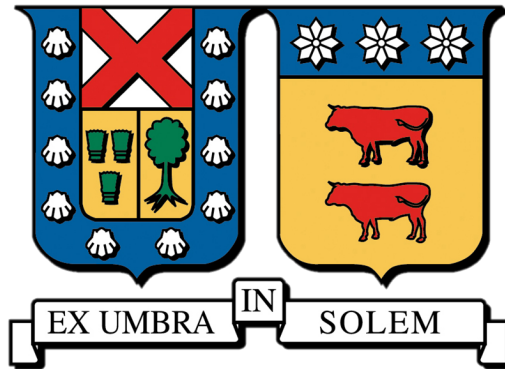


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**"REDISEÑO DE UN GASIFICADOR ROTATORIO INDIRECTAMENTE
IRRADIADO PARA SU OPERACIÓN CON BIOMASA"**

MATÍAS ANDRÉS GONZÁLEZ ARROYO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA:
DR. ING. MARIO TOLEDO T.

PROFESOR CORREFERENTE:
MG. ING. ANDRÉS ARRIAGADA R.

VALPARAÍSO, CHILE
2024

Agradecimientos

Quiero agradecer...

A mis amigos, por hacer de la vida universitaria momentos inolvidables.

A mi familia, por apoyarme en mis metas y darme la educación para ser una gran persona y a mis mascotas, porque ellos son parte de la familia.

A mi polola, tiempo con ella es una bocanada de aire fresco.

Al equipo de gasificación solar, Andrés Arriagada, Lorena Espinoza, Nicolás Arancibia, Ignacio Guzmán, David Carrillo y muchos más que aportaron a la realización de este trabajo.

A mi profesor guía Mario Toledo, por traer proyectos que aportan a un mejor futuro para todos.

A mi profesora de educación básica, por darme los fundamentos, leer, escribir, matemáticas y formación como persona.

A todos ellos, y a quienes hayan sido un apoyo.
Gracias TOTALES.

Resumen

El presente trabajo se enmarca en el proyecto Fondecyt n°1241030, titulado “Renewable hydrogen production from biomass using a novel allothermal rotary porous media reactor” o "Producción de hidrógeno renovable a partir de biomasa utilizando un prototipo de Reactor alotérmico rotatorio de medios porosos". El objetivo principal es rediseñar un reactor rotatorio de medio poroso híbrido, expuesto indirectamente a energía solar concentrada, para su operación con biomasa.

La introducción contextualiza el proyecto dentro del “Plan Nacional de Eficiencia Energética” y la “Estrategia Nacional de Hidrógeno” desarrollada por el Ministerio de Energía de Chile. A través de la ANID, este proyecto Fondecyt busca potenciar el hidrógeno como vector energético. Se explora el uso de energía solar para generar un gas de síntesis rico en hidrógeno, utilizando combustibles carbonosos como el carbón y la biomasa. El marco teórico presenta los fundamentos de este desarrollo, mientras que el estado del arte analiza los avances actuales, incluyendo tratamientos para la biomasa, fracciones volumétricas de hidrógeno obtenidas en desarrollos previos, y tipos de lechos utilizados para la gasificación.

El trabajo detalla el desarrollo actual para mejorar la calidad del gas de síntesis. Se describe la aplicación de mejoras en el reactor, como el rediseño de piezas para reducir las pérdidas de calor, optimización de la óptica para mejorar la transmisión de radiación, y mejoras en el manejo de gases y la hermeticidad del reactor. Estas mejoras son clasificadas en prioritarias, opcionales y descartadas según los criterios establecidos.

La puesta en marcha del reactor se realizó replicando experiencias de tesis previas. Se aplicó calor a la placa receptora del reactor, se insertaron carbón y alúmina, se introdujo vapor, y se rotó el reactor para generar un gas de síntesis, el cual fue medido con un analizador de gases. Se presentan y discuten los resultados obtenidos en tres pruebas realizadas.

Finalmente, se plantean conclusiones y sugerencias para futuros trabajos, con el objetivo de que el proyecto continúe y se perfeccione, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de la producción de hidrógeno a partir de biomasa.

Abstract

This thesis is part of the Fondecyt project No. 1241030, titled Renewable hydrogen production from biomass using a novel allothermal rotary porous media reactor."The main objective is to redesign a hybrid rotary porous media reactor, indirectly exposed to concentrated solar energy, for biomass operation.

The introduction contextualizes the project within the “Plan Nacional de Eficiencia Energética“ and the “Estrategia Nacional de Hidrógeno“ developed by the Ministry of Energy of Chile. Supported by ANID, this Fondecyt project aims to enhance hydrogen as an energy vector. It explores the use of solar energy to generate a hydrogen-rich synthesis gas using carbonaceous fuels such as coal and biomass. The theoretical framework presents the fundamentals of this development, while the state of the art reviews current advancements, including biomass treatments, volumetric fractions of hydrogen obtained in previous developments, and types of beds used for gasification.

The work details the current development aimed at improving the quality of the synthesis gas. It describes the application of improvements to the reactor, such as the redesign of components to reduce heat losses, optimization of optics to enhance radiation transmission, and improvements in gas handling and reactor hermeticity. These improvements are classified as priority, optional, and discarded according to established criteria.

The reactor was commissioned by replicating the experiences of previous thesis students. Heat was applied to the reactor’s receiver plate, coal and alumina were inserted, steam was introduced, and the reactor was rotated to generate a synthesis gas, which was measured with a gas analyzer. The results obtained in three tests are presented and discussed.

Finally, conclusions and suggestions for future work are presented, with the aim of continuing and perfecting the project, improving the efficiency and sustainability of hydrogen production from biomass.

Glosario de términos

Abreviaturas

RPMR Rotary porous media reactor

Letras griegas

ρ Densidad [kg/m^3]

Fórmulas químicas

CO Monóxido de carbono

CO₂ Dióxido de carbono

H₂ Hidrógeno

CH₄ Metano

N₂ Nitrógeno

O₂ Oxígeno

H₂O Agua

Al₂O₃ Alúmina

NO_x Óxidos de nitrógeno

SO₂ Dióxido de azufre

Lista de símbolos

Q	Caudal	[l/min]
A	Área	[m^2]
\dot{m}_i	Flujo másico del elemento i	[kg/min]
\dot{V}_{Total}	Flujo volumétrico total	[m^3/min]
C_p	Calor específico	[J/kgK]
P	Presión	[bar]
T	Temperatura	[$^{\circ}C$]

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Contexto general	3
1.1.1. Chile: Plan nacional de eficiencia energética	3
1.1.2. Contexto: Fuentes energéticas	4
1.2. Hidrógeno y syngas como vector energético	5
1.2.1. Proyecto Fondecyt N°1241030	6
1.3. Marco teórico	8
1.3.1. Captación de energía solar	8
1.3.2. Reformado por vapor	9
1.3.2.1. Pirólisis	10
1.3.2.2. Oxidación parcial (POX) de hidrocarburos	11
1.3.2.3. Materia prima gasificación	11
1.3.3. Datos y toma de muestras	13
1.3.3.1. Cromatografía de gases	13
1.3.3.2. Analizador de gases	15
1.4. Estado del arte	16
1.4.1. Contenido de hidrógeno en gas de síntesis	16
1.4.2. Tipos de lecho	18
1.4.2.1. Gasificación solar: Lecho empacado	19
1.4.2.2. Gasificación solar: Lecho fluidizado	19
1.4.2.3. Gasificación solar: con vortex-flow	20
1.4.3. Revisión de literatura	21
1.5. Objetivos	23
1.5.1. Objetivo general	23
1.5.2. Objetivos específicos	23
2. Materiales y métodos	24
2.1. Disposición general de la instalación	24
2.2. Equipos principales	26
2.2.1. Helióstato	26
2.2.2. Concentrador solar	26
2.2.3. Reactor rotatorio de medios porosos	27
2.2.3.1. Material del medio poroso	27
2.2.3.2. Aislación del reactor	27
2.2.4. Suministro de vapor	28

2.2.5.	Sistema de extracción, muestreo y análisis de gases	29
2.3.	Sistemas de medición y control	30
2.3.1.	Sistema de adquisición de datos de temperatura	30
2.4.	Seguridad	30
2.5.	Procedimiento experimental	31
2.5.1.	Procedimiento de operación helióstato	31
2.5.2.	Procedimiento de instalación y operación del reactor rotatorio	32
2.5.3.	Procedimiento de instalación y operación de la caldera de vapor	32
2.5.4.	Sistema de muestreo de gases	33
2.5.5.	Guía de operación general del experimento (general)	33
3.	Rediseño del reactor	34
3.1.	Mejoras en relación al reactor	37
3.1.1.	Cambiar acoplado rotatorio del reactor	37
3.1.1.1.	Antecedentes pérdida de calor en acoplado	37
3.1.1.2.	Fabricación de acoplado sustituto	40
3.1.1.3.	Reajuste dimensiones base	41
3.1.2.	Cambio de placa receptora de radiación	43
3.1.2.1.	Propiedades del Vidrio de Sílice Vítreo (SiO ₂)	43
3.1.2.2.	Cotización y Dimensiones	44
3.1.3.	Optimización de cavidad interna del reactor	45
3.2.	Mejoras en relación a la óptica solar	46
3.2.1.	Cambiar el concentrador parabólico.	46
3.2.1.1.	Características de los concentradores solares utilizados	47
3.2.1.2.	Estado final nuevo concentrador	48
3.2.2.	Agregar un segundo espejo hiperbólico para mejorar el ángulo de ataque	49
3.2.3.	Incorporar una etapa de lupa	50
3.2.4.	Mejorar la estructura del helióstato	52
3.3.	Mejoras en cuanto al manejo de gases	55
3.3.1.	Mejorar el sistema de extracción de muestras	55
3.3.2.	Mejora en tapa para carga de reactivos	56
3.3.3.	Verificar la estanqueidad del reactor	57
3.3.3.1.	Prueba de estanqueidad 04-06-2024	58
3.4.	Otras mejoras adicionales	62
3.4.1.	Medición de Temperaturas	62
3.4.2.	Limpieza del Banco de Pruebas Solar	66
3.4.3.	Reparación de la Plataforma del Helióstato	67
4.	Resultados experimentales y análisis	69
4.1.	Registros temperatura interna reactor	69
4.2.	Registros con extracción de gases	70
4.2.1.	Test 10/07/2024	71
4.2.2.	Test 11/07/2024	73
4.2.3.	Test 12/07/2024	76

4.2.3.1.	Ratio de CO y H ₂	79
4.2.3.2.	Concentración de hidrógeno	80
4.2.4.	Resumen pruebas	81
4.2.5.	Otros datos relevantes	83
5.	Conclusiones	84
5.1.	Recomendaciones para futuros trabajos	85
Anexos		87
A.	Guía de operación general del experimento	87
B.	Procedimiento Testeo termocuplas tipo K	90
C.	Procedimiento de instalación de concentrador parabólico nuevo	91
D.	Análisis de trabajo seguro y listado de chequeo para operación	96
E.	Pruebas cámara termográfica Testo sobre acoplado rotatorio antiguo	97
F.	Planos de piezas y conjuntos	98
G.	Facturas de elementos fabricados y procesos de mecanizado	107
H.	Resultados de composición elemental y características de la biomasa y el carbón	111
I.	Análisis de esfuerzos placa cuarzo inventor	112
J.	Códigos Matlab	114
Bibliografía		120

