamaño.

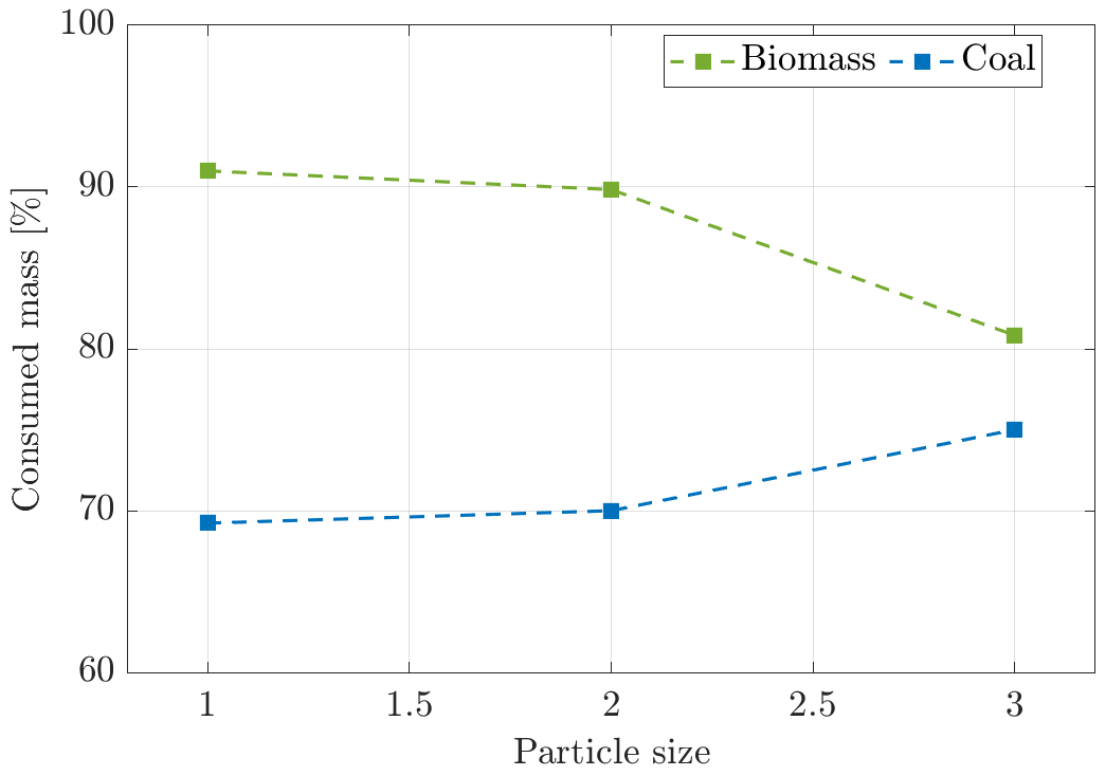


Figura 4.28: Porcentaje de masa restante del combustible sólido.

La biomasa presenta el mayor porcentaje consumido, alcanzando un nivel del 90 %, este porcentaje posee una tendencia a bajar a medida que aumenta el tamaño de particula y se puede inferir que es debido a que mientras mayor es el tamaño, menor es la superficie de contacto que posee el combustible sólido con el frente de combustión para generar su gasificación. En el caso del carbón, para todos sus tamaños el porcentaje de reacción fue bastante bajo, obteniendo un máximo porcentaje de masa consumida de 75 %. Estos bajos porcentaje de masa consumida dan base al argumento que a pesar de contar con temperaturas super adiabáticas, no son lo suficientemente altas como para producir una gasificación completa del carbón.

4.4. Combustible sólido con vapor

Para estos ensayos se mantuvo constante el caudal de vapor suministrado, se varió el tamaño y la cantidad de combustible sólido ingresado. El caual de vapor suministrado en todos los ensayos fue de 4.2 [g/min]. La tabla 4.12 muestra los parámetros de operación para el suminstro de aire y combustible gaeoso.

Tabla 4.12: Relación de equivalencia y velocidad de filtración.

PHI	**Velocidad de filtración [cm/s]**
2.5	40

- **Biomasa:**

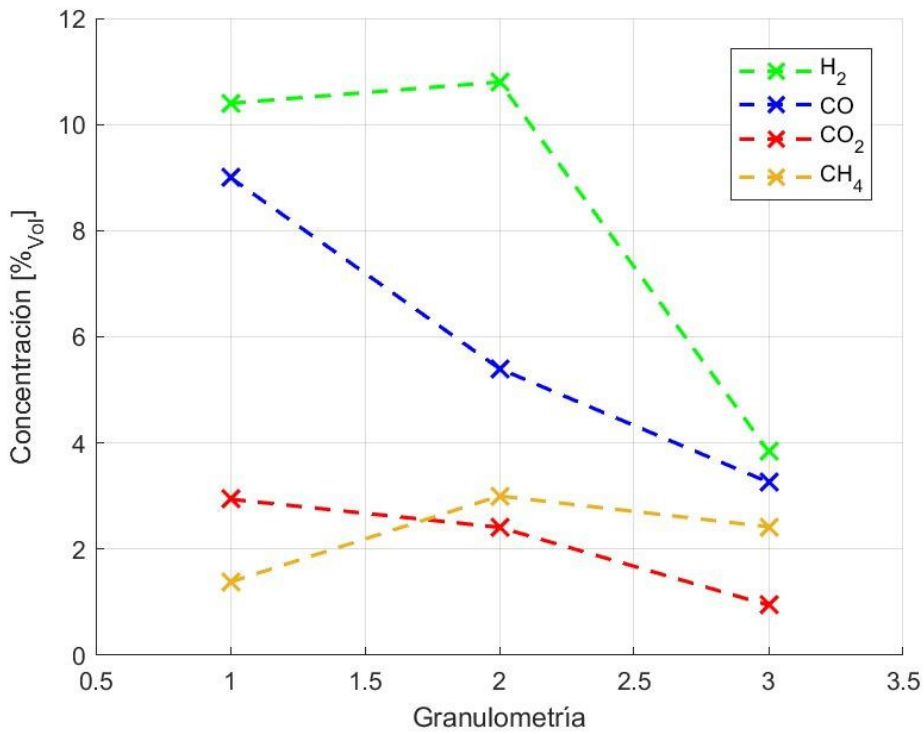


Figura 4.29: Gases Producto ensayo Biomasa.

Con la adición de vapor se observa una disminución importante en cuanto a la concentración de H_2 y los otros gases de emisión con respecto a los ensayos en ausencia de vapor. La condición mas favorable se da con un tamaño medio, en donde se maximiza la producción de H_2 y existe una disminución importante de CO con respecto al tamaño fino (#1). Para el tamaño grueso se observa una irregularidad en la tendencia tanto de las emisiones como en la relación de emisión H_2/CO. En cuanto a la emisión de dióxido de carbono éste disminuye notablemente con la incorporación de vapor llegando a disminuir su emisión por debajo del 2 %.

- **Carbón:**

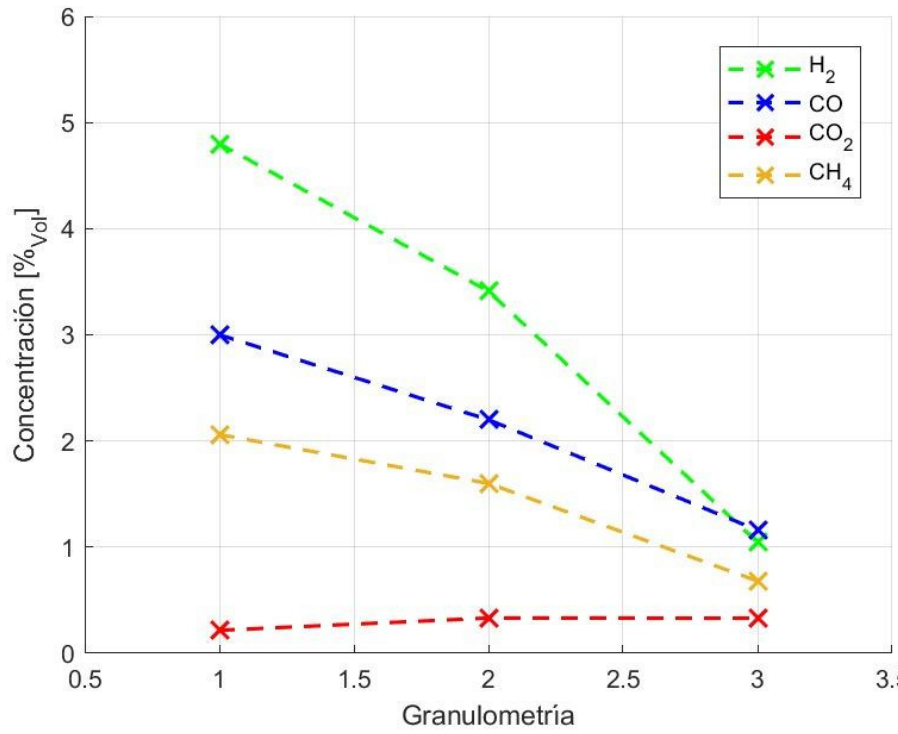


Figura 4.30: Gases producto ensayo Carbón.

Para el caso del combustible carbón, se observa un clara tendencia en todas la emisiones gaseosas a disminuir en función del aumento del tamaño del sólido incorporado. La mayor producción de hidrógeno se da para la condición de un tamaño fino logrando una concentración de H_2 de cerca el 5 %. A partir del tamaño medio se produce una disminución abrupta en la emisión de los gases analizados llegando a niveles extremadamente bajos para su tamaño grueso #3, con concentraciones de 1, 1.2, 0.7 y 0.4 para H_2, CO, CH_4 y CO_2 respectivamente. Con esto se puede concluir que la adición de vapor no favorece la generación de los gases analizados, como también que el tamaño mas favorable para la producción de H_2 y CO es un tamaño fino.

Se presenta el porcentaje de masa restante, en comparación a los ensayos con ausencia de vapor:

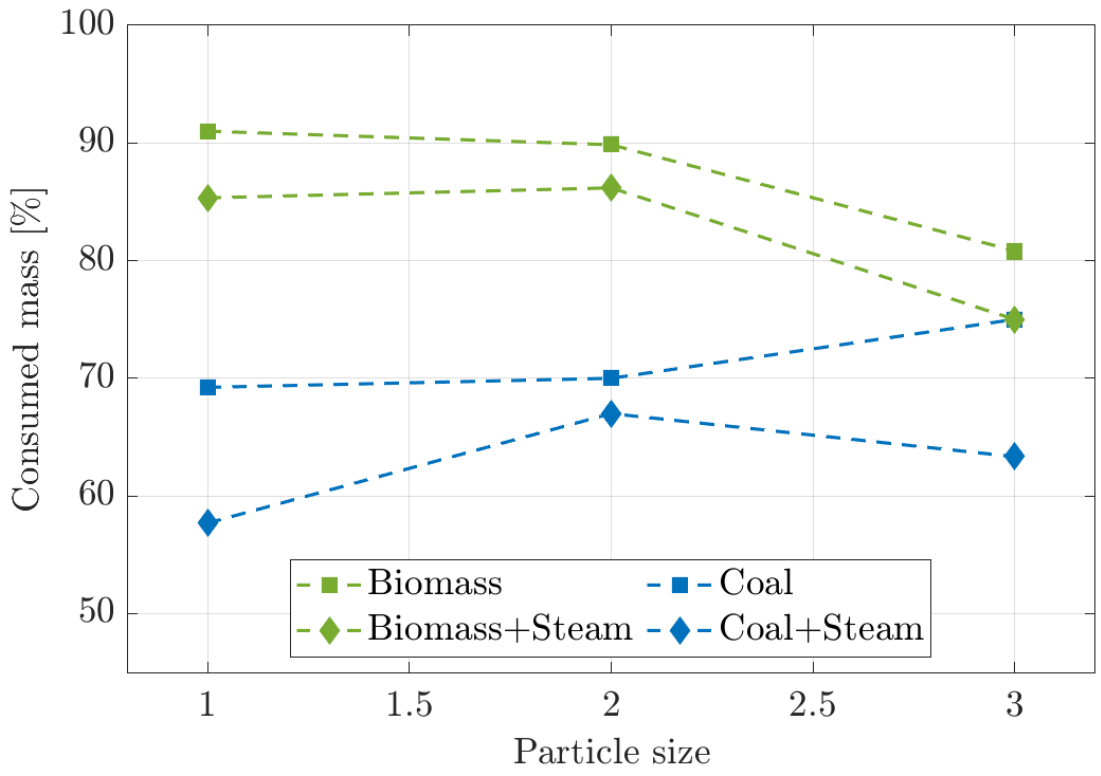


Figura 4.31: Porcentaje de masa restante del combustible sólido.

Como se presentó anteriormente la adición de vapor de agua no genera un aumento en las emisiones de los gases analizado, por el contrario aumenta la cantidad de la masa restante que permanece en el reactor posterior al ensayo realizado. Esto es válido tanto para el combustible biomasa como para el carbón.

Se realiza una tabla comparativa entre los dos elementos principales de análisis (H_2 y CO) y los tipos de ensayos. Para la comparación de las emisiones de hidrógeno y monóxido de carbono se compara la configuración con un tamaño medio ya que es la que mejores resultados entregó en cuanto a temperatura, velocidad del frente de combustión y concentración en los gases analizados.