Índice de Tablas

1.1.	Tabla de características de diferentes tipos de carbón.	12
1.2.	Resumen de Tipos de Termopares [12]	13
1.3.	Parámetros de control y resultados del HFC.	17
2.1.	Parámetros operativos del reactor [28]	27
2.2.	Parámetros caldera Precision Steam Generator E-1500 [28]	28
3.1.	Resultados de Análisis de cromatografía de gases de experimentos previos [28]	35
3.2.	Plan de mejora para elevar la temperatura del reactor, clasificando cada mejora según problema, acción específica y luego prioridad.	36
3.3.	Características del concentrador antiguo[7] y el nuevo[31]	47
4.1.	Tabla de datos experimentales día 1 de pruebas.	71
4.2.	Tabla de datos experimentales día 2 de pruebas.	73
4.3.	Tabla de datos experimentales día 3 de pruebas.	76
4.4.	Resumen de datos experimentales de los tres días de pruebas.	81
4.5.	Concentración de especies en porcentaje para tres pruebas realizadas por trabajos previos [28]	82
4.6.	Concentración de especies en porcentaje para los tres días de pruebas. . . .	82

Índice de Ilustraciones

1.1.	Estrategia nacional del hidrógeno del Ministerio de energía de Chile (2020).	3
1.2.	Mapa de irradiación Solar Horizontal a nivel mundial.[5]	4
1.3.	Principales aplicaciones del hidrógeno producido por gasificación [6]	5
1.4.	Esquema básico del RPMP auto-térmico (A). Mecanismo de transferencia de calor en la zona de reacción (B). Perfil de temperatura típico dentro del reactor de la fase sólida (T_s) y gaseosa (T_g) (C). Esquema básico del RPMP alotérmico (D). Mecanismo de transferencia de calor entre la placa emisora y la zona de reacción (E). Perfil de temperatura típico dentro del reactor de la fase sólida (T_s) y gaseosa (T_g) (F).	7
1.5.	Campo solar térmico	8
1.6.	Radiación en laboratorio de energías renovables según explorador solar [8]	9
1.7.	Equilibrio de la composición del sistema estequiométrico de la ecuación 1.1 : (a) como función de la presión a 1000 K, y (b) como función de la temperatura a 10 bar. Se han omitido las especies con fracciones molares menores a 10^{-3} . (Carbón: $C_1H_{0.47}O_{0.055}S_{0.022}N_{0.004}$) [9]	10
1.8.	Esquema básico de un cromatógrafo de gases donde: (1) gas de arrastre, (2) inyector de muestra, (3) entrada, (4) columna analítica, (5) detector y (6) Computadora. [13]	14
1.9.	Salida del cromatógrafo. [13]	14
1.10.	Analizador de gases Testo 350 [?]	15
1.11.	Vista en sección del reactor de lecho empacado en forma de L, irradiado directamente.	19
1.12.	Representación esquemática del reactor solar de lecho fluidizado irradiado directamente.[21]	20
1.13.	Esquema del reactor de flujo en vórtice solar irradiado directamente.[22]	21
2.1.	P&ID experimento gasificación solar de carbón y vapor de agua [26]	24
2.2.	Helióstato solar del proyecto (Fuente: propia).	26
2.3.	Concentrador montado visto frontalmente por su parte reflectante.	26
2.4.	Medio poroso utilizado en el reactor (blanco, imagen referencial)	27
2.5.	Aislación externa del reactor (fuente: propia)	28
2.6.	Aislación interior del reactor (fuente: propia)	28
2.7.	Caldera electromecánica (fuente: Elaboración propia)	29
2.8.	Bolsa de muestra. Se aprecia en la figura que está hinchada por la muestra extraída del proceso.	29
2.9.	Termocuplas en el reactor	30
3.1.	Ciclo de Deming	34

3.2.	Gráfico Temperatura [°C] vs. tiempo [h] dentro del reactor, medido por termocuplas tipo K 1,2,3 [28].	35
3.3.	Acoplado rotatorio en la parte inferior de la figura, junto a reactor en el fondo.	37
3.4.	Rayos proyectados del concentrador parabólico previamente usado sobre el acoplado rotatorio previamente utilizado	38
3.5.	Silueta del foco generado sobre el acoplado rotatorio previamente utilizado	38
3.6.	Acoplado rotatorio en la parte inferior de la figura, junto a reactor en el fondo.	39
3.7.	Distribución térmica simulación 12600 segundos [28].	39
3.8.	Dimensiones nuevo acoplado rotatorio.	40
3.9.	Diseño original de reactor montado en base de rodamientos.	41
3.10.	Rediseño de reactor montado en base de rodamientos.	42
3.11.	Reactor utilizado para pruebas previas en casa central.	45
3.12.	Estado del concentrador solar utilizado en pruebas previas al cambio. . . .	46
3.13.	Concentrador montado visto frontalmente por su parte reflectante.	48
3.14.	Gráfica de valores obtenidos de temperatura en foco usando concentrador fresnel según referencia [33].	50
3.15.	Imagen referencial de un disco fresnel comercial	51
3.16.	Perfil T-slot de aluminio referencial	52
3.17.	Helióstato montado visto desde la parte posterior. [28]	52
3.18.	Soporte de helióstato con movimiento por accionamiento eléctrico	53
3.19.	Proyección de radiación generada por helióstato.	53
3.20.	Tapa de entrada de reactivos, con los pernos ubicados para mejor agarre. .	56
3.21.	Rosca de tapa de suministros con teflón.	58
3.22.	Pernos para zona de termocuplas con teflón.	59
3.23.	Acoplado de suministro rotatorio con teflón en rosca.	59
3.24.	Setup prueba de estanqueidad	59
3.25.	Prueba de burbujeo reactor	60
3.26.	Empaquetadura de placa receptora con añadido de teflón.	60
3.27.	Burbujeo en pernos de placa receptora.	61
3.28.	Hat (placa azul) montado sobre Raspberry Pi en reactor rotatorio de medios porosos.	62
3.29.	Red de router a través del cual se realiza conexión Raspberry Pi y computador.	63
3.30.	Directorio de programa para medir temperaturas dentro de Raspberry Pi (HAT MCC134).	64
3.31.	Programa a través del cual se visualiza y registra temperaturas medidas en reactor rotatorio de medios porosos, dentro de Raspberry Pi.	65
3.32.	Estado del banco de pruebas solar previo a la limpieza desarrollada por el tesista (A. Zona gasificador, B. Zona helióstato)	66
3.33.	Estado del banco de pruebas solar posterior a la limpieza desarrollada por el tesista (A. Zona gasificador(1), B. Zona gasificador (2), C. Zona helióstato)	66
3.34.	Plataforma de helióstato en estado actual (agosto de 2024)	67
3.35.	Cotización para la reparación de la plataforma del helióstato.	68

4.1.	Configuración pruebas reactor.	70
4.2.	Temperaturas en reactor día 1 pruebas; ascendente	71
4.3.	Temperaturas en reactor día 1 pruebas; enfriamiento	72
4.4.	ppm de CO y H ₂ en función del tiempo el día 1 de pruebas	72
4.5.	ppm de CO, C _x H _y , H ₂ y % O ₂ ref. y CO ₂ máx. en función del tiempo el día 1 de pruebas.	73
4.6.	Temperaturas en reactor día 2 pruebas.	74
4.7.	Temperaturas en reactor día 2 pruebas.	74
4.8.	Temperaturas en reactor día 2 pruebas.	75
4.9.	ppm de CO y H ₂ en función del tiempo el día 2 de pruebas	75
4.10.	ppm de CO, C _x H _y , H ₂ y % O ₂ ref. y CO ₂ máx. en función del tiempo el día 2 de pruebas.	76
4.11.	Temperaturas en reactor día 3 pruebas.	77
4.12.	Temperaturas en reactor día 3 pruebas.	77
4.13.	Temperaturas en reactor día 3 pruebas.	78
4.14.	ppm de CO y H ₂ en función del tiempo el día 3 de pruebas.	78
4.15.	ppm de CO, C _x H _y , H ₂ y % O ₂ ref. y CO ₂ máx. en función del tiempo el día 3 de pruebas.	79
4.16.	Ratio entre las ppm de CO y H ₂ en función del tiempo los 3 días de pruebas.	79
4.17.	ppm de H ₂ y en función del tiempo los 3 días de pruebas.	80
B.1.	Termómetro digital DT-8891A (fuente: propia)	90
C.1.	Estructura concentrador antiguo (fuente: propia)	91
C.2.	Trabajo en cortadora	92
C.3.	Trabajo en taladro	92
C.4.	Montaje de estructura soporte concentrador.	93
C.5.	Concentrador montado visto frontalmente por su parte reflectante.	94
C.6.	Concentrador montado visto por la parte posterior.	94
C.7.	Concentrador nuevo montado y tapado para su cuidado.	95
E.1.	Imágen generada por cámara termográfica Testo 868 [28]	97
F.1.	Plano de nuevo acoplado rotatorio.	98
F.2.	Plano del diseño original del reactor montado en base de rodamientos.	99
F.3.	Plano del rediseño de reactor montado en base de rodamientos.	100
F.4.	Plano de explosionado de la zona donde va la placa receptora.	101
F.5.	Plano disco de metal para ubicar placa receptora.	102
F.6.	Plano de placa receptora de metal.	103
F.7.	Plano de placa receptora de cuarzo fabricada por Soviquim.	104
F.8.	Plano de perno donde van ubicadas las termocuplas.	105
F.9.	Plano Rotary porous media reactor RPMR post rediseño.	106
G.1.	Presupuesto acoplado rotatorio.	107
G.2.	Factura acoplado rotatorio.	108
G.3.	Factura disco de cuarzo para placa receptora de radiación.	109
G.4.	Factura de modificaciones y adaptaciones sobre reactor y base de reactor por cambio de dimensiones dado el nuevo acoplado rotatorio.	110
H.1.	Análisis elemental del carbón sub-bituminoso utilizado para pruebas en reactor, hoja 1.	111

H.2.	Análisis elemental del carbón sub-bituminoso utilizado para pruebas en reactor, hoja 2.	112
I.1.	Propiedades mecánicas de la placa de cuarzo.	113
I.2.	Test placa de cuarzo, factor de seguridad.	113

Capítulo 1

Introducción

Desde el origen de las civilizaciones modernas, la energía ha acompañado al ser humano en su carrera ascendente al desarrollo tecnológico. Esta energía provino de diversas fuentes, las cuales van desde la energía hidráulica de los acueductos, la tracción animal, el esfuerzo físico humano, hasta el descubrimiento y uso del fuego como fuente de calor. Entre todas, esta última fuente producto de la combustión de materia orgánica ha permitido en nuestra era actual, desde la revolución industrial un uso que va más allá de la simple calefacción, transformar esta energía en movimiento.

Por lo anterior, podemos comprender que el rol que ha tomado la combustión es fundamental para el diario vivir de la humanidad, lo cual se evidencia en que a día de hoy las principales potencias productivas continúan con el uso de combustibles de origen fósil. Esto se evidencia según lo informado por el reporte anual "Coal 2023 - Analysis and forecast to 2026" [1] de la International Energy Agency (por sus siglas, IEA), la cual analiza la demanda de carbón en su pasado y la tendencia a futuro, y que en su presente edición comenta que en 2022 se alcanzó un **peak de demanda de 8.42 billones de toneladas [Bt] de carbón** con un alza de 4% respecto del año anterior. Dentro de lo mismo, la agencia comenta que el peak de demanda de carbón proyecta alcanzar dentro de los próximos años hasta **2030** por parte de China, para luego comenzar con el declive en el uso de esta fuente energética. Es importante destacar que el carbón es uno de los pilares de la economía mundial debido a su poder calorífico de 15-33 [MJ/kg] y una densidad energética de 15-25 [GJ/m³]. Es relativamente fácil de producir mediante minas a cielo abierto y subterráneas, como también fácil de transportar por ferrocarril, camión y barco. Sin embargo, es también la principal fuente de dióxido de carbono de origen humano.

Sin dejar lo anterior de lado, esto ha traído consecuencias medioambientales, dado los gases de efecto invernadero generados como lo es el dióxido de carbono, la polución ambiental por material particulado, entre otros. La comunidad científica en su empeño por desarrollar nuevas tecnologías que nos permitan enfrentar esta situación ha visto en las energías renovables una forma de tomar un rumbo sustentable y sostenible, que nos permita continuar con la civilización y con la vida de nuestro planeta.

Ligado a lo anterior, el compromiso de Chile como nación es ser uno de los **líderes de la producción de hidrógeno a partir de 2030** según su **Estrategia nacional del hidrógeno**, lo cual además considerando la amplia gama de energías renovables no convencionales existentes en el país andino, en especial energía solar, le permiten posicionarse como un referente en cuanto a la transición energética.

Por su parte, la gasificación de combustibles sólidos permite obtener un gas de síntesis rico en hidrógeno (también conocido como syngas), y bajo ciertas circunstancias permite incluso funcionar a partir de energías renovables no convencionales, como lo es la energía solar, transformando parte de esta en energía química dada su calidad de reacción endotérmica. Resulta entonces en una mejor manera de usar los combustibles, permitiendo ser una alternativa dentro de la transición energética a fuentes de energía menos contaminantes.

A través del desarrollo de este trabajo de tesis se busca mejorar el desarrollo actual de un gasificador de combustibles sólidos rotatorio de medios porosos con aporte solar, desarrollado por el trabajo en conjunto de múltiples tesis de la Universidad Técnica Federico Santa María, que posteriormente permita lograr gasificar un combustible sólido utilizando energía solar de la manera más eficiente y eficaz.

1.1. Contexto general

1.1.1. Chile: Plan nacional de eficiencia energética

Es de destacar que en nuestro país, Chile, en noviembre de 2020 el Ministerio de Energía lanzó la **Estrategia nacional del hidrógeno**, contando esta con 3 objetivos principales que se detallan en la figura 1.1:



Figura 1.1: Estrategia nacional del hidrógeno del Ministerio de energía de Chile (2020).

El 13 de febrero de 2021 se publica la ley 21305 sobre eficiencia energética, la cual tiene como objetivo elaborar el **primer Plan nacional de eficiencia energética**[2]. Esta ley en su artículo n°7 modifica el decreto ley 2.224 en el titular I artículo n°3, agregando al hidrógeno y gases combustibles derivados de este como parte de ella, y como vectores energéticos:

*''Artículo 3º.— Para los efectos de la competencia que sobre la materia corresponde al Ministerio de Energía, el sector de energía comprende a todas las actividades de estudio, exploración, explotación, generación, transmisión, transporte, almacenamiento, distribución, consumo, uso eficiente, importación y exportación, y cualquiera otra que concierna a la electricidad, carbón, gas, petróleo y derivados, energía nuclear, geotérmica y solar, **hidrógeno y combustibles a partir de hidrógeno**, y demás fuentes energéticas y vectores energéticos.''*[3]

Lo anterior viene a **hidrógeno y combustibles a partir de hidrógeno como tal**.

Por otra parte, el artículo n°9 de la ley introduce modificaciones sobre el inciso primero del artículo segundo del decreto con fuerza de ley N° 1, de 1978, del Ministerio de Minería, que también de forma simplificada busca que se establezca un **registro de las actividades productivas en relación a combustibles**, añadiendo en esto al hidrógeno y gases combustibles a partir de este.

''Artículo segundo.— Establécese un registro en el que los propietarios de las instalaciones que sirvan para producción, importación, exportación, refinación, transporte, distribución, almacenamiento, abastecimiento,

regasificación o comercialicen combustibles derivados del petróleo, biocombustibles líquidos, hidrógeno y combustibles a partir de hidrógeno, gases licuados combustibles y todo fluido gaseoso combustible, como gas natural, gas de red y biogás deberán inscribirlas.

No se entenderán incluidas en las actividades antes señaladas la explotación de depósitos naturales de petróleo y gas natural.

La Superintendencia de Electricidad y Combustibles será el organismo responsable de establecer y mantener el citado registro”.[4]

Lo anterior es fundamental, dado que demuestra que la explotación del combustible rico en hidrógeno es un tema que no solo es una idea a futuro, sino que también es parte activa del presente y desarrollo de combustibles alternativos.

1.1.2. Contexto: Fuentes energéticas

Entre las principales motivaciones para llevar a cabo este proyecto se encuentra el alto potencial energético que otorga la radiación solar en nuestro país, ya que la hipótesis se fundamenta en aprovechar este calor de radiación para elevar la temperatura del reactor que produce la gasificación. Esto se evidencia en el mapa de irradiación global horizontal de la figura 1.2, donde el desierto de Atacama ubicado en nuestro país Chile el lugar que más irradiación recibe en promedio, superando los 7 [kWh/m²].

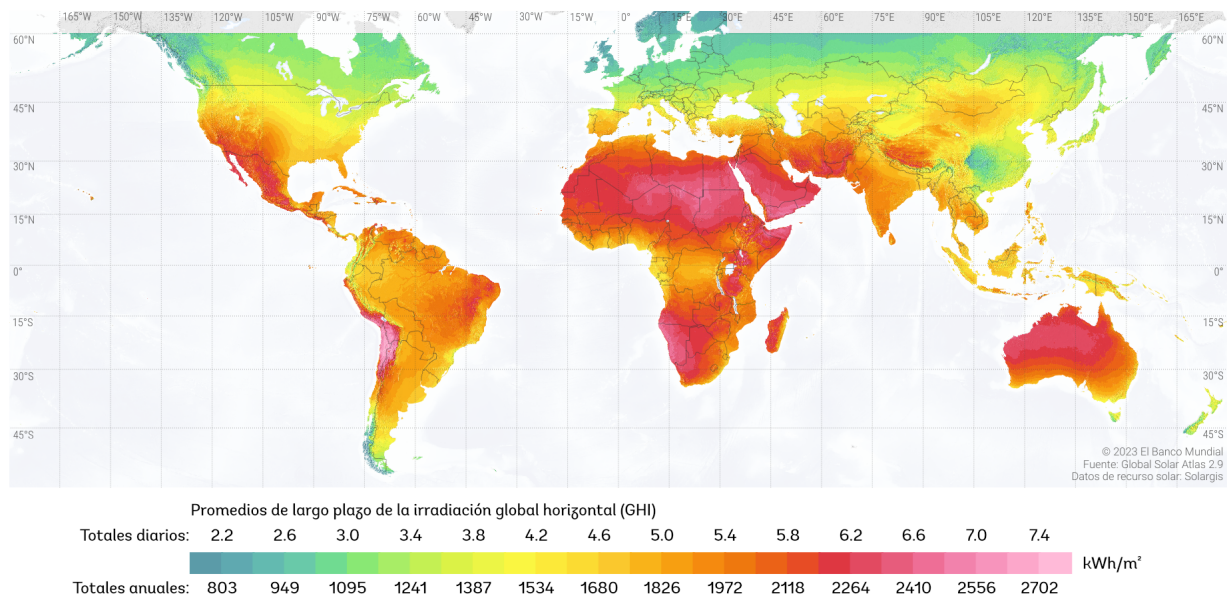


Figura 1.2: Mapa de irradiación Solar Horizontal a nivel mundial.[5]

Considerando lo anterior, se evidencia que efectivamente existe un enorme potencial energético solar, que puede ser aprovechado para aportar, en este caso, a las reacciones de gasificación. Esto resulta sumamente relevante si se considera que alrededor de 2/3 del feedstock carbonoso es gasificado, y al menos 1/3 de este se consume para elevar la temperatura dentro del reactor y así lograr las reacciones necesarias.

1.2. Hidrógeno y syngas como vector energético

Conociendo lo mencionado en el capítulo anterior surge la duda ¿a qué se refiere con el hidrógeno y derivados a partir de este como gases combustibles? el presente informe busca introducirse en esta idea. Para esto, se comienza por mencionar que en la actualidad es suma prioridad a nivel mundial la **reducción de la huella de carbono**. Para lograr lo anterior se está acudiendo a formas de **energía alternativas** a los combustibles fósiles, entre las cuales el hidrógeno y sus gases derivados destacan por su versatilidad, por su gran potencial como vector energético y la notable reducción en la huella de carbono, dado que sus reacciones químicas en muchos casos generan vapor de agua como resultado.

El hidrógeno posee una diversidad de aplicaciones, como también formas de obtención, como se aprecia en la figura 1.3

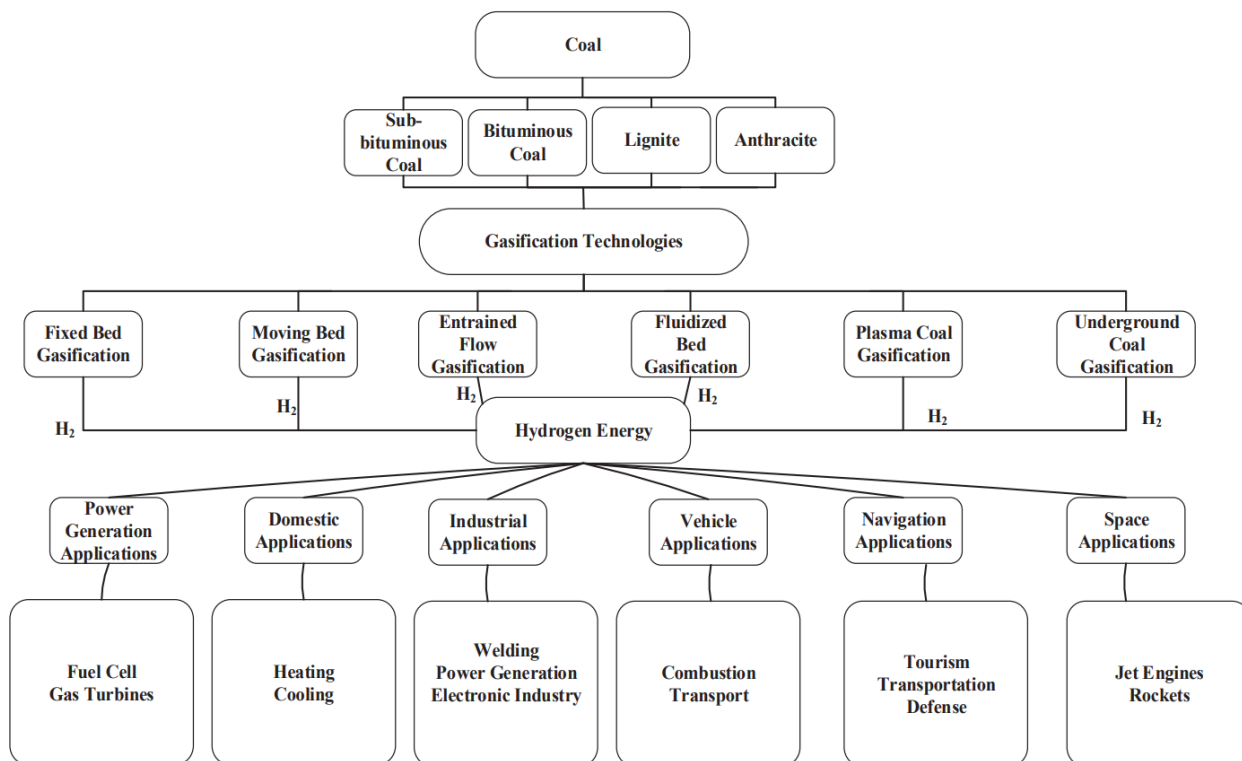


Figura 1.3: Principales aplicaciones del hidrógeno producido por gasificación [6]

Existen varias formas de producir compuestos ricos en hidrógeno a partir de fuentes primarias, siendo la gasificación del carbón o materia orgánica rica en carbono una forma de **almacenar químicamente** en forma de gas combustible la **intermitente fuente de energía solar**, pudiendo así además transportarse y utilizarse en los procesos que lo requieran. Lo anterior se traduce en la producción de un gas rico en hidrógeno llamado **”gas de síntesis”** o **”syngas”** en inglés a partir de fuentes primarias renovables tales como la **energía solar**, dado que esta fuente aporta la energía de reacción que requiere la gasificación.