Tabla 4.13: Porcentaje máximo del elemento en cuanto al tipo de ensayo.

Tipo de ensayo	$\%H_2$	$\%CO$
Línea Base	16.23	7.8
Línea Base + Vapor	15.36	8.3
Comb Sólido Biomasa	21.4	10.3
Comb. Sólido Carbón	15.5	8.1
Biomasa + Vapor	10.8	5.4
Carbón + Vapor	3.4	2.2

Se presenta una comparación entre las velocidades de propagación del frente de combustión con y sin vapor para los dos combustibles sólidos:

Biomasa:

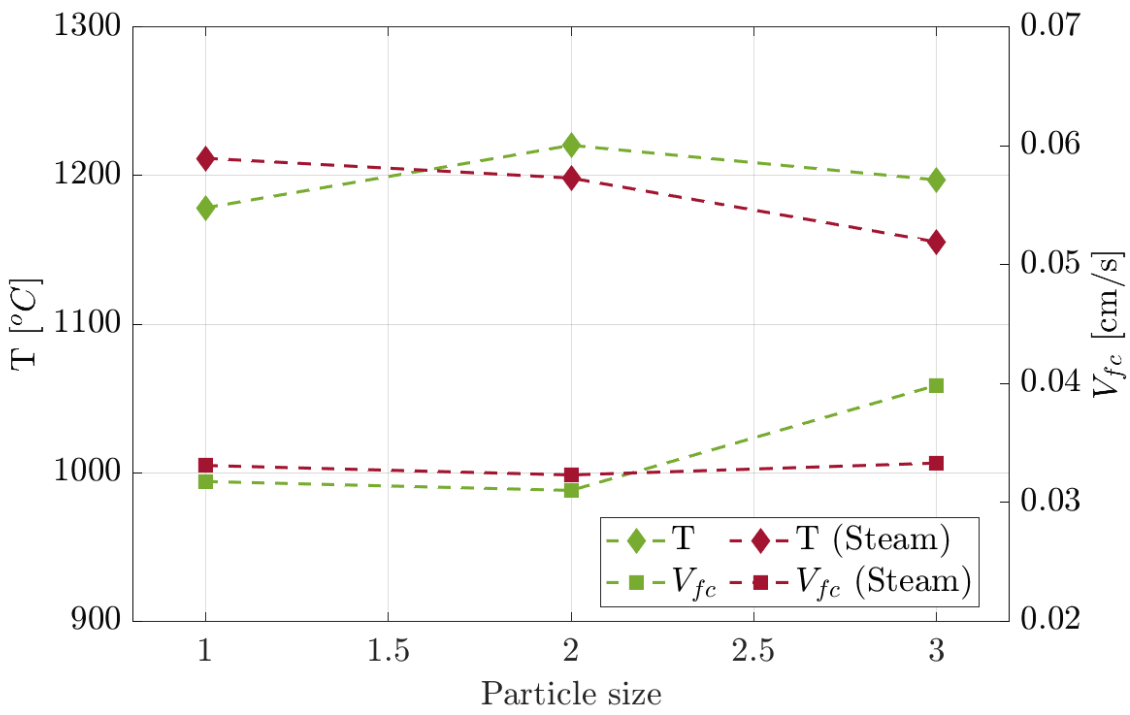


Figura 4.32: Temperatura y velocidad de propagacion Biomasa-vapor.

En cuanto al combustible biomasa se aprecia que no existe una mayor variación en cuanto a la temperatura, de la misma forma ocurre en cuanto a la velocidad del frente de combutión, se mantiene dentro de los mismos rangos logrados en la modalidad sin vapor. Cabe destacar que a pesar de estar incorporando un mayor caudal con la incorporación de vapor el frente de combustión no aumenta su velocidad sino al contrario, esto puede deberse a la alto flujo de vapor incorporado disminuyendo la velocidad de reacción del proceso de gasificación.

Carbón:

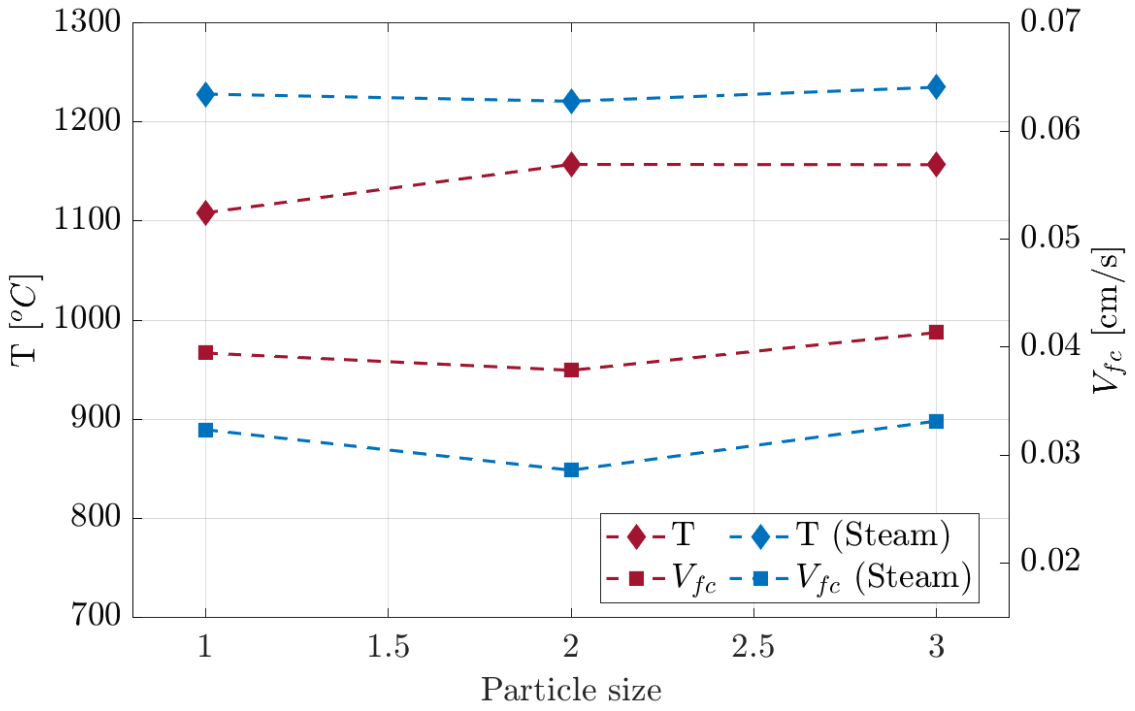


Figura 4.33: Temperatura y velocidad de propagación Carbón-vapor.

Con respecto al carbón se observa un comportamiento bastante diferente de la biomasa. Con la incorporación del vapor la temperatura aumenta para los tres tamaños, alcanzando superar los 1200[ºC]. En cuanto a V_{fc} ésta dsiminuye considerablemente, presentando la misma tendencia y comporamiento que en ausencia de vapor.

4.5. Combustible sólido híbrido

Se realizarán ensayos mezclando los dos combustibles sólidos. Se utilizaran 3 distintas relaciones para mezclarlas; 50 % biomasa 50 % carbón, 75 % biomasa 25 % carbón, 25 % biomasa 75 %. Estos distintos ensayos se ralizaron bajo los parámetros de operación presentados en la tabla 4.14.

Tabla 4.14: Parámetros de operación ensayos Combustible Híbrido.

PHI	**Velocidad de filtración[m/s]**	**Granulometría[-]**
2.5	0.4	2

4.6. Medición de material particulado

4.6.1. Analizador de gases TESTO 380

El testo 380 fue utilizado con el objetivo de poder medir el material particulado y los tipos de gases emitidos por el reactor en sus disintos ensayos. Debido a la gran concentración del gas emitido, el analizador de gases se saturó al momento de tomar las mediciones por lo que no fué posible contar con mediciones para su análisis.

4.6.2. Espectrómetro de aerosoles Grimm

La utilización del espectrómetro láser de aerosoles tuvo que esperar hasta la etapa final del trabajo debido a su disponibilidad. Hasta la fecha se realizaron dos pruebas; una prueba del estado de la calidad del aire (IAQ) de la sala de termofluidos, asi saber el comportamiento del material particulado en condiciones normales. El siguiente ensayo realizado corresponde a una muestra de las emisiones de material particulado que desprende el reactor MPI al pasar por él solamente un flujo de aire a 1[bar] y a con un flujo de 19.66 [l/min].

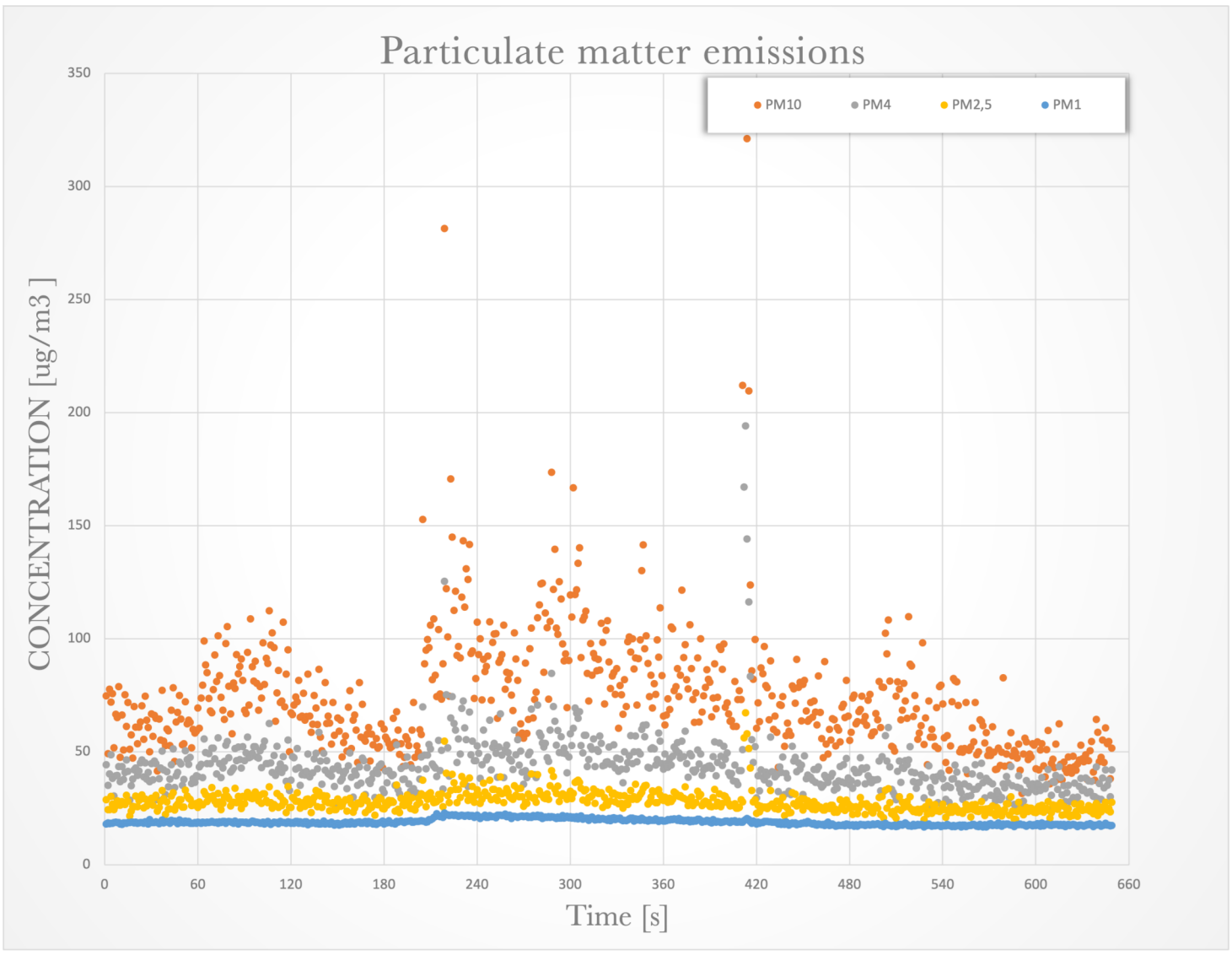


Figura 4.34: Material particulado condiciones ambientales LTF.

Como se observa existe una gran cantidad de material particulado a pesar de estar en un laboratorio en donde no gran flujo de personas o vehículos que puedan levantar muchas partículas. No obtante se observan 3 o 4 zonas en donde se produce un “peak” de material particulado del orden de 150 $[\mu g/m^3]$, estas zonas corresponden a momentos en dónde se realizó una perturbación en el ambiente como un aplauso fuerte, un grito, o el movimiento repentino del aire en el laboratorio.

De esta forma se puede establecer que aún estando en un ambiente limpio y ordenado como es el laboratorio de termofluidos, se elevan partículas con tan sólo el movimiento de personas o perturbaciones que produzcan el movimiento de partículas que se encuentran estáticas. En cuanto al tamaño de las partículas se observa que las mas sensibles a estas perturbaciones son las de tamaño PM10, siendo las que principalmente tienen este comportamiento ante las perturbaciones mientras que la medición de las artículas mas pequeñas como las PM2.5 y PM1 se mantien practicamente estables.