1.2.1. Proyecto Fondecyt N°1241030

El desarrollo del presente trabajo se enmarca en un proyecto con fondos gubernamentales Fondecyt cuya propuesta lleva por nombre **”Renewable hydrogen production from biomass using a novel allothermal rotary porous media reactor”**. La propuesta de proyecto apunta principalmente a la obtención de un gas de síntesis rico en hidrógeno a través de pruebas experimentales en un reactor rotatorio de medio poroso de forma alotérmica, teniendo este último atributo a la energía solar como fuente de calor.

La propuesta además detalla la importancia de la producción de hidrógeno, el contexto chileno donde la **biomasa y la energía solar** cumplen un rol protagónico como fuentes de combustible y energía para la producción de hidrógeno, dada la gran disponibilidad de la biomasa chilena, teniendo 2,447,591 hectáreas, de las cuales 60 % corresponden a *Pinus radiata*, seguida por la especie *Eucalyptus globulus* (23 %) y *Eucalyptus nitens* (10 %).

Por otra parte, menciona las ventajas de la **producción alotérmica** sobre la **autotérmica** de gas de síntesis, teniendo esta última la ventaja de que no requiere de combustión de parte del combustible para generar calor dentro del reactor, dado que esto último representa tanto pérdidas de combustible que no se gasifica, como añadidos indeseables ya sean alquitranes y otros derivados de la combustión.

Posteriormente, el documento explica que las pruebas experimentales realizadas sobre el RPMR tanto autotérmico como alotérmico (el caso de este trabajo), considerarán la **variación de los principales parámetros operacionales** para determinar así la mejor configuración (relación de equivalencia, suministro de vapor, velocidad de filtración, relación de combustible sólido a partículas inertes, potencia solar, entre otros). Lo anterior va de la mano con un trabajo numérico, el cual estudia la termoquímica del RPMR previamente, de forma que las pruebas experimentales no resulten demasiado extensas. Se puede visualizar en la figura 1.4 la representación teórica de lo que sucede dentro del RPMR.

El proyecto del gasificador rotatorio de medio poroso con aporte solar ha venido siendo el resultado de la unión de los esfuerzos de distintos memoristas, entre ellas la tesis doctoral de Nicolás Ripoll [7], que a lo largo del tiempo han aportado sus conocimientos

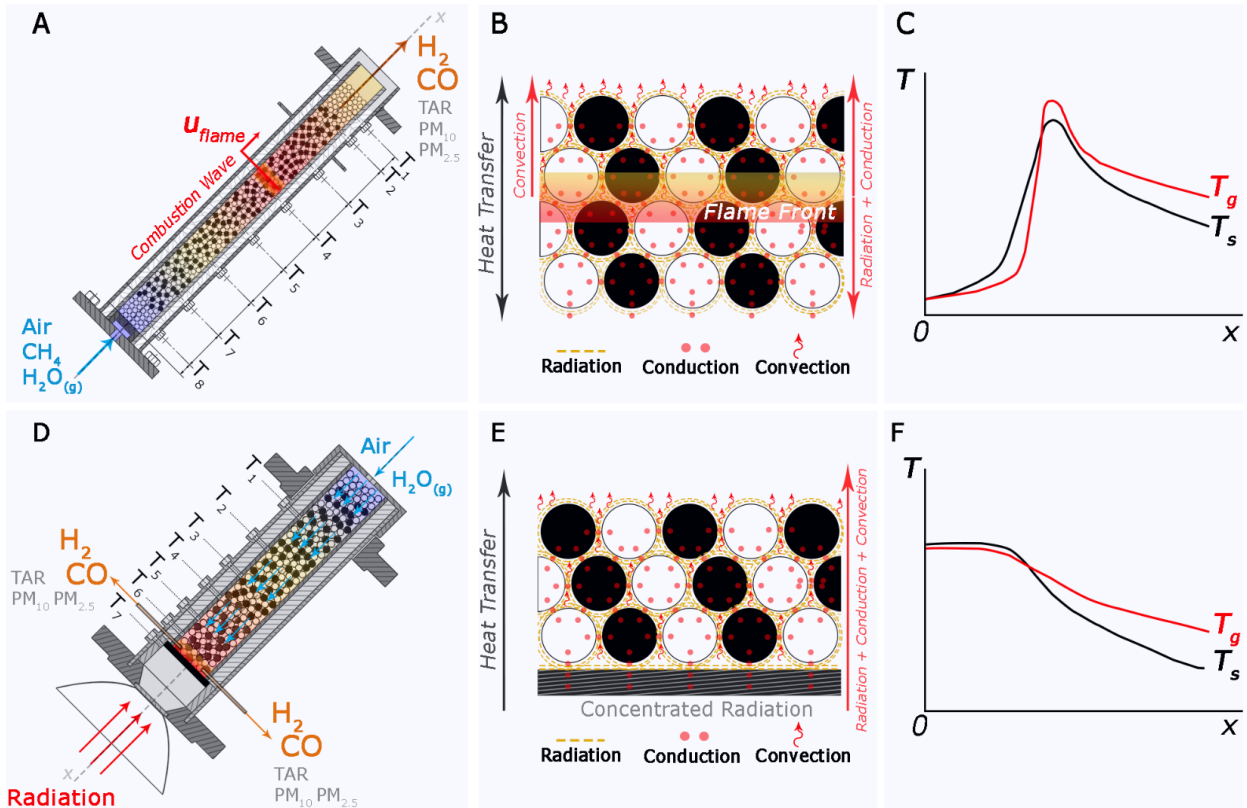


Figura 1.4: Esquema básico del RPFR auto-térmico (A). Mecanismo de transferencia de calor en la zona de reacción (B). Perfil de temperatura típico dentro del reactor de la fase sólida (T_s) y gaseosa (T_g) (C). Esquema básico del RPFR alotérmico (D). Mecanismo de transferencia de calor entre la placa emisora y la zona de reacción (E). Perfil de temperatura típico dentro del reactor de la fase sólida (T_s) y gaseosa (T_g) (F).

a la causa, desde lo cual se originan tanto el diseño experimental como la metodología de trabajo, y parte de ellos participan actualmente en el Fondecyt. Es fundamental destacar que el trabajo realizado en esta instancia busca acudir a la experiencia de trabajos previos, **recopilar las recomendaciones dadas de mejora en cuanto a los equipos utilizados, evaluarlas y aplicar las que se consideren prioritarias.** De esta forma, se realiza un trabajo de retroalimentación que permite dar un salto de calidad en cuanto a la producción de gas de síntesis.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Captación de energía solar

Para la captación de energía solar, se considera un campo de heliostato, cuya configuración es similar a la mostrada en la figura 1.5.

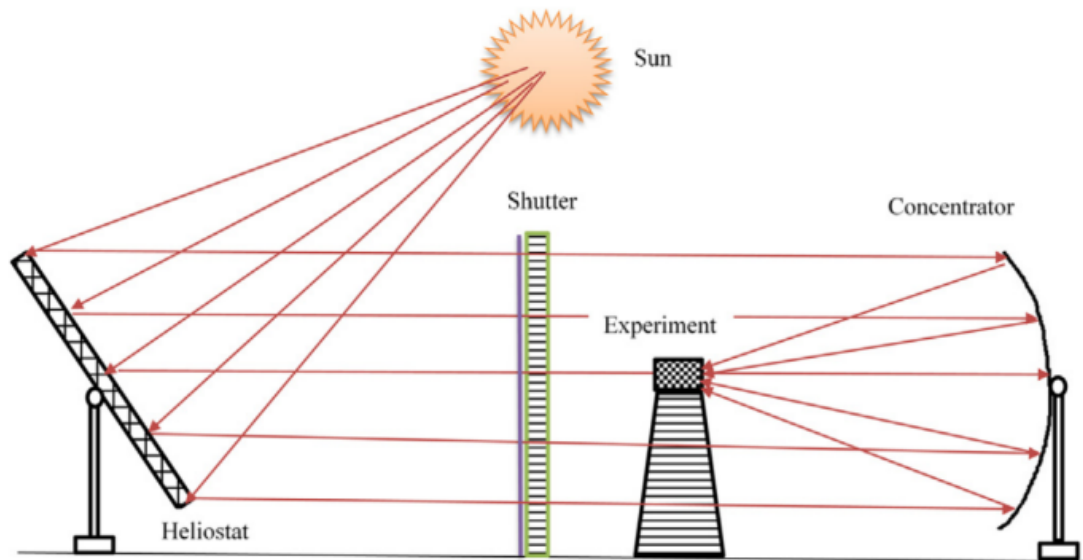


Figura 1.5: Campo solar térmico

para lograr lo anterior, se dispone de los siguientes elementos:

- **Helióstato:** Equipo cuya función es reflejar la radiación solar hacia un punto. Para ello dispone de movimiento para coordinar según el azimut y la elevación.
- **Concentrador:** consiste en un elemento curvo que refleja la radiación que le llega del helióstato hacia un foco ubicado en una de las caras del reactor.

Dado que la instalación está en el laboratorio de energías renovables, se considera la radiación presente en el sitio, que es la descrita en la figura 1.6 según fecha del año.

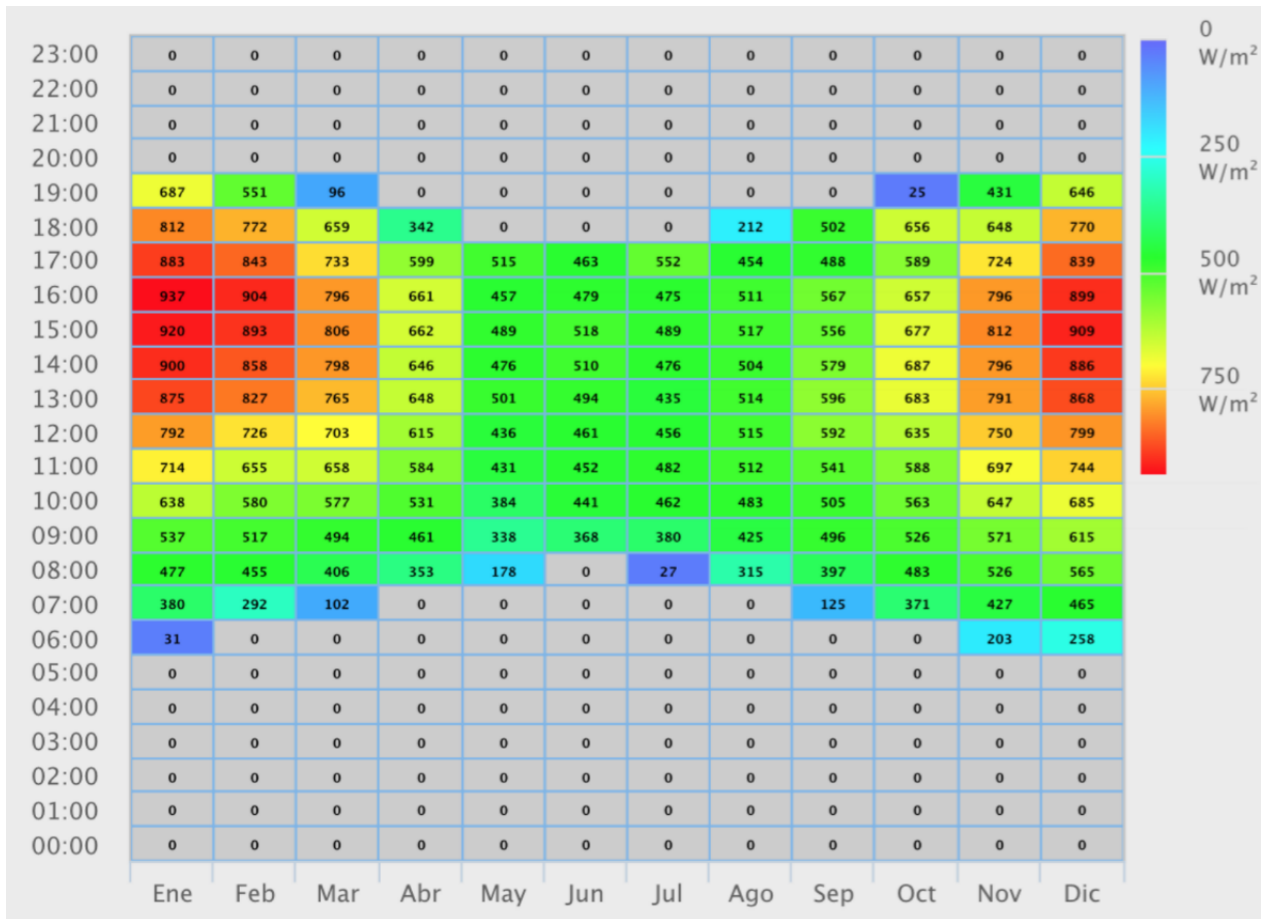
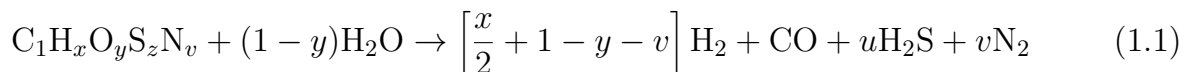