El poder caracterizar la calidad del aire al interior del laboratorio de termofluidos es importante ya que nos acerca a la idea de que independiente del lugar en donde nos encontremos es muy difícil que no haya ninguna emisión de material particulado. Sabiendo cuál es la condición estándar del laboratorio se pueden asumir condiciones iniciales de procesos o ensayos. El cambio climático también tiene influencia directa sobre la calidad de aire que se puede obtener en un espacio cerrado, ya que el aumento de las emisiones de CO_2 trae consigo un aumento en los agente alergénicos que suelen circular o suspenderse en el aire producto del flujo del aire[38].

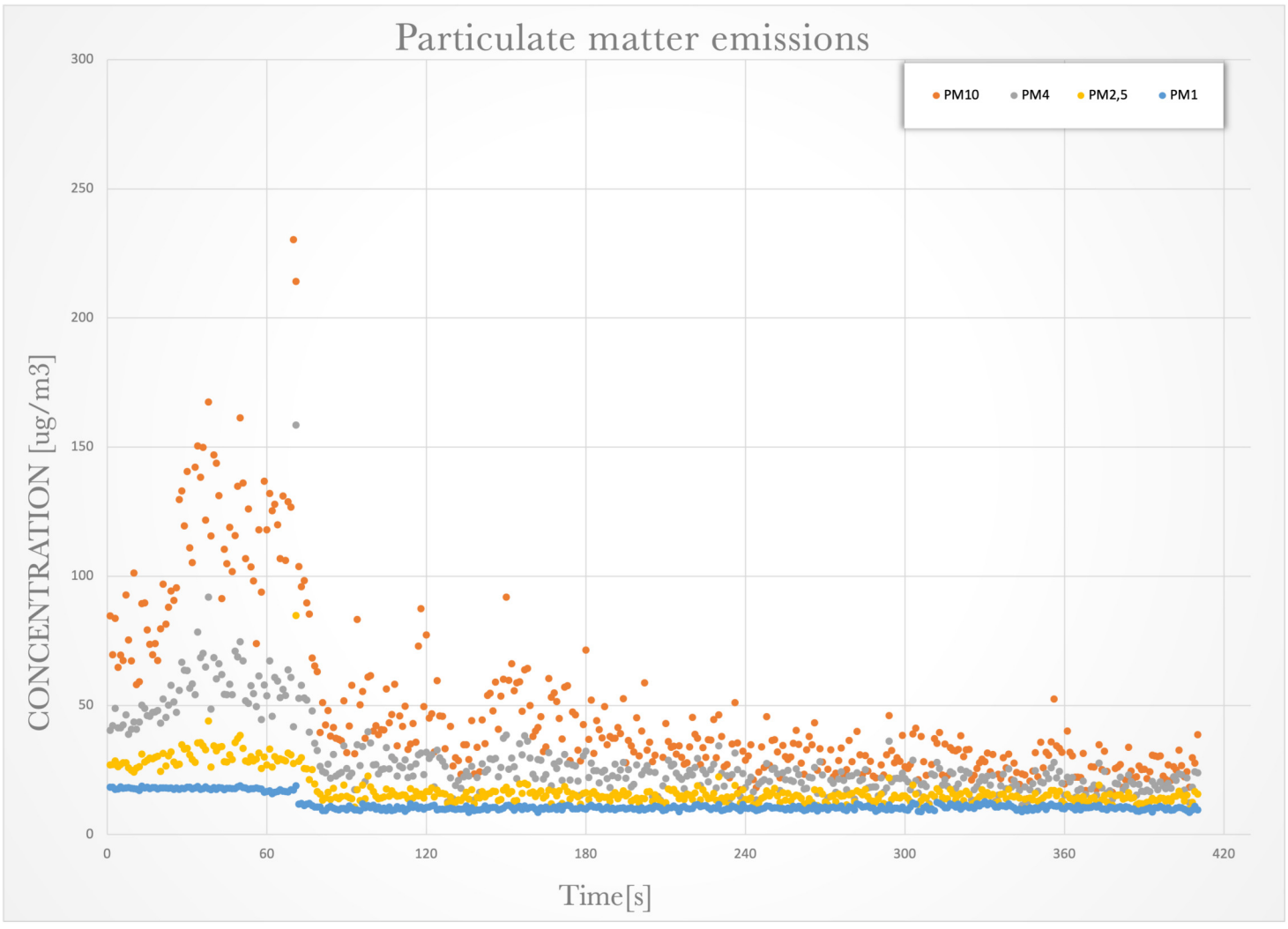


Figura 4.35: Material particulado emisión solo aire reactor MPI.

En cuanto a las mediciónes realizadas en el reactor de MPI se hicieron en distintos momentos, debido a la disponibilidad del equipo. El primer ensayo fue introduciendo solamente aire a una presión de 1 [bar] y a un caudal volumétrico de 19.66 [l/min]. En esta medición se puede apreciar como inicialmente se produce un “peak” debido a la inyección de aire en el reactor en el momento en que se abre la válvula de inyección de aire. La mayor concentración de material particulado se da en las partículas de tamaño PM10, las que mas aumentan al

momento de la inyección del aire. Se observa como a medida que pasa el tiempo las emisiones de material particulado grueso disminuyen hasta estabilizarse en el orden de los 50 $[\mu g/m^3]$. En cuanto al material particulado medio (PM2.5) y fino (PM1) se observa que no varían demasiado, aún así se observa un comportamiento similiar, al comienzo existe un máximo de concentración para estos tamaños, y luego se estabilizan al rededor de los 25 $[\mu g/m^3]$.

Finalmente se lograron realizar mediciones con el reactor encendido, en primera instancia se midieron las emisiones de material particulado para una modalidad inerte, luego con la incorporación de biomasa, y finalmente carbón. Los gráficos realizados representan la cantidad de material particulado segun PM10, PM4, PM2,5 y PM1 en relación a los puntos de medición del equipo. Cada punto de medición se realiza cada 6 segundos, por configuración de equipo.

Medición material particulado reactor inerte

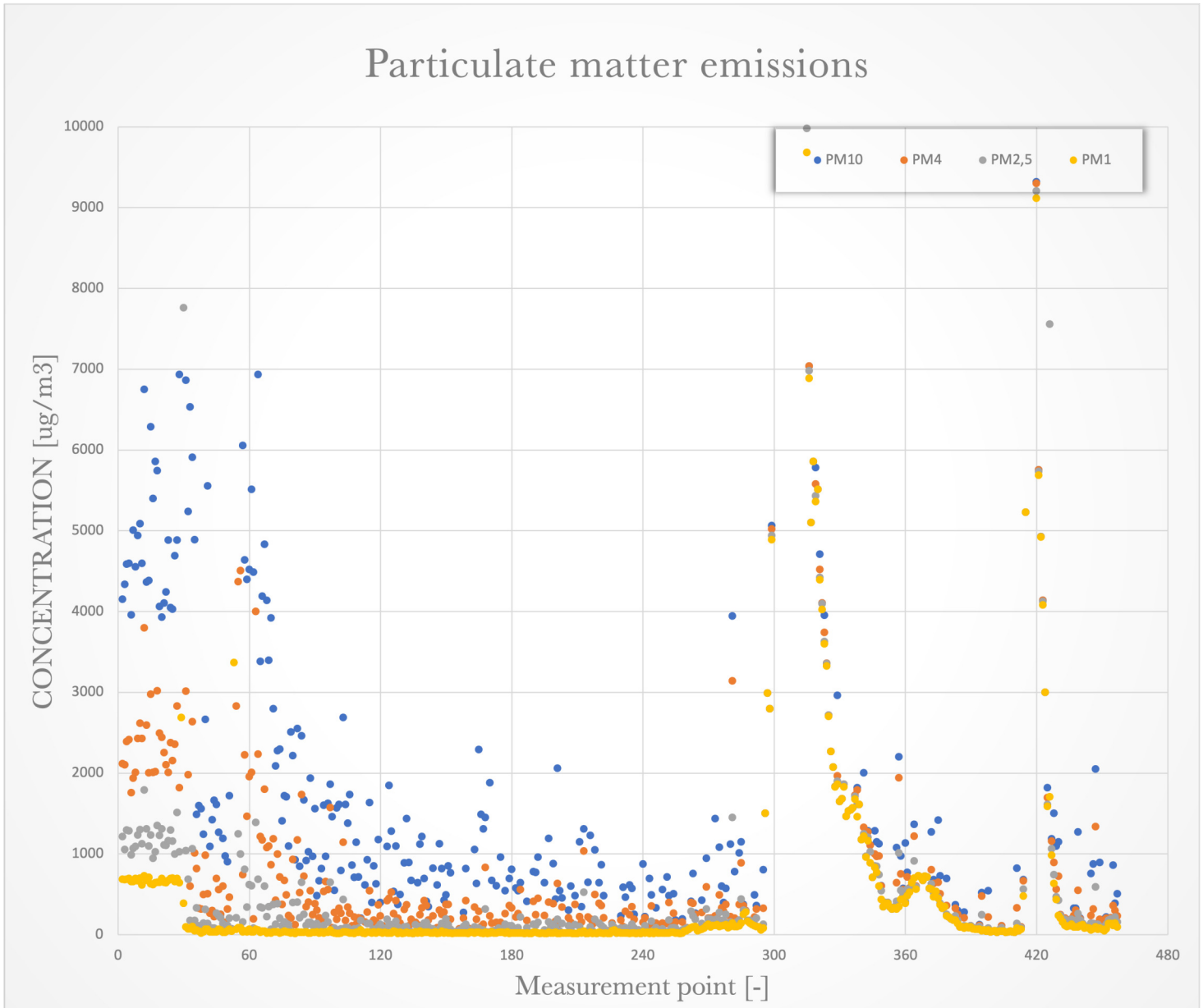


Figura 4.36: Emisión de material particulado operación reactor inerte.

El gráfico muestra una alta emisión de material particulado, en primera instancia al rededor de la medición 60 se observa como el aumeto de material particulado grueso alcanza un máximo de 7000 $[\mu g/m^3]$. Esto coincide con el momento que comienza el pre calentamiento del reactor por medio del soplete, la llama introducida para el pre calentamiento del medio poroso genera el movimiento del aire dentro del reactor, llevándose consigo las partículas que

permanecían dentro del reactor y del mismo aire.

En el punto 300 se observa un nuevo "peak" de material particulado fino alcanzando un maximo de 7000 [$\mu g/m^3$]. En este mismo mometo se genera el encendido del reactor y la estabilización del frente de combustión. El principal material particulado emitido es el fino (PM1), lo que coindice con el proceso de combustión u oxidación parcial. Finalmente se observa un nuevo "peak", el cual corresponde al momento en el que se apaga el frente de combustión. El frente de combustión se apaga producto de alteraciones en el suministro de gas natural en las instalaciones del laboratorio.

Medición material particulado reactor híbrido con biomasa

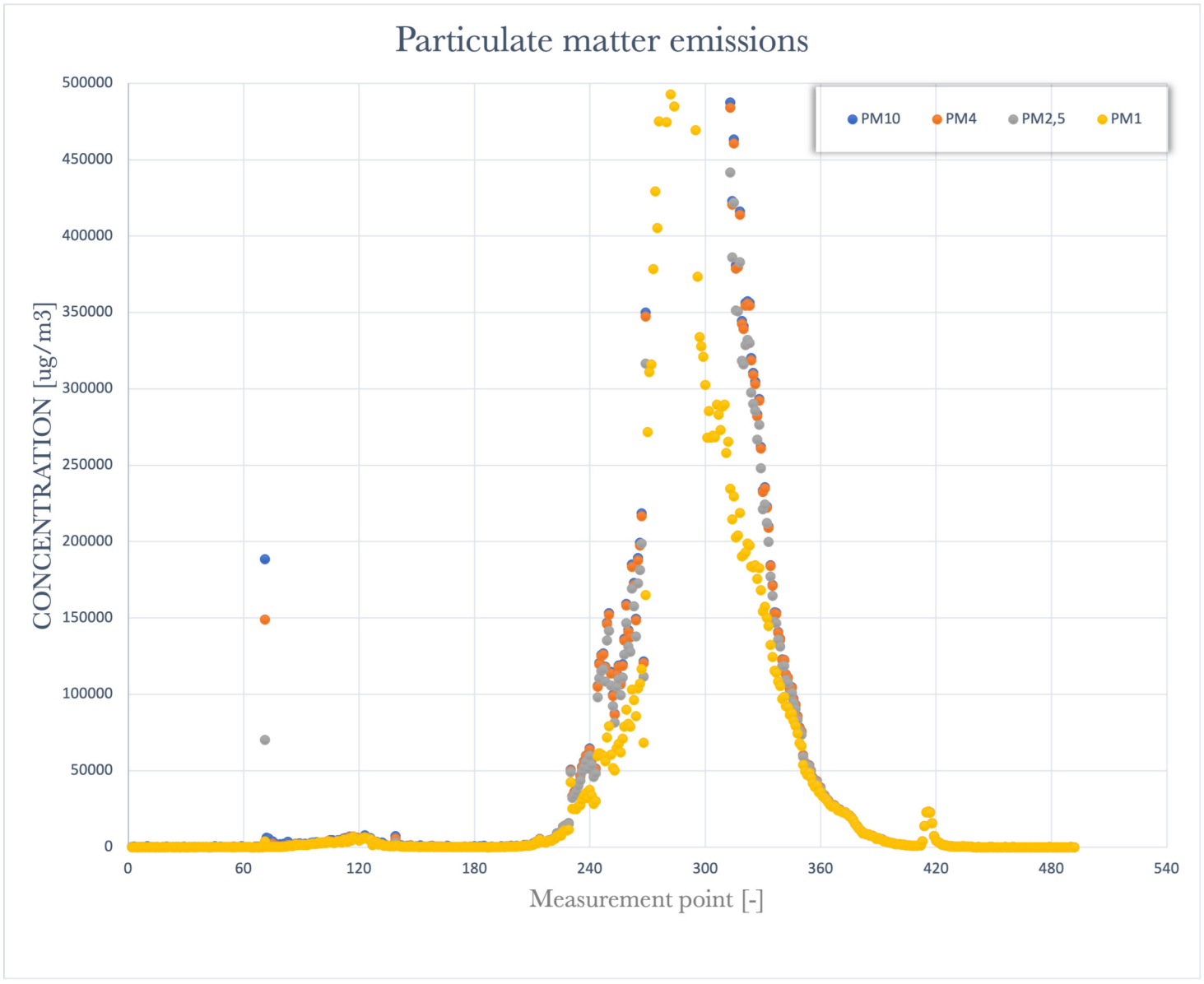


Figura 4.37: Emisión de material particulado operación reactor híbrido biomasa.