Figura 1.6: Radiación en laboratorio de energías renovables según explorador solar [8]

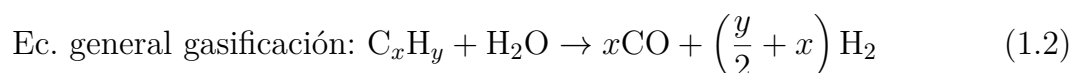
1.3.2. Reformado por vapor

El reformado por vapor, en breves términos es un proceso donde reacciona vapor a alta temperatura y presión con hidrocarburos, lo cual resulta en producción de gas de síntesis. El gas de síntesis, conocido como syngas, es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO), con bajo contenido de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Este gas se obtiene de la gasificación de compuestos ricos en carbono como el carbón, biomasa, gas natural, entre otros.

La reacción general es:



Por otra parte, la ecuación 1.2 ocurre gracias a la presencia de vapor de agua, y al ser endotérmica utiliza el calor remanente para generar monóxido de carbono e hidrógeno, que es lo que se busca con la **gasificación**:



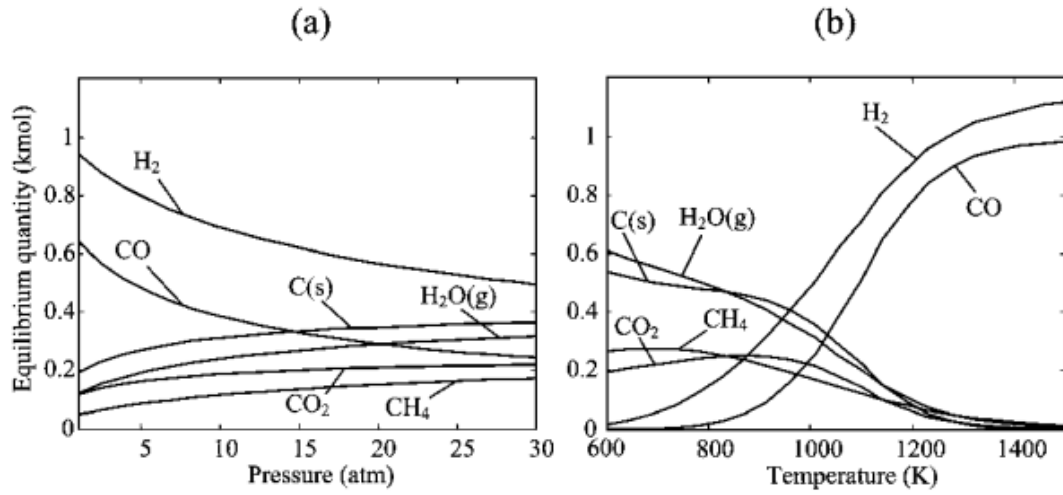
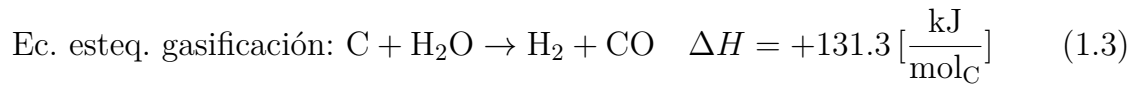


Figura 1.7: Equilibrio de la composición del sistema estequiométrico de la ecuación 1.1 : (a) como función de la presión a 1000 K, y (b) como función de la temperatura a 10 bar. Se han omitido las especies con fracciones molares menores a 10^{-3} . (Carbón: $\text{C}_1\text{H}_{0.47}\text{O}_{0.055}\text{S}_{0.022}\text{N}_{0.004}$) [9]

Según se puede conocer en [9], bajo temperaturas de **700 K**, las especies $\text{C}_{(\text{gr})}$, CH_4 , CO_2 , H_2O son termodinámicamente estables. Por otro lado, las reacciones del proceso ocurren entre los **800 y 1100 K**. La gasificación se completa alrededor de los **1200 K**. En general, se describe el comportamiento en base a presión, temperatura y especies según los gráficos de la figura 1.7

Son parte del proceso de gasificación otras reacciones como la pirólisis, y en detalle la oxidación parcial, que es intrínseca del proceso:

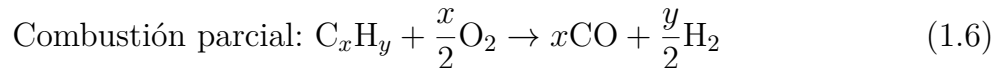
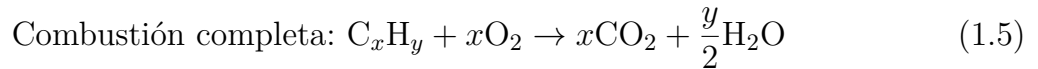
1.3.2.1. Pirólisis

La pirólisis, que normalmente ocurre en un rango de temperatura entre 450 y 900 K, consiste en la descomposición térmica de enlaces dentro de las cadenas de materiales carbonosos y con ello la liberación de compuestos gaseosos ricos en hidrógeno (como CH_4 , C_2H_6 , etc.) y compuestos condensables (como alquitranes). Simultáneamente, la fracción de carbono fijo del material original se transforma en un residuo sólido, prácticamente puro en su composición de carbono. La reacción es del tipo endotérmica, por lo que requiere de calor para ocurrir.



1.3.2.2. Oxidación parcial (POX) de hidrocarburos

La oxidación parcial consiste en una combustión incompleta donde se quema una parte del combustible en presencia de una cantidad de oxígeno inferior a la de combustión estequiométrica[10]. Dentro del diseño y aplicación de un reactor rotatorio esta es un paso previo al proceso de gasificación, donde se quema una pequeña cantidad del combustible con el fin de generar calor y elevar la temperatura dentro del reactor. Esto se ve reflejado en las primeras dos ecuaciones, las cuales son exotérmicas:



1.3.2.3. Materia prima gasificación

Se puede realizar una clasificación según el tipo de lecho, dependiendo del combustible a gasificar. Estas configuraciones son principalmente:(1) lecho fijo, (2) lecho fluidizado, (3) lecho con flujo vórtice, y (4) sales fundidas.

En los trabajos presentes en el estado del arte se ve principalmente el uso de **lecho fijo**, dado que es carbón lo que se gasifica y no un combustible en estado líquido o gaseoso. Si bien, también se ha visto que se agregan esferas de alúminas, y el hecho de **rotar el reactor** permite aumentar turbulencias dentro de este, aumentando la distribución y almacenamiento de calor dentro del reactor, en pos de alcanzar una mayor homogeneidad de temperaturas dentro del reactor. Sumado a lo anterior, se utiliza un **medio poroso**, que permite la circulación de la energía dentro del reactor, pero es capaz de retenerla dentro de él más tiempo dado el tipo de material y su alta **inercia térmica**.

Por lo anteriormente explicado, el tipo de lecho utilizado depende directamente del combustible. Considerando el tipo de combustible, existen variedad de "feedstocks", entre los cuales se encuentran [11]:

1. **Carbón (coal):** Por definición, es una roca sedimentaria orgánica combustible compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno, además de otros elementos menores como azufre. La ventaja es que su uso es más que habitual, y existe más información al respecto, pudiendo obtener mejores resultados. Corresponde a la generación de hidrógeno 'gris'.

Tabla 1.1: Tabla de características de diferentes tipos de carbón.

Clase	Grupo	Poder Calorífico [Kcal/kg]	Caract. Aglutinantes
I. ANTRACITA	-	-	No aglutinantes
II. CARBONES BITUMINOSOS	1. Bajo volátiles	-	-
	2. Medio volát.	≥ 7.780	Comúnmente aglutinantes
	3. Alto volát. A	7.230 a 7.780	-
	4. Alto volát. B	6.400 a 7.230	-
	5. Alto volát.	5.840 a 6.400	Aglutinantes
III. CARBONES SUB-BITUMINOSOS	1. Sub-bitum. A	5.840 a 6.400	-
	2. Sub-bitum. B	5.280 a 5.840	-
	3. Sub-bitum. C	4,500 a 5.280	No aglutinantes
IV. LIGNITOS	1. Lignito A	3.500 a 4.600	-
	2. Lignito B	< 3.500	-

2. **Biomasa:** es en principio una fuente de energía renovable, dado que el carbón fijado por la materia orgánica en su vida es liberado en los procesos de gasificación. Las principales fuentes de biomasa son (1) madera, incluida la corteza, troncos, aserrín, astillas de madera, pellets de madera y briquetas; (2) cultivos energéticos de alto rendimiento, como el trigo, cultivado específicamente para aplicaciones energéticas; (3) cultivos agrícolas y residuos (por ejemplo, paja); y (4) residuos industriales, como pulpa de madera o pulpa de papel.

Resulta importante tener en cuenta las ventajas y desventajas de este combustible:

- **Ventajas:** (1) fuente de combustible teóricamente inagotable; (2) impacto ambiental mínimo cuando la combustión directa de la masa vegetal no se utiliza para generar energía (es decir, fermentación, en su lugar se utilizan pirólisis, etc.); (3) los alcoholes y otros combustibles producidos a partir de biomasa son eficientes, viables y de combustión relativamente limpia; y (4) disponible a nivel mundial.
- **Desventajas:** (1) podría contribuir en gran medida al cambio climático global y a las partículas contaminación si se quema directamente; (2) sigue siendo una fuente de energía costosa, tanto en términos de producción de biomasa y la conversión tecnológica a alcoholes u otros combustibles; y (3) vida Las evaluaciones del ciclo deben tenerse en cuenta para abordar las entradas y salidas de energía, pero Lo más probable es que haya una pérdida neta de energía cuando se opera a pequeña escala (ya que la energía debe poner para hacer crecer la masa vegetal).

3. **Residuos del petróleo:** este combustible se ve más útil desde la perspectiva de mejorar la eficiencia y disminuir la cantidad de residuos de la refinería del petróleo.

4. **Black liquor:** es un líquido resultado de la producción de pulpa de celulosa. La gasificación del licor negro tiene el potencial de lograr una mayor eficiencia energética general, en comparación con las calderas de recuperación convencionales, al tiempo que genera un gas de síntesis rico en energía.

Considerando lo anterior, resulta evidente que pruebas de desarrollo de la gasificación primeramente se realicen con carbón, dado que se conoce mejor y resulta más económica a pequeña escala que la de biomasa.