En el caso de las emisiones de material particulado medidas utilizando el reactor en su modalidad híbrida, con incorporación de biomasa como combustible sólido. En el gráfico se observa como en el punto de medición 240 existe un aumento brusco en la emisión de material particulado, el cual es principlemte PM1 y PM2.5. Este aumento brusco se da en el momento el cual se cierra el reactor con el tapón de greda, y se modifica el ϕ a 2.5 para permitir el avance del frente de combustión. De esta forma se observa como a medida que avanzan las mediciones y el frente de combustión se acerca a la biomasa, aumentan las emisiones de material particulado fino, alcanzando un máximo de 5000000 [$\mu g/m^3$]. Se puede apreciar como las emisiones en presencia de un combustible sólido aumentan considerablemente con

respecto a la operación como reactor inerte, aumentando en un 400 % en el caso del material particulado fino (PM1).

Mecición material particulado reactor híbrido con carbón

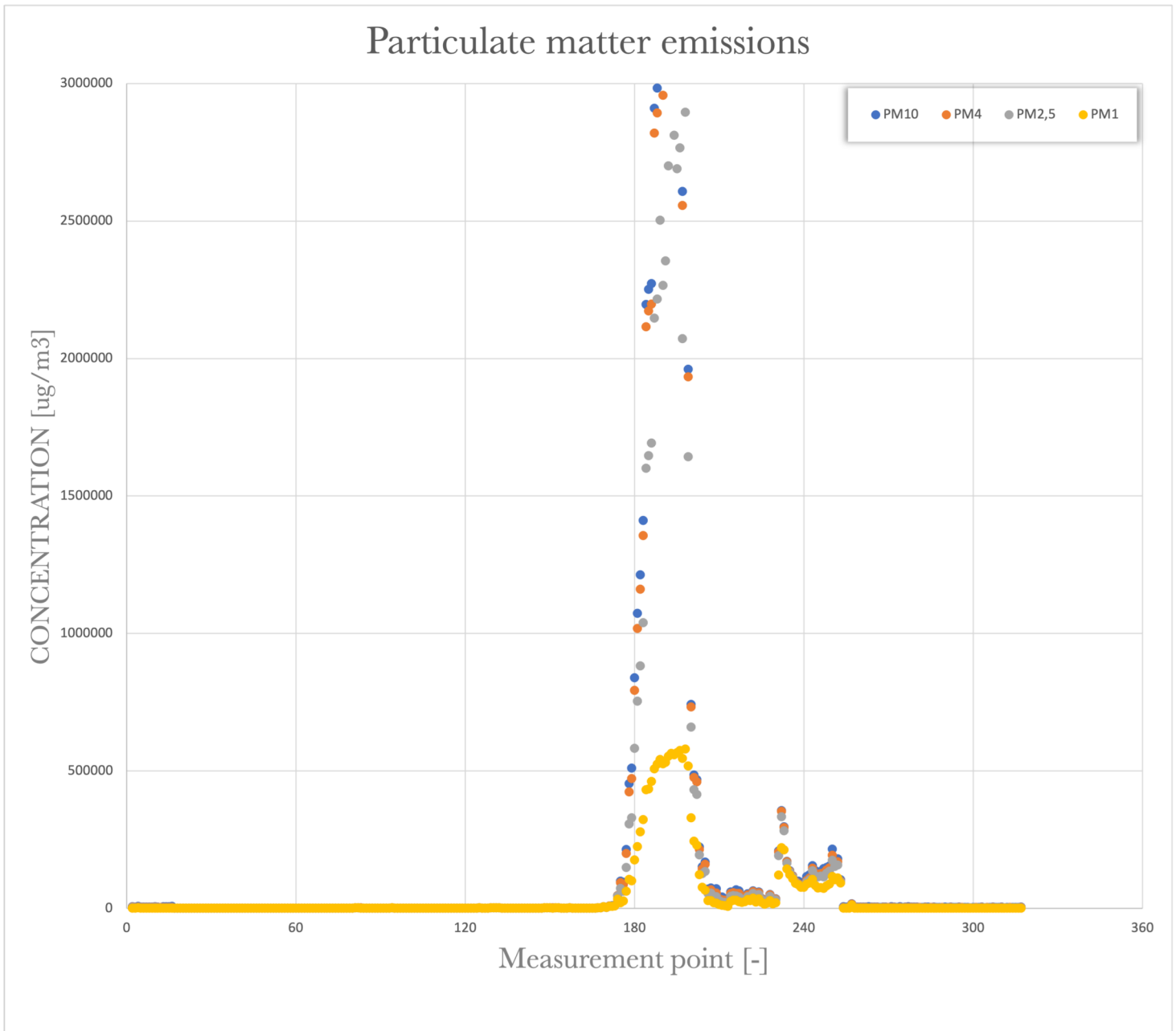


Figura 4.38: Emisión de material particulado operación reactor híbrido carbón.

El último ensayo realizado fue incorporando como combustible sólido carbón sub bituminoso. Existieron problemas con el encendido del reactor por inestabilidad en el suministro de gas natural desde la red. Si bien no se contaron con las condiciones ideales para realizar las mediciones se logró encender el reactor y estabilizar un frente de combustión. En el punto de medición 140 se observa un aumento brusco de las emisiones, en primera instancia de PM2.5 y PM10 alcanzando un máximo de hasta 3 millones de $[\mu g/m^3]$. Posteriormente se genera un "peak" de material particulado fino, pero no de las mismas magnitudes, alcanzando mediciones poco superiores a los 500000 $[\mu g/min^3]$. Un nuevo "peak" en las mediciones se observa en el punto 230 aprox. en donde el frente alcanza la termocupla central (lugar donde se carga el combustible sólido). Finalmente se aprecia un último crecimiento antes de estabilizarse, el cual corresponde al momento cuando se apaga el frente de combustión.

Capítulo 5

Conclusión y Recomendaciones

5.1. Conslusión sobre resultados

Con relación a los ensayos en la operación de línea base, se obtuvieron resultados bastante positivos, logrando concentraciones de H_2 superiores a las obtenidas en trabajos anteriores con operaciones similares[28]. Se logró con éxtio una operación recíproca del reactor para mezclas ricas, alcanzando temperaturas super adiabáticas comprobando la base teórica de la recirculación de calor en quemadores de medio poroso. En cuanto a la adición de vapor se observó que si bien las concentraciones de hidrógenos no aumentaron, si aumentó el grado de conversión del mismo, lo que establece un favorecimiento hacia la producción de H_2 por medio del reformado de gas metano.

La gasificación de los dos combustibles sólidos se dio gracias a la incrporación de una nueva cámara de carga para los sólidos. Con respecto a la biomasa fue donde mas conentración de H_2 de obtuvo, superando el 20 % de los gases analizados. Las temperaturas alcanzadas y el alto porcentaje de hidrógeno obtenido permiten afirmar que se logra un proceso de gasificación del combustible sólido en en un reactor de medio poroso operado en una modalidad recíproca. En el caso del carbón, las emisiones de H_2 no fueron tan altas como para la biomasa, y a pesar de no contar con la temperatura y presión óptima para un proceso de gasificacioncompleto, dado a que aún así se logró producir hidrógeno a una relación 1:2 con respecto a las emisiones de monóxido de carbono se puede inferir que se produce una gasificación parcial de carbón utilizado. Sobre la incorporación de vapor al proceso de gasificación de la biomasa, no se logra aumentar la producción de hidrógeno pero si disminuir la emsión de monóxido de carbono, lo que ayuda a aumenta la relación H_2/CO que se busca obtener. En el caso del carbón la incorporación de vapor disminuye la producción de hidrógeno y monóxido de carbono acercando bastante la producción del CO al H_2. Si bien existió un aumento en la temperatura alcanzada se estima que quizás con una incorporación de vapor a un menor caudal puede traer una mejora en las emisiones gaseosas deseadas.

Para la medición de material particulado existieron varias dificultades, donde la principal fue lograr que los equipos de medición no se saturen debido al alto contenido de humedad y concentración de gases producto. Para esto se utilizaron equipos distintos con la finalidad de poder obtener resultados que permitan su análisis. Finalmente se logró la medición de material particulado con un equipo espectrómetro láser de aerosoles para las condiciones ambientales existentes en el laboratorio de termofluidos. Para esta medición se observó que en

todo momento existe emisión de material particulado, existiendo un promedio de emisiones de 25 [$\mu g/m^3$] de material particulado fino (PM1) y de 35 [$\mu g/m^3$] de material particulado medio (PM2.5) el cual corresponde al material mayoritariamente emitido. Se visualizan 3 zonas de "peak" las cuales corresponden a parturbaciones realizadas en el laboratorio tales como aplausos, gritos o movimientos repentinos.

Con respecto a las emisiones de material particulado desde el reactor, se realizó una medición ingresando solamente flujo de aire, observando un "peak" inicial correspondiente al momento en que se realiza la apertura de la válvula de inyección de aire. A medida que transcurre la medición se observa una estabilización de las emisiones de material particulado alcanzando mayoritariamente un promedio de 25 [$\mu g/m^3$] para el material particulado medio (PM 2.5). Para las mediciones con el reactor encendido se observaron emisiones de diferentes magnitudes.

En el caso del reactor operado como reactor inerte se observa un máximo de emisiones en el momento que se enciende el frente de combustión, observando un máximo de material particulado fino que alcanzó los 7000 [$\mu g/m^3$] de PM1 principalmente. Coincide ya que un proceso de combustión u oxidación parcial el material particulado generado es fino y nanométrico. Para el caso del ensayo con reactor híbrido con combustible biomasa, se observó una máxima emisión de material particulado fino de 5000000 [$\mu g/m^3$]. El aumento es sustancioso, presentando claramente el aumento en la emsión de MP en un proceso de gasificación de combustible sólido. Finalmente para la operación del reactor híbrido con carbón, si bien se observa un "peak" de emisiones llegando a 3000000 [$\mu g/m^3$], estas corresponden a material particulado medio y PM4, ya que como se estableció previamente, las condiciones de operación dentro del reactor no son las óptimas para la gasificación del carbón.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

En base al trabajo realizado para el desarrollo de este trabajo de título se presentan recomendaciones para trabajos futuros relacionados a la materia:

- Mejorar el sistema de extracción y toma de muestra de forma de hacerlo mas confiable y menos propenso a errores.
- Realizar ensayos con combustibles sólidos y vapor modificando el caudal de vapor incorporado, de tal manera de establecer si existen mejores condiciones de operación para este tipo de ensayo.

Bibliografía

[1] de Energía, M., "Ley de eficiencia energética," 2021, https://energia.gob.cl/ley-ee.

[2] Seminski, A., "International energy outlook 2013," 2013, xx.

[3] de Energía, M., "Política energética de chile," 2015, x.

[4] FIMA, "Mapeo de las reservas de carbón en chile," 2011, https://www.porlaaccionclimatica.cl/wp-content/uploads/2021/11/informe-Keepitunderground.pdf.

[5] CONAF, "Plantaciones forestales," 2021, https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/plantaciones-forestales/.

[6] Ripoll, N., "Hydrogen production from algae biomass in rich natural gas-air filtration combustion," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. xx, pp. 5513–5522, 2017, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.082.

[7] Zainul, A., "Hydrogen economy: Modern concepts, challenges and perspectives," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 120, no. xx, p. 109620, 2020, doi:10.1016/j.rser.2019.109620.

[8] Acar, C., "Review and evaluation of hydrogen production options for better environment," Journal of Cleaner Production, vol. 218, no. xx, pp. 835–849, 2019, doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.046.

[9] Dawood, F., "Hydrogen production for energy: An overview," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. xx, pp. 3847–3869, 2020, doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

[10] Banerjee, S., "Economic assessment and prospect of hydrogen generated by otec as future fuel," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. xx, pp. 26–37, 2017, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.11.115.

[11] Abe, J., "Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, no. xx, pp. 15072–15086, 2019, doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.068.

[12] Toledo, M., "Hydrogen and syngas production by hybrid filtration combustion: Progress and challenges," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 177, no. xx, p. 113213, 2023, doi:10.1016/j.rser.2023.113213.

[13] Sansaniwal, S., "Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 72, no. xx, pp. 363–384, 2017, doi:10.1016/j.rser.2017.01.038.