1.3.3. Datos y toma de muestras

Según lo que se vio en el estado del arte, es fundamental conocer las **temperaturas** a las cuales se desarrollan los procesos dentro del reactor, ya que de estas dependerán las reacciones que en este ocurren. De esta forma se puede medir el comportamiento del reactor. Existen distintos tipos de termocuplas:

Tabla 1.2: Resumen de Tipos de Termopares [12]

Tipo	Aleación	Rango de Temperatura
K	Chromel®/Alumel®	(0 to 1260) °C [(32 to 2300) °F]
J	Iron/Constantan	(0 to 760) °C [(32 to 1400) °F]
T	Copper/Constantan	(-200 to 370) °C [(-328 to 700) °F]
E	Chromel®/Constantan	(0 to 870) °C [(32 to 1600) °F]
N	Nicrosil®/Nisil®	(0 to 1260) °C [(32 to 2300) °F]
S	Platinum/Platinum (10% Rhodium)	(538 to 1481) °C [(1000 to 2700) °F]
R	Platinum/Platinum (13% Rhodium)	(538 to 1481) °C [(1000 to 2700) °F]
B	Platinum (6% Rhodium)/Platinum (30% Rhodium)	(871 to 1704) °C [(1600 to 3100) °F]

Según la web investigada [12], los termopares tipo S y tipo R son muy similares. Ambos se recomiendan para aplicaciones de alta temperatura y deben protegerse con un **tubo de protección** no metálico e aislantes cerámicos. El uso continuo a altas temperaturas provoca el crecimiento del grano, lo que puede llevar a fallos mecánicos.

Además de las temperaturas de operación en el reactor, es relevante conocer la **composición del gas de síntesis**, para lo cual se requiere tanto de un sistema para extraer los gases, como para analizarlos.

1.3.3.1. Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica en la cual se inyecta una muestra de un gas en el equipo, el cual por la acción de un gas eluyente se transporta por una columna cromatográfica y posteriormente un detector, cuya señal es amplificada y procesada, para finalmente dar como resultado una gráfica que describe la composición del gas en función de abundancia del mismo y tiempo en el proceso. Se puede apreciar el proceso según la figura 1.8 .

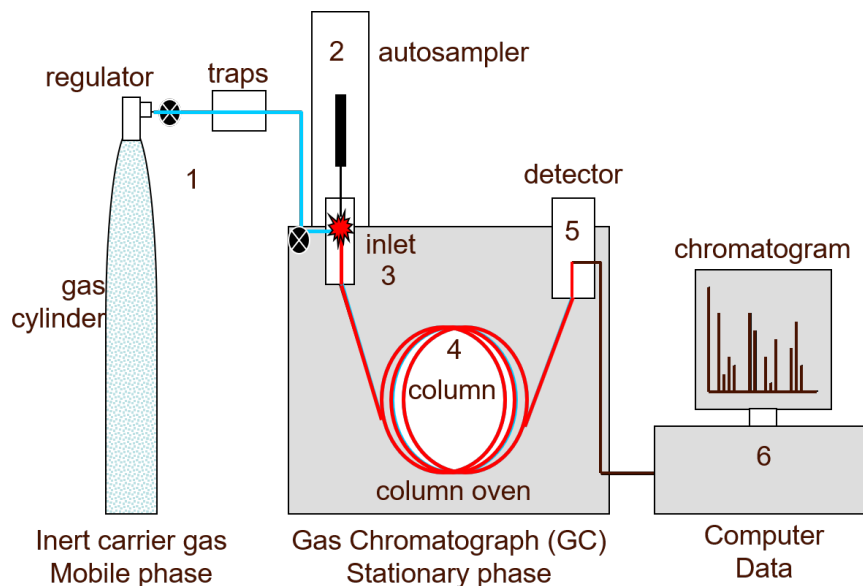


Figura 1.8: Esquema básico de un cromatógrafo de gases donde: (1) gas de arrastre, (2) inyector de muestra, (3) entrada, (4) columna analítica, (5) detector y (6) Computadora. [13]

La gráfica entregada por el equipo se puede observar en las gráficas juntas en el anexo, y se tiene como referencia para el lector la figura 1.9.

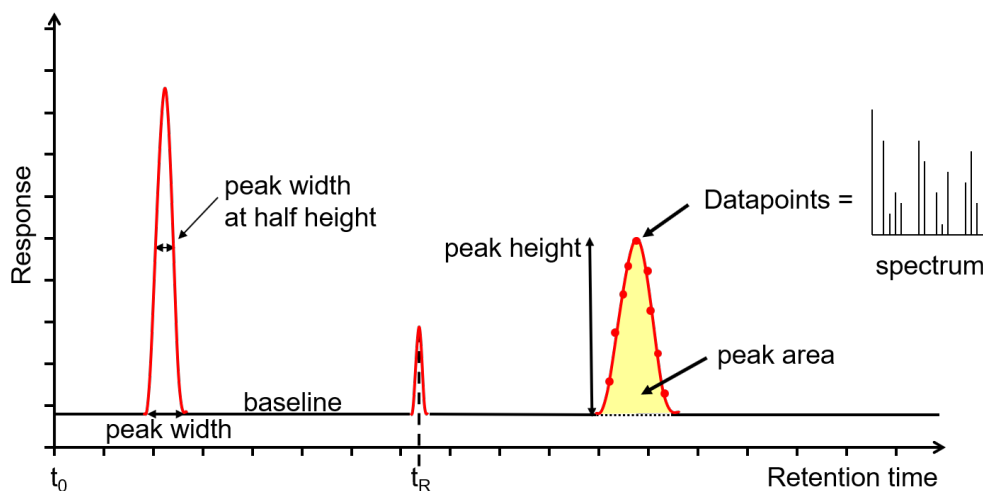


Figura 1.9: Salida del cromatógrafo. [13]

Cabe destacar que este equipo está a disposición de estudiantes para los trabajos prácticos, seminarios y trabajos de título, aunque para el caso de este trabajo ha sido operado por el personal de apoyo académico del departamento de química de casa central, Gisela Bruhn.

1.3.3.2. Analizador de gases

Existe una alternativa a cromatografía de gases. El analizador de gases Testo es un dispositivo portátil que permite analizar la composición química del gas en especies como CO , CO_2 , NO_x , SO_2 y O_2 .



Figura 1.10: Analizador de gases Testo 350 [?]

En la figura 1.10 se aprecia el analizador de gases testo con la pistola que permite tomar la muestra de gas en tiempo real.

1.4. Estado del arte

1.4.1. Contenido de hidrógeno en gas de síntesis

El contenido de hidrógeno del gas de síntesis es sin dudas un parámetro fundamental a la hora de evaluar el valor del mismo. Como tal, resulta fundamental tener referencias claras de los valores obtenidos por trabajos previos, tales como los que se ven en la tabla 1.3, donde se aprecia el porcentaje en volumen de hidrógeno obtenido por trabajos previos.

Una consideración a tener es que el analizador de gases puede presentar datos en partes por millón (ppm), lo cual se puede transformar a porcentaje en volumen dividiendo por 10.000.

Tabla 1.3: Parámetros de control y resultados del HFC.

Ref.	Combustible sólido	Partículas inertes	Oxidante gaseoso	Tmax, K	v, cm/s	u, cm/s	[H2]max, % vol.	[CO]max, % vol.
Toledo et al. [14]	Pellets de madera	Esféras de alúmina	Butano/aire	1220-1480	0.012	13-14.4	17.5	61.4
Salgansky et al. [15]	Polvo de carbón/Turba	Anillos de porcelana/Esféras de alúmina	Aire/vapor	1100-1500	0.5	10-100	25	25
Glazov et al. [16]	Carbón	Esféras de alúmina	Aire/vapor	900-2300	-	20-100	25	37
Dobrego et al. [17]	Esquisto bituminoso	-	Aire	1000-1200	-	0.15	-	2
Kislov et al. [18]	Carbón	Ladrillos refractarios	Aire/CO2	1200-1400	0.5	10-100	0	33

1.4.2. Tipos de lecho

Se tiene en cuenta el trabajo realizado por Puig-Arnavat en el año 2013 [19]. En ese trabajo se compara diferentes formas de gasificación solar. Estas se definen según radiación directa o indirecta, diseño del reactor, agente gasificante, fuente de combustible, cantidad de radiación incidente y eficiencia en la conversión de energía. Se tomaron en cuenta los casos que más similitudes presentan con lo que está en desarrollo en el laboratorio de energías renovables, como se aprecia en la tabla resumen ??.

Según los valores de rendimiento de conversión de energía obtenidos de la tabla resultado, el caso con mayor eficiencia en la conversión de energía es el de irradiación directa, con un diseño del reactor de lecho empacado, agente gasificante vapor, y una radiación incidente de entre 4 y 23 [kW], siendo esta de entre 19 y 48%. En el documento se explica en detalle como se obtuvieron esos valores de rendimiento, para los cuales se toma en cuenta el gas de síntesis obtenido, el calor aportado y se hace una relación que da como resultado el rendimiento de la conversión energética.

Es relevante mencionar que para este trabajo se utilizaron al menos tres tipos de lecho, los cuales son:

- **Lecho empacado:** consiste en un lecho se que encuentra lleno de partículas sólidas. Por la forma que tiene su ventaja es la gran área de superficie de contacto entre especies, además de una caída de presión baja.
- **Lecho fluidizado:** El fluidizado consiste en que un fluido pasa a través de partículas sólidas, suspendiéndolas. Es crucial considerar una velocidad de fluidizado óptima para no tener caídas de presión que puedan representar pérdidas en la homogeneidad de la distribución de calor. Tiene como ventaja una excelente transferencia de calor y masa, contacto uniforme entre fases además de un mejor
- **Lecho de vórtice:**Partículas sólidas en movimiento constante por un flujo de gas o líquido que crea un vórtice. Su gran ventaja es que mejora la mezcla y el contacto entre fases, aumenta la eficiencia de los procesos.

1.4.2.1. Gasificación solar: Lecho empacado

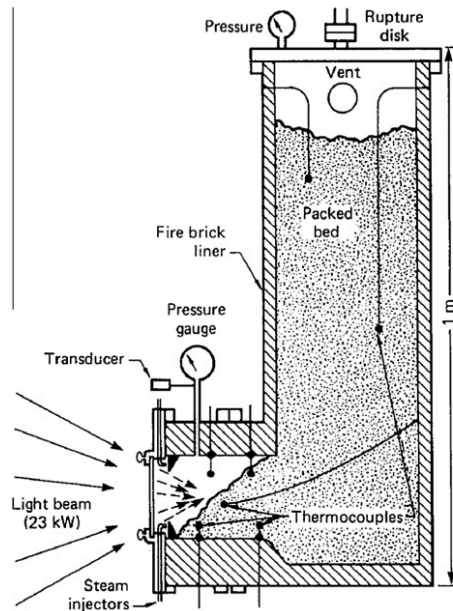


Figura 1.11: Vista en sección del reactor de lecho empacado en forma de L, irradiado directamente.

Uno de los primeros trabajos en la gasificación con aporte solar fue el de Gregg[20]. Este trabajo considera un lecho empacado en forma de L como se aprecia en la figura 1.11, cuya configuración permitió obtener los siguientes resultados:

Es relevante mencionar respecto del agente gasificante que:

- Con CO_2 como agente gasificante, la tasa de producción de gas aumentó al aumentar la potencia irradiada.
- Al emplear vapor para la gasificación, la composición del gas y el valor calorífico fueron prácticamente independientes de la potencia solar.
- Considerando todos los experimentos de gasificación de carbón con vapor, se observó una considerable variación en las eficiencias de conversión de energía, oscilando entre un 19 % y un 48 % para distintas potencias solares.
- En cuanto a la gasificación de carbón activado con vapor, se logró una eficiencia de conversión de energía máxima del 34 % con una potencia solar de 17 kw.
- La gasificación de coque con vapor presentó una composición del gas de producto idéntica a la del carbón activado, pero con una eficiencia de conversión solar menor (máximo de 23 % a 19.5 kW).

1.4.2.2. Gasificación solar: Lecho fluidizado

El lecho consistía en material granular carbonáceo (carbón de coco) fluidizado por el flujo ascendente de gas CO_2 que es ingresado por la parte inferior como se evidencia en la figura 1.12.