[14] Kozlov, A., "The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency," xxxxxx, vol. 158, no. xx, pp. 1004–1008, 2019, doi:10.1016/j.egypro

.2019.01.244.

[15] CONAMA, "Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación," 2014,

[16] de energía, M., "Funcionamiento de la celda de combustible.", https://energia.gob.cl/electromovilidad/hidrogeno-verde/tecnologias-en-un-fcev.

[17] de energía, M., "Comienza inyección de hidrógeno verde en red de gas natural en la serena y coquimbo," 2022, https://energia.gob.cl/noticias/coquimbo/comienza-inyeccion-de-hidrogeno-verde-en-red-de-gas-natural-de-la-serena-y-coquimbo.

[18] Mujeebu, M. A., "Combustion in porous media and its applications – a comprehensive survey," Journal of Environmental Management, vol. 90, no. xx, pp. 2287–2312, 2009, doi:10.1016/j.jenvman.2008.10.009.

[19] Drayton, M. K., "Syngas production using superadiabatic combustion of ultra- rich methane-air mixtures," Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, vol. xxx, no. xx, p. x, 1998, doi:xxxxxx.

[20] Fierro, M., "Experimental investigation of reverse flow porous medium reactor with premixed and non-premixed flames," Chemical Engineering Journal, vol. 425, no. xx, p. 130178, 2021, doi:10.1016/j.cej.2021.130178.

[21] Dobrego, K., "Partial oxidation of methane in a reverse flow porous media reactor. water admixing optimization," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, no. xx, pp. 5535–5544, 2008, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.111.

[22] Contari, F., "A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 46, no. xx, pp. 949–961, 2003, doi:10.1016/S0017-9310(02)00371-X.

[23] Bubnovich, V., "Diameter of alumina balls effect on stabilization operation region for a reciprocal flow burner," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, no. xx, pp. 2026–2033.

[24] Barra, A. J., "Heat recirculation and heat transfer in porous burners," Combustion and Flame, vol. 137, no. xx, pp. 230–241, 2004, doi:10.1016/j.combustflame.2004.02.007.

[25] Toledio, M., "Hybrid filtration combustion of natural gas and coal," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37, no. xx, pp. 6942–6948, 2012, doi:10.1016/j.ijhydene.2012.01.061.

[26] Toledo, M., "Numerical simulation of the hybrid filtration combustion of biomass," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, no. xx, pp. 21131–21139, 2016, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.09.120.

[27] Dobrego, K., "Partial oxidation of methane in a reverse flow porous media reactor. water admixing optimization," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, no. xx, pp. 5535–5544, 2008, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.111.

[28] Fernández, R., "Efecto del vapor de agua en la pirólisis y gasificación de biomasa en un reactor híbrido de flujo recíproco," 2020.

[29] Fiberfrax, "Aislante de fibra cerámica," 2020, https://www.unifrax.com/es/product-category/manta-aislante/?productcategory=2032.

[30] Cengel, Y., "Thermodynamics," Mc Graw Hill, vol. 7th, no. xx, p. 918, xxxx, doi:xxxxxx.

[31] TESTO, "Medidor de partículas finas testo 380 - medidor portátil," xx, https://www.testo.com/es-ES/medidor-de-particulas-finas-testo-380/p/0632-3800.

[32] Obaidullah, M., "An overview of pm formation mechanisms from residential biomass combustion and instruments using in pm measurements," INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY and ENVIRONMENT, vol. 12, 2018.

[33] GRIMM, "Portable aerosol spectrometer," xx,

[34] Toledo, M., "Hydrogen production in ultrarich combustion of hydrocarbon fuels in porous media," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, no. xx, pp. 1818–1827, 2009, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.12.001.

[35] Cerfacs, "Methane/aire combustion," xx, https://www.cerfacs.fr/cantera/mechanisms/meth.php.

[36] Espinoza, L., "Syngas production by non-catalytic reforming of biogas with steam addition under filtration combustion mode," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, no. xx, pp. 15693–15702, 2018, doi:10.1016/j.ijhydene.2018.06.136.

[37] V.Kirubakaran, "A review on gasification of biomass," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. xx, pp. 179–186, 2009, doi:10.1016/j.rser.2007.07.001.

[38] EPA, "Indoor air quality and climate change," xx, https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-and-climate-change.

Anexos

Anexo A. Análisis de trabajo seguro y chequeo para operación

Para la realización segura de la actividades se considera el chqueo del siguiente listado de actividades:

ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO					
TRABAJO A REALIZAR	OPERACIÓN DE REACTOR DE MEDIO POROSO CON INYECCIÓN DE METANO-AIRE-VAPOR				
FECHA		LUGAR	UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, CASA CENTRAL		
OPERADOR 1			FIRMA		
OPERADOR 2			FIRMA		
SUPERVISOR			FIRMA		
EPP	GUANTES	OVERALL	LENTES	ZAPATOS	
CUMPLE					
NO CUMPLE					
NÚMERO	ACTIVIDAD	RIESGOS	MEDIDAS DE CONTROL		
1	Realizar inspección general de equipos	Fugas de gas natural. Fugas de gas licuado. Caídas. Arco eléctrico.	Utilizar equipos de protección personal. Utilizar detector de fugas. Mantener vías despejadas. Tener al alcance un extintor cargado.		
2	Realizar encendido y operación del reactor.	Fugas de gas natural. Fugas de gas licuado. Quemaduras. Incendios.	Utilizar equipos de protección personal. Utilizar detector de fugas. Mantener vías despejadas. Tener al alcance un extintor cargado. Seguir el procedimiento de operación de manera adecuada		
3	Apagado del reactor y equipos.	Fugas de gas natural. Quemaduras. Incendios.	Utilizar equipos de protección personal. Utilizar detector de fugas. Mantener vías despejadas. Tener al alcance un extintor cargado. Cerrar llaves de paso del gas natural y aire y apagar equipos.		

Figura A.1: Chequeo de actividades para operación segura de actividades.

LISTADO DE CHECKEO PARA OPERACIÓN DE REACTOR DE FLUJO RECÍPROCO DE MEDIO POROSO				
FECHA		TIPO DE MEDICIÓN		
SUPERVISOR		OPERADORES		
SEGURIDAD				
		CUMPLE	NO CUMPLE	
EPP	OVERALL			
	LENTES DE SEGURIDAD			
	GUANTES CABRETILLA			
	ZAPATOS DE SEGURIDAD			
VIAS DE ESCAPE DESPEJADAS				
EXTINTORES HABILITADOS				
PUESTA EN MARCHA		SCAN	SI	NO
VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y DE ESCAPE ABIERTAS.				
ENCENDER COMPRESOR				
REGULAR PRESIÓN DEL COMPRESOR 1 BAR.				
REGULAR CAUDAL DE AIRE				
ENCENDIDO				
ENCENDER MECHERO PARA PRECALENTAR REACTOR.				
COMPROBAR FUGAS DE LÍNES DE GN.				
VARIFICAR VALVULAS DE ADMISIÓN Y DE ESCAPE. CORRESPONDIENTE.				
AL ALCANZAR 400 °C INICIAR INYECCIÓN LATERAL CON PHI 1.				
AL ALCANZAR 600 °C SACAR MECHERO Y COLOCAR TAPÓN.				
DESARROLLO				
CONFIGURAR CAUDALES DE AIRE Y COMBUSTIBLE PARA DISTINTAS VARIABLES A VERIFICAR.				
CONFIGURAR CAUDALES DE AUIRE Y COMBUSTIBLE PARA VELOCIDAD DE FILTACIÓN CORRESPONDIENTE.				
CONFIGURAR CAUDALES DE VAPOR.				
APAGADO				
CORTAR FLUJO DE VAPOR.				
CERRAR PASO DE GAS NATURAL.				
APAGAR COMPRESOR.				
CERRAR VÁLVULAS DE PASO.				
GUARDAR DATOS OBTENIDOS.				
DESENERGIZAR EL SISTEMA.				
OBSERVACIONES				

Figura A.2: Chequeo de actividades para operación segura de actividades.

Anexo B. Instalación del reactor en Laboratorio de Termofluidos

Se presenta el estado final del módulo de trabajo, con la incorporación del sistema de toma de muestras y el generador de vapor de precisión.

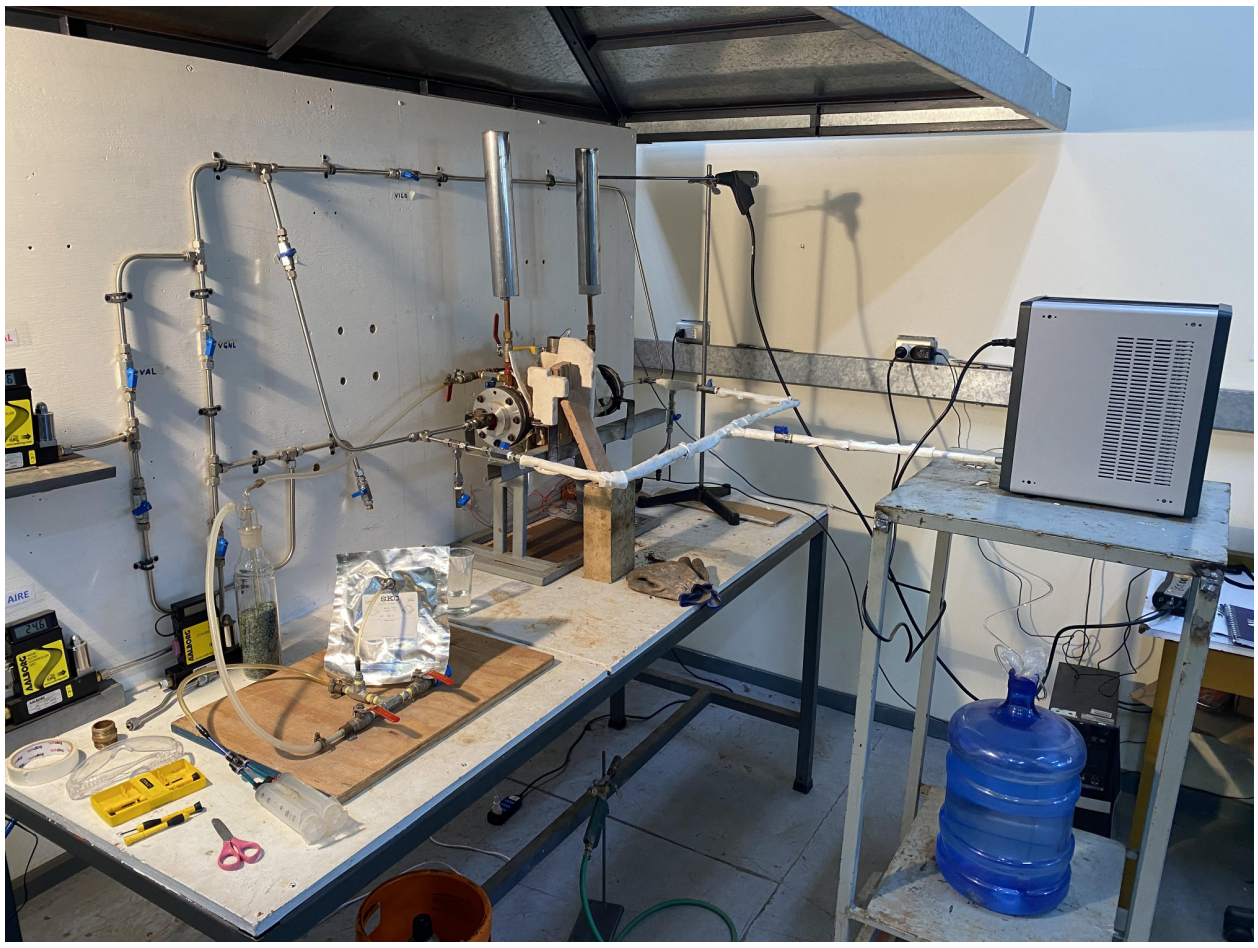


Figura B.1: Reactor de medio poroso de flujo recíproco.

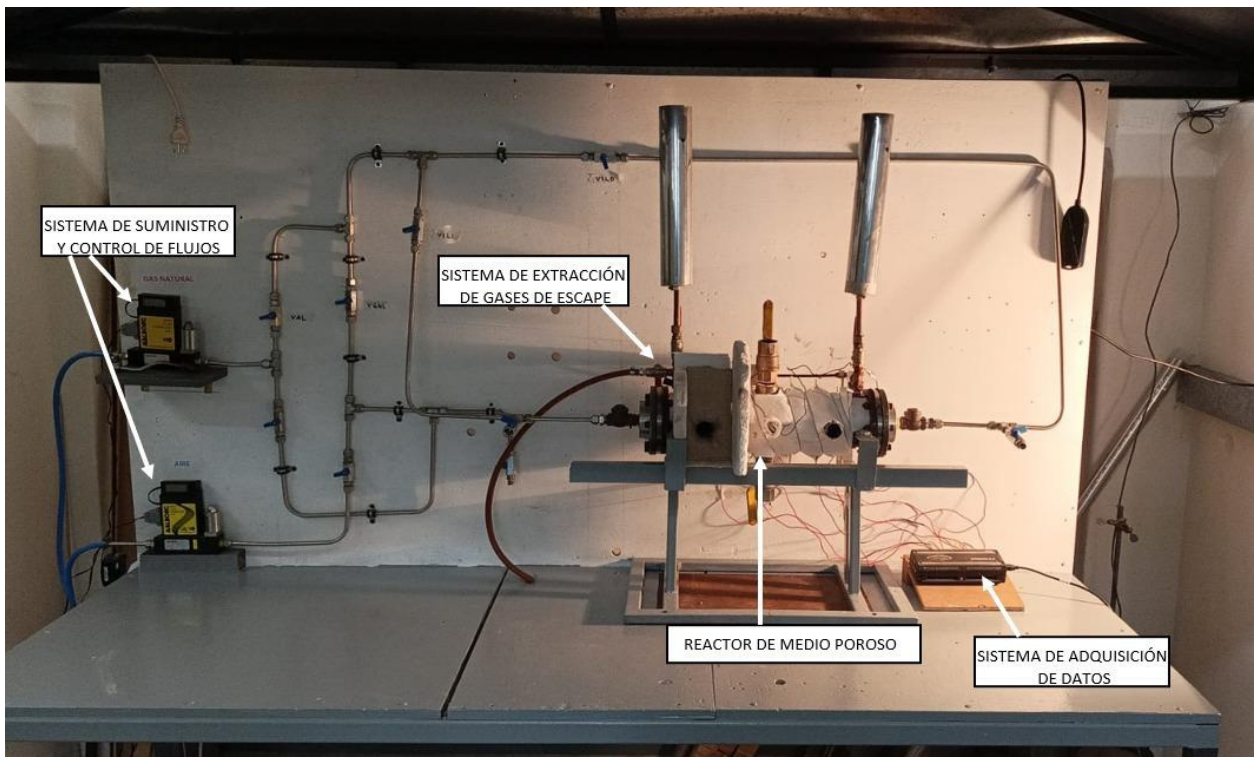


Figura B.2: Reactor y equipos de trabajo.

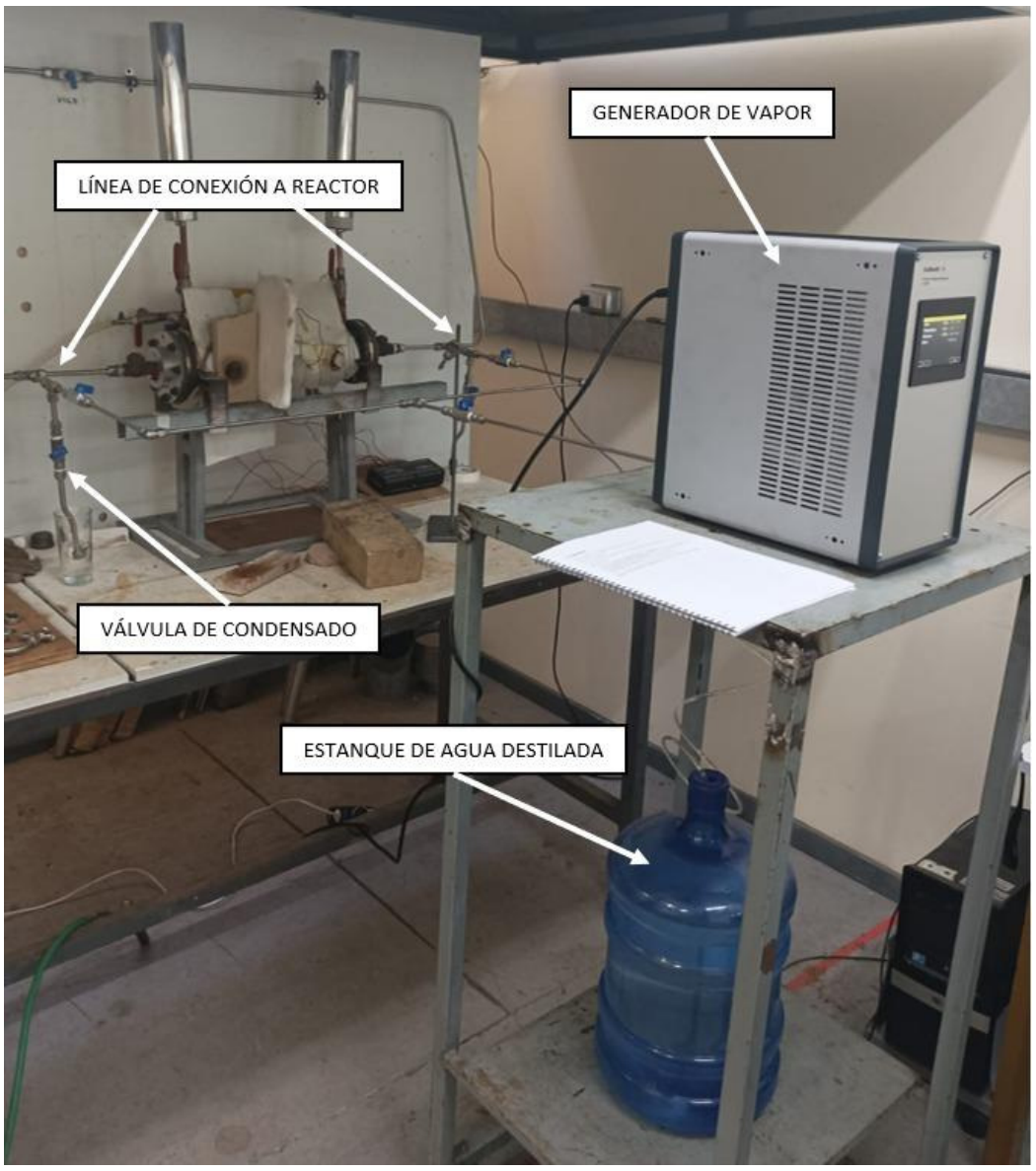


Figura B.3: Instalación del reactor TMF.



Figura B.4: Equipo de trabajo.

Anexo C. Vistas Modelo 3D

Se realizó el diseño y modelación del nuevo reactor con las modificaciones realizadas. Se presenta el modelo 3D del reactor de medio poroso de flujo recíproco utilizado para todos los ensayos experimentales en este trabajo:

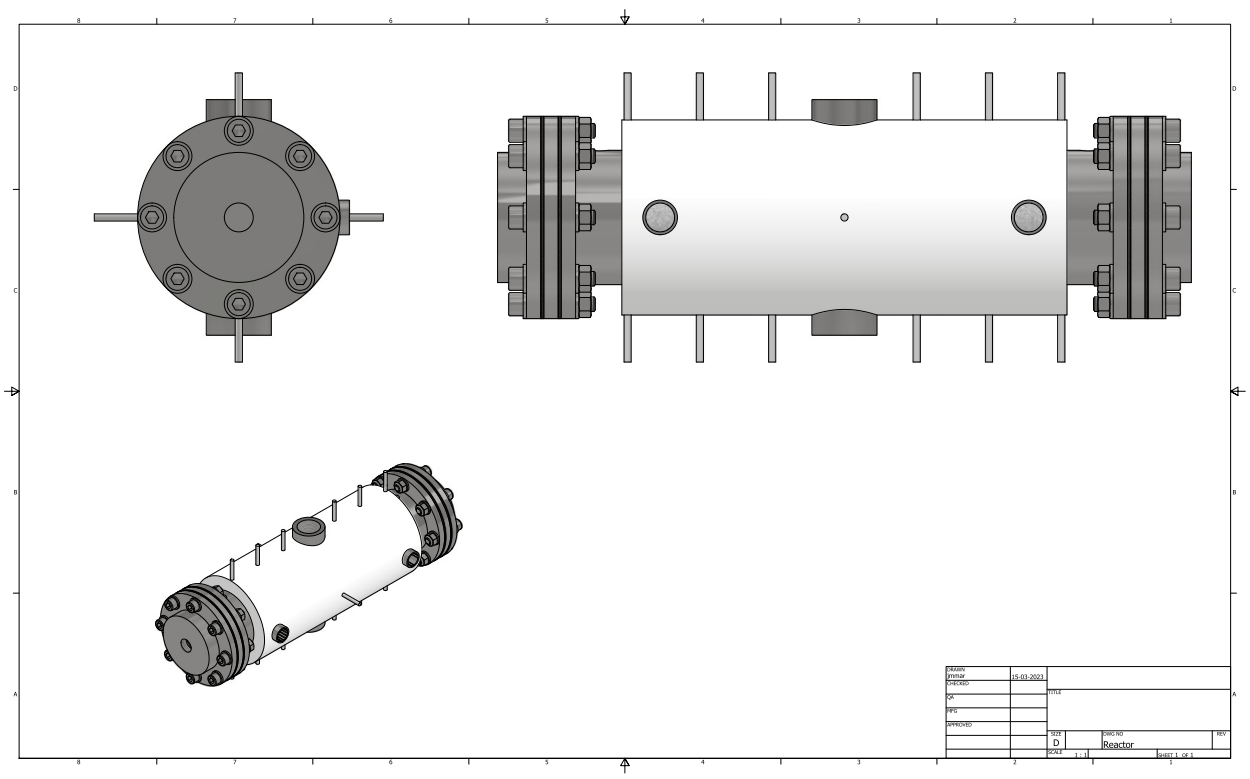


Figura C.1: Vista Frontal Reactor MPI.

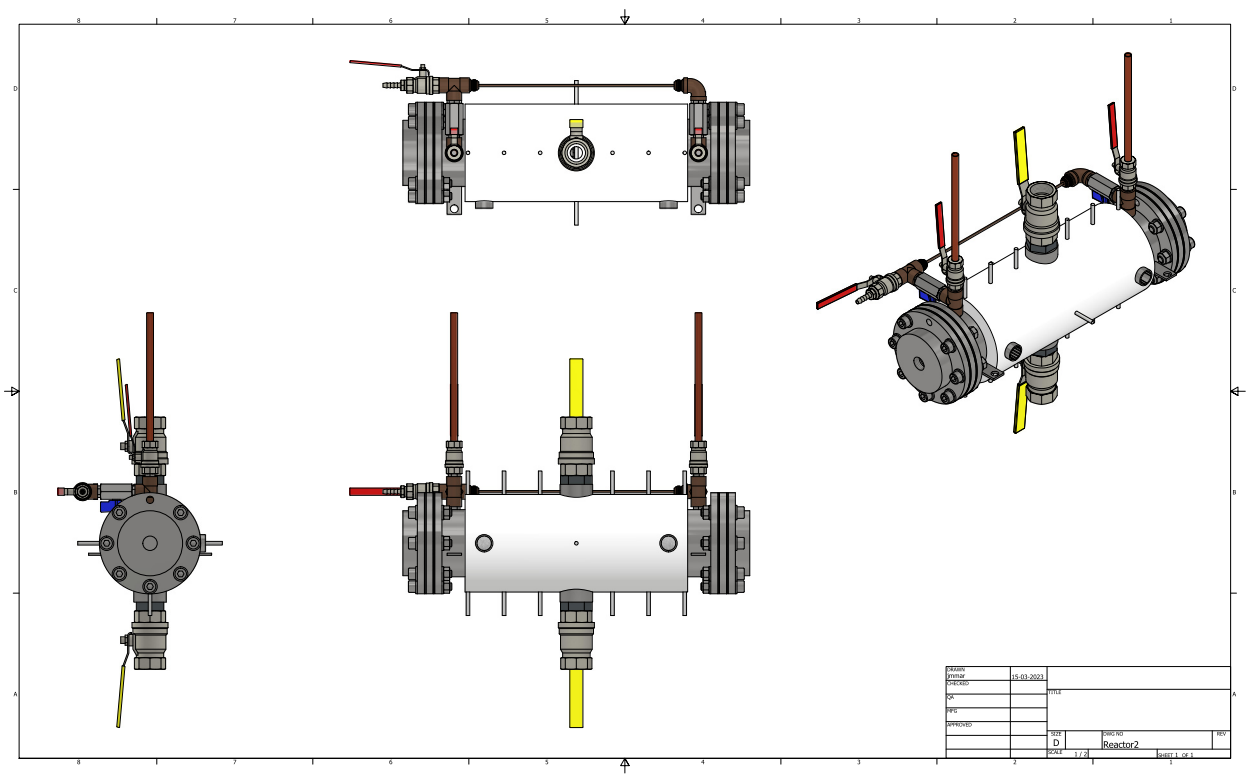


Figura C.2: Reactor con válvulas de gases de escape, combustible sólido y toma de muestra.