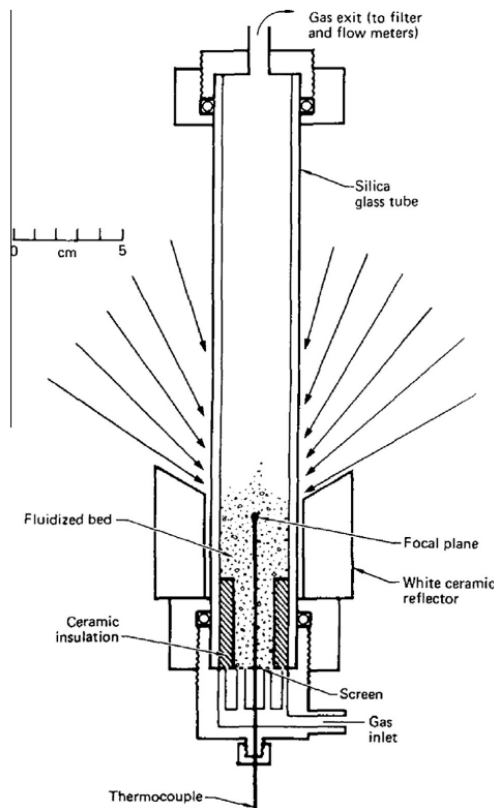


Figura 1.12: Representación esquemática del reactor solar de lecho fluidizado irradiado directamente.[21]

Para fluidizar el gas se consideró en el trabajo de [21] una velocidad entre los 2 a 15 m/min dependiendo de la temperatura y el tamaño de las partículas del combustible.

Se concluye que la **eficiencia de conversión de energía** fue del **40 %** en el caso del reactor de lecho empacado y del **10 %** para el reactor de lecho fluidizado. Se atribuye el bajo rendimiento del lecho fluidizado a las altas pérdidas de calor; pérdidas de calor por radiación desde la superficie superior del lecho (10 % de la energía solar), pérdidas de calor por conducción a través del reflector cerámico blanco y el sistema de entrada de gas metálico, y el calor sensible transportado por el gas al salir del gasificador. Es importante destacar que las pérdidas de carga, es decir pérdidas de presión dentro del reactor, también pueden afectar la distribución de temperaturas en el lecho fluidizado. Para mantener esta presión de forma homogénea es fundamental la óptima velocidad de fluidización, ya que de esta dependerá la distribución de las partículas sólidas y el mezclado de estas. Esto evidentemente afecta a los materiales sólidos combustibles, dado que el mejorar estos parámetros permite que el contacto entre sólidos sea el requerido para una correcta formación de productos.

1.4.2.3. Gasificación solar: con vortex-flow

El reactor de flujo con vórtice se utiliza debido a que permite ayudar a homogeneizar la distribución del calor dentro del reactor, y se puede evidenciar su configuración en la

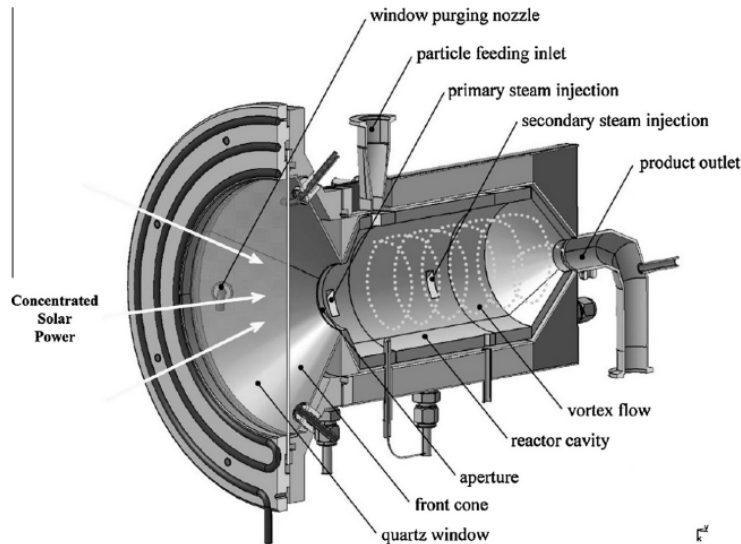


Figura 1.13: Esquema del reactor de flujo en vórtice solar irradiado directamente.[22]

figura 1.13. Esta configuración funciona con una entrada de flujo en forma de vórtice, a diferencia de el RPMR, en el cual se genera homogeneidad girando el reactor a cierta RPM.

Teniendo como feedstock 'petcoke dry powder' cuyo contenido de hidrocarburos es del 90-97% carbón, 1.5-8% hidrógeno, y otros elementos como nitrógeno, sulfuros y cloro, los principales resultados son:

- El grado máximo de conversión de carbono obtenido fue del 87% a 1500 K, con una relación molar agua-coque de petróleo de 4.8 y un tiempo de residencia de 2.4 segundos.
- En este caso, para entradas solares entre 3.3 y 5.1 kW, la eficiencia de conversión de energía osciló entre el 0.5% y el 4.7%.

1.4.3. Revisión de literatura

1. **State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock.** [19] En este trabajo se estudia la eficiencia en la conversión energética de diferentes combustibles, variando el tipo de lecho y el agente gasificante.
2. **Biomass pretreatment for steam gasification toward H₂-rich syngas production: An overview** [23] Este documento se centra en los pretratamientos para la biomasa, los cuales mejoran la eficiencia en la conversión energética de la gasificación solar. Se identifican diversos pretratamientos que mejoran las propiedades de la biomasa, generando un combustible de mejor calidad. Los pretratamientos incluyen:
 - **Mecánico:** La peletización de la biomasa mejora la densidad a granel del combustible y reduce el porcentaje de humedad.

- **Biológico:** La digestión anaeróbica mejora los componentes y la estructura de la biomasa.
- **Químico:** El tratamiento para eliminar alcalinos reduce los problemas con la ceniza al eliminar alquitranes.
- **Otro:** La premezcla con otros combustibles.

3. **Hydrogen and syngas production by hybrid filtration combustion: Progress and challenges [24]** Este documento analiza la producción de gas de síntesis desde diversas fuentes vía reformado por vapor. Se discute la combustión híbrida filtrada (HFC) abarcando el desarrollo numérico, de reactores, aplicaciones industriales, y otros aspectos. Se mencionan las complejidades cinéticas del proceso, las altas temperaturas requeridas, y la recirculación de calor dentro del reactor. También se destacan los parámetros operacionales clave como el agente gasificante y la composición del lecho. Además, explora el uso de diferentes combustibles sólidos como carbón, biomasa y polietileno. La gasificación se estima como una forma eficiente y sostenible para la producción de H₂, demostrada a nivel industrial con el uso de residuos urbanos.
4. **Solar termal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production- A review [25]** En este documento se presenta el reformado de combustibles ricos en metano usando gas natural y el beneficio que produce el añadir energía solar al proceso, dado que usando esa combinación se logra un proceso más eficiente y por ende con más futuro en cuanto a la transición energética. Se presenta tanto prototipos de reactor a pequeña escala alimentados por radiación solar simulada como a gran escala con alimentación de cientos de kilowatts.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

En el marco del proyecto FONDECYT N°1241030 denominado “Renewable hydrogen production from biomass using a novel allothermal rotary porous media reactor”, el presente trabajo de título tiene como objetivo general rediseñar un reactor rotatorio de medio poroso híbrido, expuesto indirectamente a energía solar concentrada, para su operación con biomasa.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Definir el estado de arte de procesos termoquímicos solares, con especial énfasis en la gasificación solar de biomasa.
2. Rediseñar un reactor rotatorio indirectamente irradiado, en base a los resultados previos de su operación con carbón.
3. Implementar mejoras para asegurar condiciones óptimas de gasificación (concentrador solar, disco metálico, entre otras).
4. Desarrollar experimentos en el reactor rediseñado midiendo temperaturas y gases producto de gasificación de biomasa, analizando los resultados obtenidos.
5. Proponer mejoras para futuras investigaciones en el marco del proyecto FONDECYT.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2.1. Disposición general de la instalación

La instalación del banco de pruebas solar se encuentra ubicada en un módulo ubicado en el Laboratorio de energías renovables (LER) de la Universidad Técnica Federico Santa María, sede José Miguel Carrera.

En el sitio descrito se emplazó una plataforma de tablas, planchas y perfiles de acero, las cuales tienen sobre sí tanto el heliostato, el reactor solar y el colector parabólico, quedando estos elementos al aire libre, protegidos por el uso de lonas impermeables cuando no están en uso.

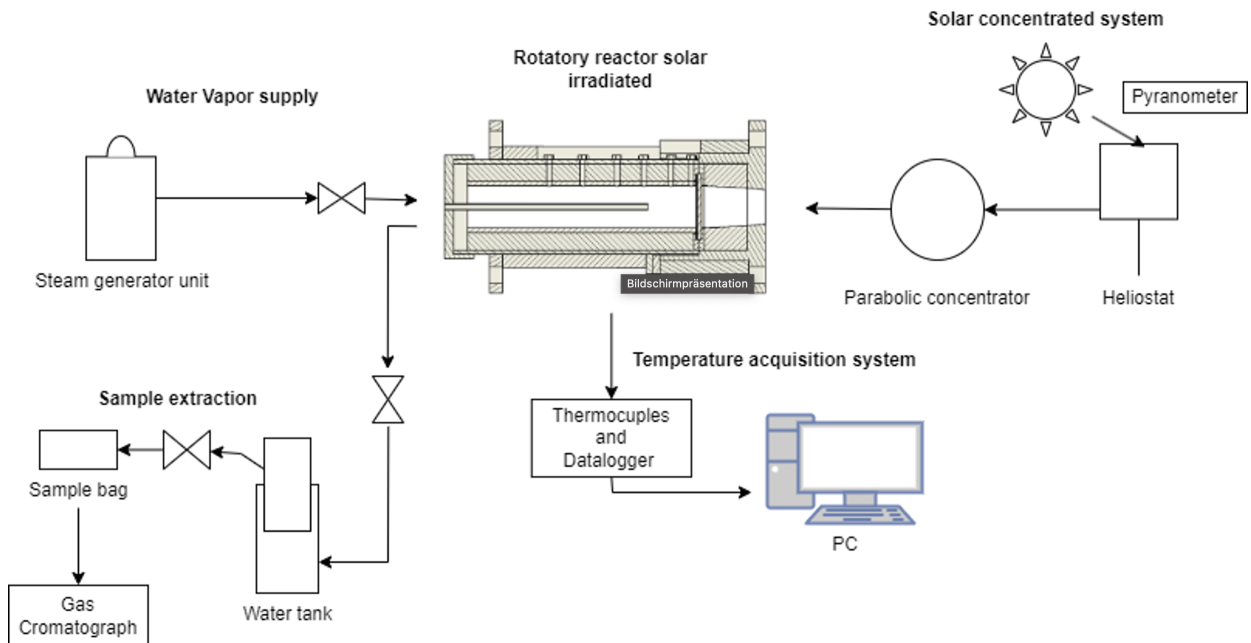


Figura 2.1: P&ID experimento gasificación solar de carbón y vapor de agua [26]

En la figura 2.1 se puede observar el diagrama P&ID del banco de pruebas solar,

donde los elementos principales incluyen el reactor, la caldera con el tanque de alimentación y el sistema de extracción de gases. En él se pueden observar las válvulas que permiten desviar el flujo o garantizar la estanqueidad del sistema. Es de destacar que en documento citado [26] se realiza una descripción de la evolución del banco de pruebas solar.

2.2. Equipos principales

El diseño del banco de pruebas se puede resumir a 5 equipos principales trabajando en conjunto, de los cuales se hará una descripción en este apartado.

2.2.1. Helióstato

En el contexto del proyecto consiste en un espejo plano 95 % de reflectividad que tiene 2060 [mm] de largo, 1600 [mm] de ancho y un espesor de 4 [mm][27]. Se aprecia en la figura 2.2.



Figura 2.2: Helióstato solar del proyecto (Fuente: propia).