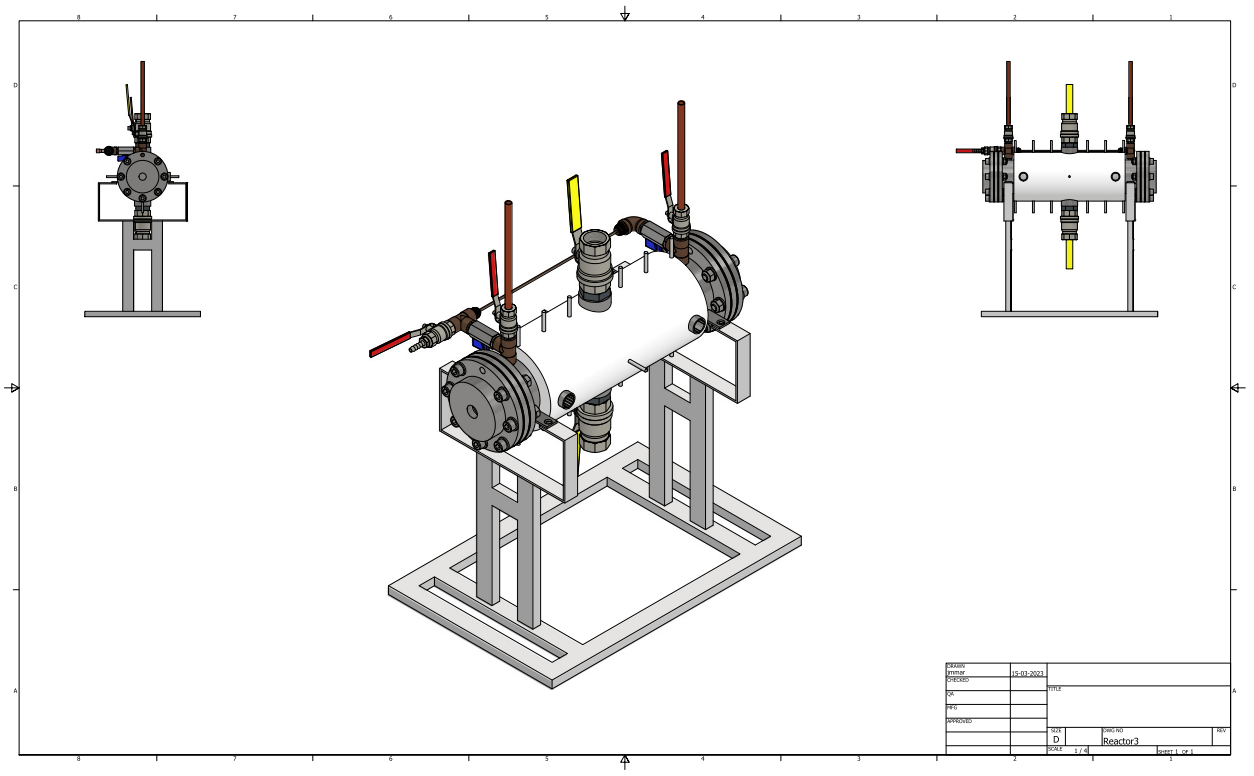


Figura C.3: Reactor MPI Instalado en su plataforma.

Anexo D. Proceso de re diseño del reactor MPI

El proceso de re diseño comienza con el retiro del aislante exterior, las varillas porta termocuplas y sus componentes exteriores.

D.1. Re diseño para modalidad recíproca

Proceso de retiro del aislante antiguo:



Figura D.1: Retiro aislante exterior.



Figura D.2: Retiro aislante exterior.

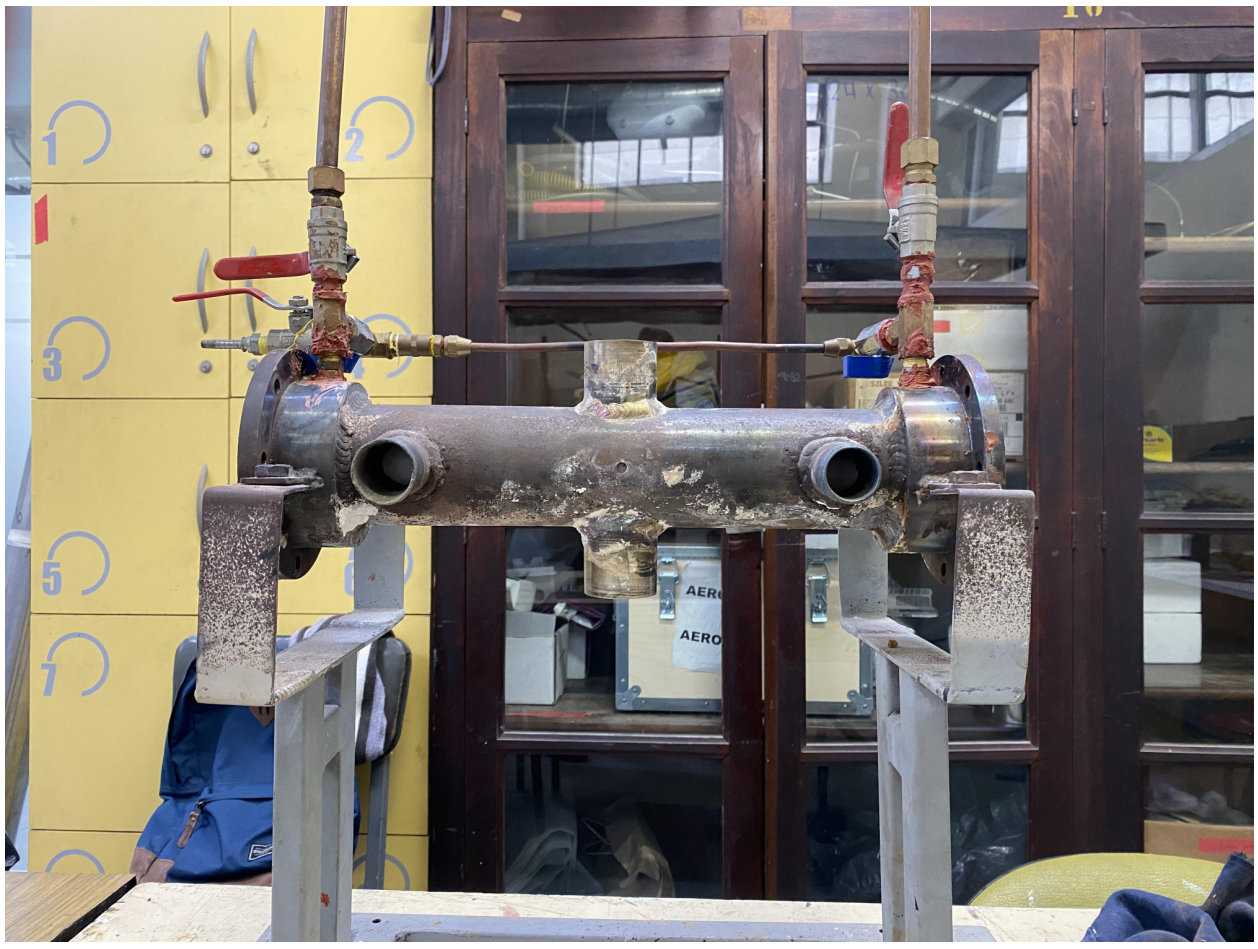


Figura D.3: Retiro aislante exterior

Extracción del medio poroso antiguo:



Figura D.4: Extracción del medio poroso.

Instalación del nuevo medio poroso:



Figura D.5: Medio poroso ordenado para aislación.



Figura D.6: Medio poroso aislado.

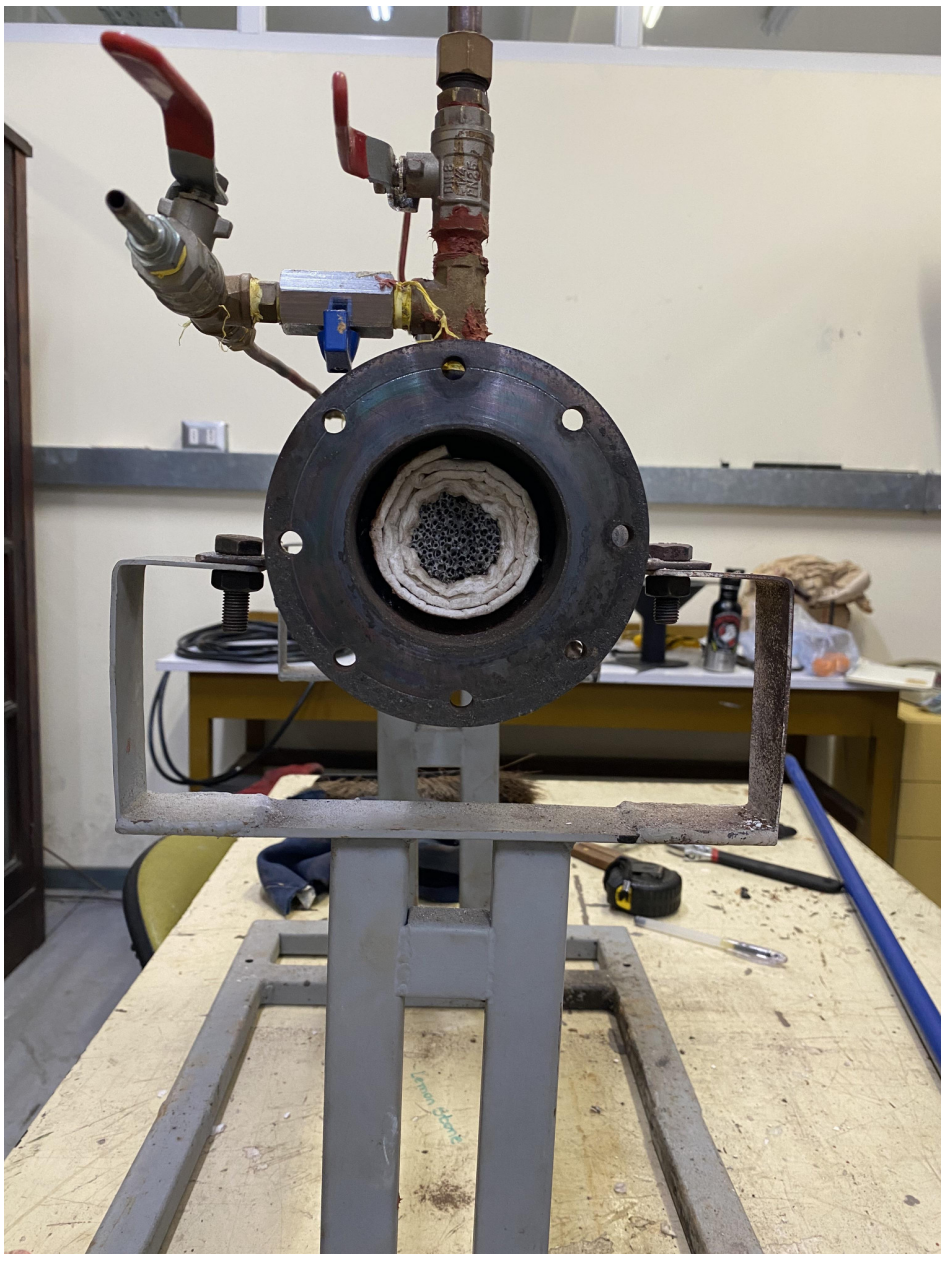


Figura D.7: Instalación del nuevo medio poroso.

Instalación varillas porta termocuplas:

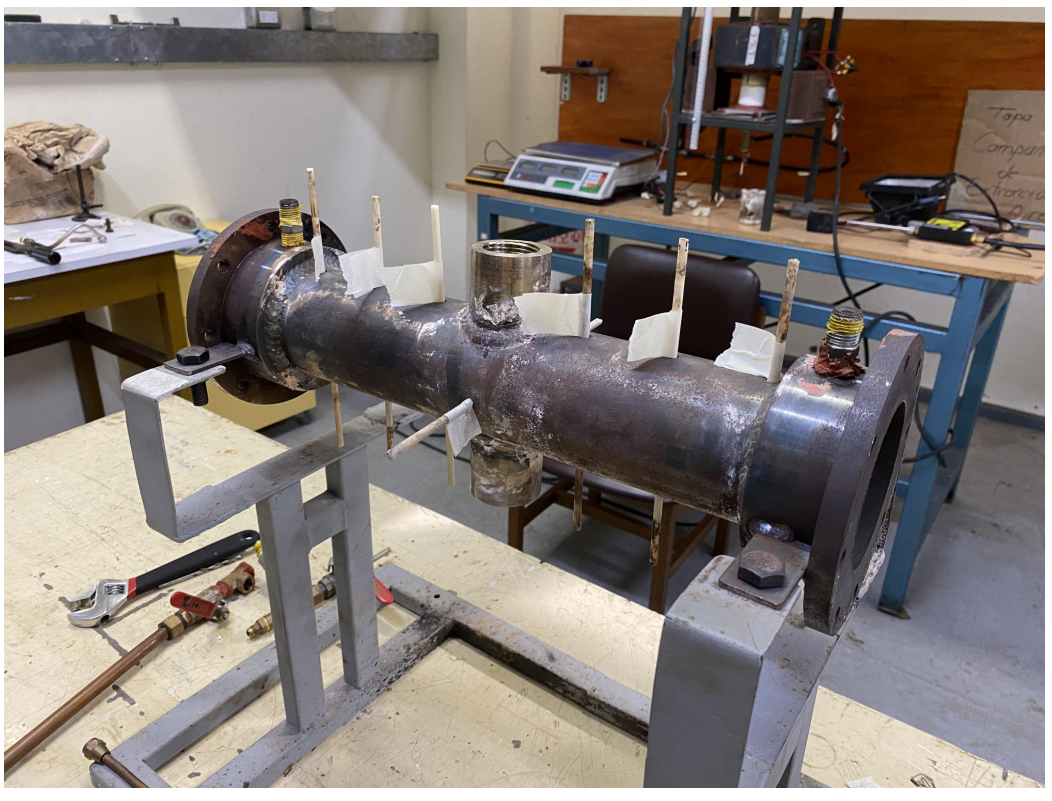


Figura D.8: Instalación varillas porta termocuplas.



Figura D.9: Sellado de varillas.

Reactor aislado exterior y con termocuplas instaladas:

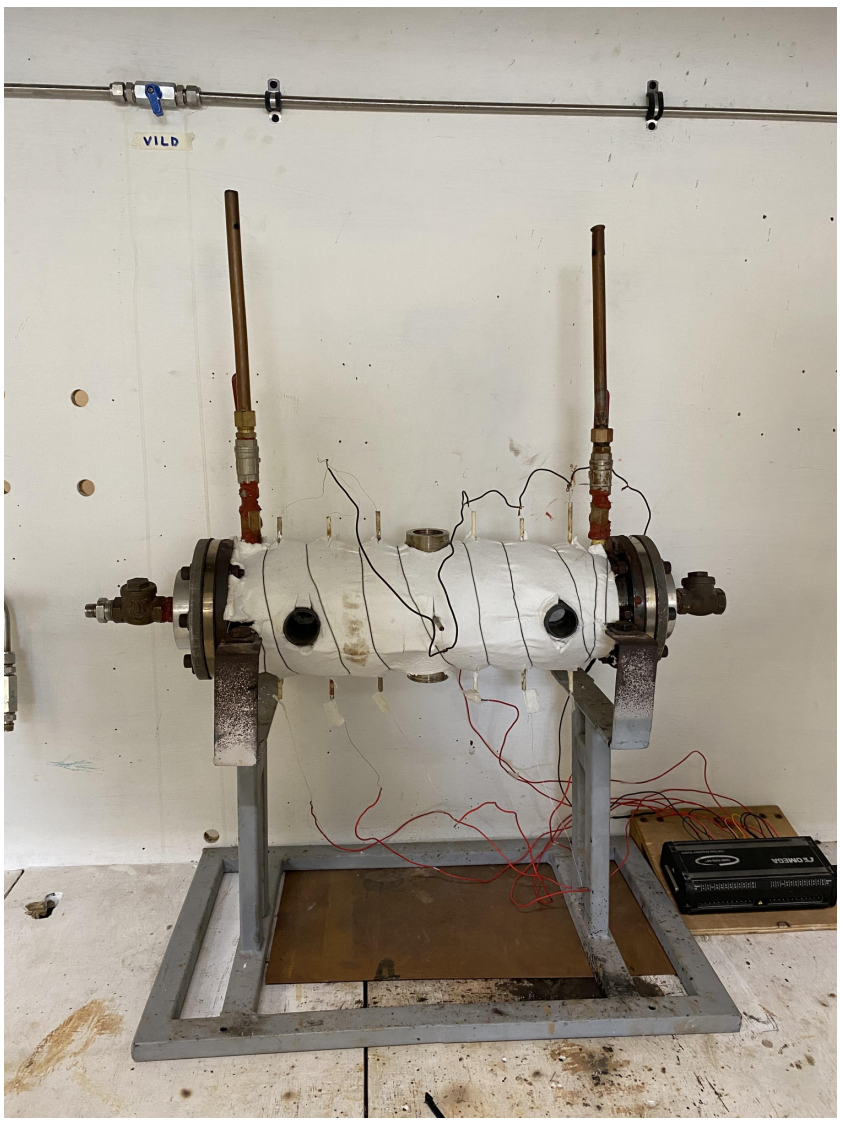


Figura D.10: Reactor finalizado y listo para ensayar.

D.2. Re diseño cámara para combustible sólido:

Perforación del MPI para cámara de combustible sólido:
Se observa la zona central del reactor, donde previo hasta este proceso el medio poroso se encuentra de forma continua a lo largo del reactor.



Figura D.11: Medio poroso inerte sin perforación

Se utilizará una herramienta dremel para la perforación del medio poroso, esto debido a que se requiere de una herramienta que tenga la capacidad de perforar el medio poroso inerte sin destruirlo.



Figura D.12: Herramienta para perforación del medio poroso.

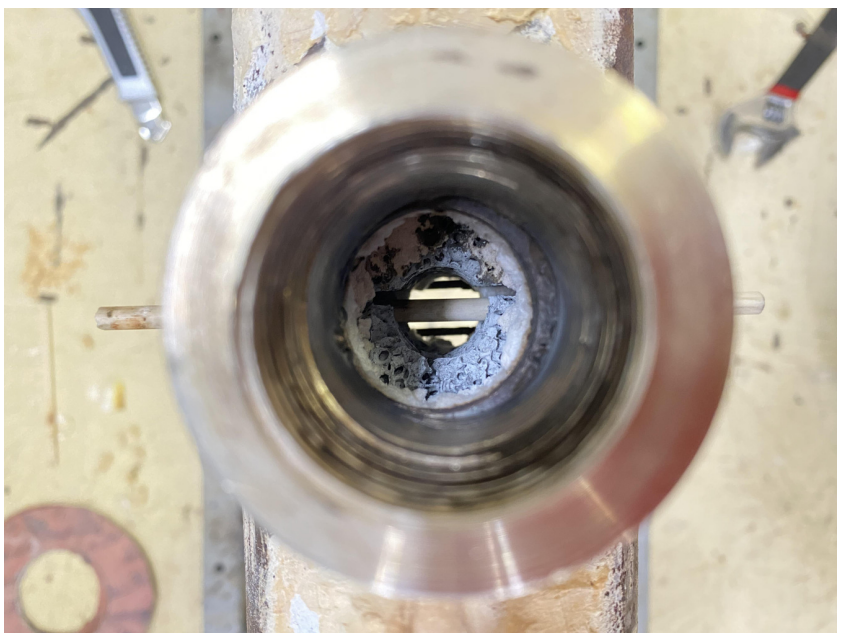


Figura D.13: Medio poroso con perforación de cámara para combustible sólido.

Anexo E. Informes Quimicos Cromatografía Gaseosa

Resultados Mezcla Rica:

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-128-22

Fecha emisión:
21.10.2022

Información del cliente			
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María		
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica		

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 1 LB	**CI 542**	
	# 2 LB	**CI 543**	
Fecha de recepción	17 de octubre de 2022	Fecha Inicio Análisis	18 de octubre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)	
Análisis	**Unidad**	**CI 542**	**CI 543**
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	13,95 ± 0,07	13,98 ± 0,04
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	6,1 ± 0,2	6,7 ± 0,1
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,658 ± 0,002	0,812 ± 0,006
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	3,89 ± 0,01	5,41 ± 0,04

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: No se presentan observaciones

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

DEPARTAMENTO DE QUIMICA UTFSM

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

Figura E.1: Resultados químicos línea base.

Resultados Mezclas Pobres:

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-161-22

Fecha emisión:
14.11.2022

Información del cliente			
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María		
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica		

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Oxígeno, Monóxido de carbono, Dióxido de carbono.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 14 LB	**CI 595**	
	# 15 LB	**CI 596**	
	# 16 LB	**CI 597**	
Fecha de recepción	10 de noviembre de 2022	Fecha Inicio Análisis	11 de noviembre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)		
Análisis	**Unidad**	**CI 595**	**CI 596**	**CI 597**
Oxígeno	[mol O_2/100 moles de gas]	16,8 ± 0,9	16,5 ± 0,2	17,5 ± 0,9
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	0,183 ± 0,006	0,183 ± 0,002	0,187 ± 0,003
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,500 ± 0,001	0,80 ± 0,01	0,900 ± 0,008

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: No se presentan observaciones

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM VALPARAÍSO

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio | Fecha de edición: junio de 2020 | v03

Av. España 1680, Valparaíso | servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl | 32 2 654219

QUI-161-22

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

Página 1 de 1

Figura E.2: Resultados químicos línea base.

Resultados con incorporación de vapor:

UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-166-22

Fecha emisión:
24.11.2022

Información del cliente			
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María		
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica		

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 6 LB+V	**CI 613**	
	# 7 LB+V	**CI 614**	
Fecha de recepción	22 de noviembre de 2022	Fecha Inicio Análisis	23 de noviembre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)	
Análisis	**Unidad**	**CI 613**	**CI 614**
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	15,11 ± 0,04	16,94 ± 0,05
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	7,9 ± 0,4	9,0 ± 0,4
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,803 ± 0,006	1,02 ± 0,03
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	8,8 ± 0,1	9,8 ± 0,1

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: No se presentan observaciones

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

DEPARTAMENTO DE QUIMICA UTFSM VALPARAISO

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio | Fecha de edición: junio de 2020 | v03

Av. España 1680, Valparaíso | servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl | 32 2 654219

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

QUI-166-22

Página 1 de 1

Figura E.3: Resultados químicos con incorporación de vapor.

Resultados Biomasa:

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-174-22

Fecha emisión:
21.12.2022

Información del cliente			
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María		
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica		

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 1B-AB	**CI 625**	
	# 2B-BA	**CI 626**	
	# 3B-AB	**CI 627**	
	# 4B-BA	**CI 628**	
Fecha de recepción	12 de diciembre de 2022	Fecha Inicio Análisis	14 de diciembre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)			
Análisis	**Unidad**	**CI 625**	**CI 626**	**CI 627**	**CI 628**
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	20,3 ± 0,2	21,4 ± 0,2	19,16 ± 0,06	18,68 ± 0,08
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	11,0 ± 0,3	10,3 ± 0,4	10,0 ± 0,2	10,13 ± 0,03
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,352 ± 0,004	1,01 ± 0,02	1,30 ± 0,04	1,41 ± 0,04
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	6,64 ± 0,01	6,80 ± 0,02	6,21 ± 0,02	7,56 ± 0,03

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: En las 4 muestras se detecta la presencia de Hidrocarburos > C_2.
Las concentraciones aproximadas son: CI 625 = 0,4 %; CI 626 = 0,9 %; CI 627 = 1,7 %; CI 628 = 2 %

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM
VALPARAÍSO

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio — Fecha de edición: junio de 2020 — v03

Av. España 1680, Valparaíso — servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl — 32 2 654219

QUI-174-22

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

Página 1 de 1

Figura E.4: Resultados químicos con biomasa.

Resultados Carbón:

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-194-22

Fecha emisión:
29.12.2022

Información del cliente			
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María		
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica		

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	C# 2	**CI 656**	
	C# 3	**CI 657**	
Fecha de recepción	28 de diciembre de 2022	Fecha Inicio Análisis	29 de diciembre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)	
Análisis	**Unidad**	**CI 656**	**CI 657**
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	13,7 ± 0,2	14,8 ± 0,3
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	8,7 ± 0,4	8,4 ± 0,5
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,460 ± 0,004	1,17 ± 0,01
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	6,3 ± 0,3	6,0 ± 0,4

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: En las 2 muestras se detecta la presencia de Hidrocarburos > C_2.
Las concentraciones aproximadas son: CI 656 = 0,2 %; CI 657 = 0,6 %.

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM VALPARAÍSO

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio | Fecha de edición: junio de 2020 | v03

Av. España 1680, Valparaíso | servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl | 32 2 654219

QUI-194-22

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

Página 1 de 1

Figura E.5: Resultados químicos con carbón.

Resultados con incorporación de vapor al combustible:

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-189-22

Fecha emisión:
28.12.2022

Información del cliente		
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María	
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica	

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 6BV_2	**CI 649**	
	# 7BV_1	**CI 650**	
Fecha de recepción	26 de diciembre de 2022	Fecha Inicio Análisis	27 de diciembre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)	
Análisis	**Unidad**	**CI 649**	**CI 650**
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	10,8 ± 0,3	10,4 ± 0,2
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	5,4 ± 0,4	9,0 ± 0,1
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	2,41 ± 0,06	2,94 ± 0,04
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	3,0 ± 0,2	1,38 ± 0,02

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: En las 2 muestras se detecta la presencia de Hidrocarburos > C_2.
Las concentraciones aproximadas son: CI 649 < 0,3 %; CI 650 < 0,3 %.

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM VALPARAÍSO

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio | Fecha de edición: junio de 2020 | v03

Av. España 1680, Valparaíso | servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl | 32 2 654219

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

QUI-189-22

Página 1 de 1

Figura E.6: Resultados químicos biomasa con vapor.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-191-22

Fecha emisión:
28.12.2022

Información del cliente			
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María		
Solicitante	Mario Toledo	José Márquez S.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica		

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno. Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Metano.		
Tipo de muestra	Muestras gaseosas		
Identificación muestra	# 9CV_1	**CI 652**	
	# 10CV_2	**CI 653**	
Fecha de recepción	27 de diciembre de 2022	Fecha Inicio Análisis	28 de diciembre de 2022
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas ASTM D1946-90 (2011) UOP 603-88		
Responsable del muestreo	José Márquez S		

RESULTADOS

		Resultados (*)	
Análisis	**Unidad**	**CI 652**	**CI 653**
Hidrógeno	[mol H_2/100 moles de gas]	4,8 ± 0,2	3,41 ± 0,02
Monóxido de carbono	[mol CO/100 moles de gas]	3,0 ± 0,2	2,2 ± 0,2
Dióxido de carbono	[mol CO_2/100 moles de gas]	0,216 ± 0,002	0,332 ± 0,001
Metano	[mol CH_4/100 moles de gas]	2,06 ± 0,07	1,6 ± 0,1

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X** ± s; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.
Observaciones: En las 2 muestras se detecta la presencia de Hidrocarburos > C_2.
Las concentraciones aproximadas son: CI 652 < 0,1 %; CI 653 = 0,2 %.

Fin del documento

Gisela Bruhn L.
Químico analista

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM VALPARAÍSO

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio — Fecha de edición: junio de 2020 — v03
Av. España 1680, Valparaíso — servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl — 32 2 654219
QUI-191-22
Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.
Página 1 de 1

Figura E.7: Resultados químicos carbón con vapor.