2.2.2. Concentrador solar

Espejo parabólico que concentra la radiación solar en un foco. Para este nuevo trabajo se ha reemplazado el concentrador previamente usado por uno nuevo, que es el que se aprecia en la figura 2.3.



Figura 2.3: Concentrador montado visto frontalmente por su parte reflectante.

2.2.3. Reactor rotatorio de medios porosos

El reactor consta de un tambor rotatorio que contiene un medio poroso y un sistema de alimentación de combustible, aire y vapor de agua. Este reactor es de tipo batch, es decir se introduce material reactivo dentro a través de la tapa roscada, se cierra y se descarga una vez las reacciones se hayan producido. Está cubierto por capas de aislamiento de lana de 13 [mm], destinadas a reducir la pérdida de calor.

Se tiene en cuenta los parámetros operativos en la tabla 2.1

Tabla 2.1: Parámetros operativos del reactor [28]

Parámetro	Unidad
Volumen de reacción	1.062 L
Presión de operación	0 - 3 Bar
Ángulo de inclinación	0 - 60°
Velocidad de rotación	5 - 60 RPM

2.2.3.1. Material del medio poroso

El medio poroso utilizado en este caso consiste en esferas de alúmina (Al_2O_3) de 6 [mm] de diámetro, formando una matriz inerte con una porosidad del 40 %, medida mediante el método de volumen desplazado.[29] Permiten que el calor remanente de las reacciones iniciales permanezca más tiempo en el interior del reactor.



Figura 2.4: Medio poroso utilizado en el reactor (blanco, imagen referencial)

En la figura 2.4 se aprecia el medio poroso utilizado dentro del mini reactor utilizado para pruebas en Casa Central, el cual posee iguales características que el utilizado por el reactor rotatorio de medios porosos del laboratorio de energías renovables.

2.2.3.2. Aislación del reactor

El reactor posee aislación térmica tanto en la parte exterior de su estructura, como en la parte interior, justo antes del cilindro donde se producen las reacciones. Esta configuración de la aislación se debe esencialmente a que el cuerpo del reactor es una tubería con brida reutilizada, como se aprecia en las figuras 2.5 y 2.6.



Figura 2.5: Aislación externa del reactor (fuente: propia)



Figura 2.6: Aislación interior del reactor (fuente: propia)

La aislación está presente tanto en la parte exterior del reactor como en la parte interior, dado que en el interior se ubica el cilindro de reacciones.

2.2.4. Suministro de vapor

En este caso el agente gasificante es el vapor. Para el suministro de vapor se utiliza un dispositivo electromecánico que cumple el rol de caldera, siendo fácilmente regulable. Este dispositivo permite obtener el flujo de vapor adecuado para la gasificación. Se puede visualizar referencialmente en la figura 2.7 mientras se usó para pruebas en un mini reactor. Por otra parte, sus parámetros operacionales son los que indica la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros caldera Precision Steam Generator E-1500 [28]

Parámetro	Unidad
Steam flow Control range	0 - 25 g/min
Steam temperature Control range	40 - 400 °C
Steam pressure	1 - 6 Bar



Figura 2.7: Caldera electromecánica (fuente: Elaboración propia)

2.2.5. Sistema de extracción, muestreo y análisis de gases

El sistema de extracción de muestras se compone por una varilla cerámica, un sistema de extracción del gas con burbujeo y una bolsa de muestreo como la que se aprecia en la figura 2.8, la cual permite transportar la muestra de gas de síntesis para su análisis a través de un sistema cromatográfico (GC-Clarus 500, PerkinElmer, Inc). Este sistema se utiliza para la identificación y cuantificación de los compuestos presentes en el proceso.



Figura 2.8: Bolsa de muestra. Se aprecia en la figura que está hinchada por la muestra extraída del proceso.

2.3. Sistemas de medición y control

2.3.1. Sistema de adquisición de datos de temperatura

Se ubican en 3 posiciones longitudinalmente en el reactor, y los datos que entregan son registrados por una Raspberry PI.

Para la selección de estas se toma en consideración que se puede alcanzar temperaturas cercanas a los 800°C , por lo cual teniendo en cuenta la información de la tabla 1.2 según su rango de operación las termocuplas pueden ser tipo K o tipo S. Según se revisó con el apoyo académico David Carrillo, las termocuplas disponibles son de tipo K, siendo las que se ven en la figura 2.9.

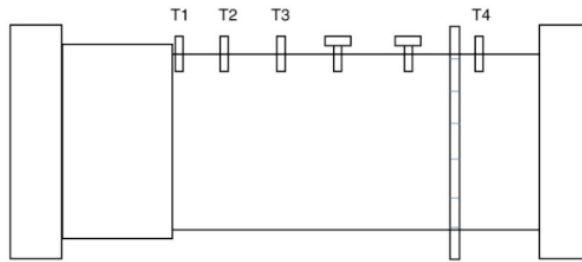


Figura 2.9: Termocuplas en el reactor

Estas termocuplas fueron testeadas por el apoyo académico, de forma que se demuestre que efectivamente están en buenas condiciones. Se adjunta en el anexo B información del equipo y método utilizado para poner a prueba las termocuplas.

2.4. Seguridad

En cuanto a la operación de los equipos, se considera el uso de elementos ópticos que desvían radiación solar. Debe tenerse cuidado de que la radiación vaya en la dirección correcta y no a otro lado, dado que puede causar lesiones tanto a la vista como quemaduras. La lista de EPP de óptica es:

- **gafas de sol:** protege de la radiación solar existente por las condiciones climáticas.
- **gafas de soldador:** específicamente para visualizar el punto focal, donde se concentra una gran cantidad de radiación.

Es importante considerar las altas temperaturas que alcanza la superficie del reactor, como también el peso de este a la hora de manipularlo. Para lo anterior, se dispone de los siguientes EPP:

- **guantes de cuero:** permiten una mejor sujeción. NO soportan altas temperaturas, por lo cual deben usarse con el reactor frío.

2.5. Procedimiento experimental

Según los trabajos realizados en el tema, la metodología de toma de muestras puede resumirse en los siguientes puntos:

- Procedimiento de operación helióstato
- Procedimiento de instalación y operación de la caldera
- Procedimiento de instalación y operación del reactor rotatorio
- Sistema de muestreo de gases
- Guía de operación del experimento (General)

A continuación se detalla cada paso los procedimientos de instalación y operación de los principales equipos:

2.5.1. Procedimiento de operación helióstato

1. **Chequeo general:** Posterior a describir el pedestal del helióstato, se debe realizar una inspección visual del mecanismo que soporta y mueve el helióstato. Para ello se debe poner atención en la posición y tensión de la cadena, la posición de los fines de carrera que delimitan el movimiento del helióstato, que no haya corrosión ni elementos extraños en el mecanismo.
2. **Encendido del sistema** La fuente de poder del helióstato, ubicada dentro de la casilla de control, se energiza desde la toma corriente ubicada en el costado de la plataforma. Una vez conectadas, chequear que el led de la placa y la fuente de poder estén encendidos.
3. **Inicio de la placa y conexión con aplicación:** Para iniciar la placa se pulsa el botón ENA, el cual enciende un led azul en la placa. Para conectar con la aplicación ('controlador remoto' para android) se accede a esta a través de un dispositivo que la tenga instalada y que cuente con bluetooth. Hecha la conexión a través de bluetooth se ingresa la fecha y hora correspondiente, luego se debe posicionar el helióstato en coordenadas AZ 0 CENIT 15 y corregir manualmente a través de los cursores hasta encontrar la posición más cómoda para instalar el espejo del helióstato,
4. **Instalación espejo:** Teniendo las tuercas, golillas y llaves necesarias en el lugar de instalación, se procede a trasladar el espejo por dos personas hasta la posición de montaje, esto debido a las grandes dimensiones del mismo. Una vez inserto, se debe fijar con los elementos de fijación mencionados al principio, con un apriete suave. Una vez instalado el espejo, se posiciona el helióstato en su posición de operación, para lo cual se tiene como referencia el marco azul donde va instalado el espejo parabólico. Cabe recordar que es fundamental cuidar a donde apunta el espejo, tanto para no afectar objetos/personas aledañas con la radiación, como para no perder la misma y por consiguiente calor en el reactor.

5. **Instalación piranómetro: (medición)** En el costado del espejo se debe instalar la placa de fijación del piranómetro, a través del cual se puede visualizar la radiación incidente en el helióstato, con el fin de registrar la misma.
6. **Fin de operación:** Para finalizar la operación, se debe desmontar la placa de fijación del piranómetro, el espejo y guardar estos en el auditorio, para finalmente cubrir el pedestal del helióstato con una lona y así evitar daños por corrosión.

2.5.2. Procedimiento de instalación y operación del reactor rotatorio

- **Chequeo general:** posterior a describir el reactor, se debe realizar una inspección visual del mecanismo de transmisión, la cadena debe estar montada en el conjunto piñón - corona y con la tensión adecuada. Se voltea cuidadosamente el conjunto para vaciar la cámara del reactor, evitando que el reactor vaya a desmontarse del soporte.
- **Suministro de potencia eléctrica:** utilizando una regleta de alimentación se conecta esta a la toma corriente disponible. A esta se conectan el motor del mecanismo de rotación, el router para la transmisión de datos y la raspberry pi en caso de funcionar sin rotación, de otra forma esta se energiza con su batería, teniendo cuidado con la polaridad de la misma para no dañar su circuito.
- **Hermeticidad del reactor:** una vez se haya cargado el reactor, se debe cerrar la cámara con la tapa del reactor. Se debe utilizar las dos tuercas soldadas lateralmente a la misma, usando los dos pernos que encajan para poder sujetarla y cerrarla fácilmente.
- **Sistema adquirente de datos:** Verificando que esté energizada la raspberry pi a través del led verde encendido en la placa, y conectado el router wifi, se procede a iniciar el software en el PC del auditorio, que despliega la interfaz de la raspberry. En la interfaz, se selecciona el software adquirente de datos de la raspberry.
- **Velocidad de rotación:** una vez energizado el motor y el panel de control, se procede a iniciar la rotación del reactor mediante el teclado numérico conectado al panel, el cual permite ajustar la velocidad a la apropiada. Se aconseja chequear manualmente el giro antes de energizar, con el fin de evitar que el mecanismo esté enganchado a algún elemento o cable que pueda trabar la rotación.

2.5.3. Procedimiento de instalación y operación de la caldera de vapor

1. **Posicionamiento:** se debe ubicar la caldera sobre la mesa de apoyo que se encuentra al costado de la estructura azul. Luego, se ubica debajo de esta el estanque de agua des-ionizada, y desde la caldera se conecta el flexible que alimenta de agua a la misma.

2. **Suministro de potencia eléctrica:** se conecta la caldera a la toma corriente, manteniéndola en posición de apagado hasta posterior instrucción.
3. **Línea de vapor:** se conectan las tuberías que suministran vapor desde la caldera hacia el reactor, fijando con llaves las mismas. La llave ubicada entremedio de la tubería es la de purgado, que permite visualizar cuando la caldera alcanza el flujo estable de vapor.
4. **Principios operativos:**
 - a) Se seleccionan la temperatura y caudal del vapor de operación, configurando la caldera en modo "stand by".
 - b) Previo a comenzar la operación se mantiene cerrada la entrada de vapor al reactor y abierta la purga del sistema, con el fin de permitir el cebado de la misma y no secar el vaporizador.
 - c) Se debe verificar que el tanque cuente con agua desionizada.
 - d) Una vez todo listo, se opera en modo "flow".
 - e) Para finalizar la operación se configura la caldera en modo "gold", para así permitir que se enfríe y luego proceder a apagarla.

2.5.4. Sistema de muestreo de gases

1. **Instalación:** primero se debe ubicar al costado de la estructura del reactor un tanque con agua, suficiente como para ubicar dentro de él la cámara de vacío.
2. **Tanque interior:** dentro del tanque de agua se debe posicionar un tanque invertido, el cual debe estar cubierto por el agua. Con la válvula del tanque invertido se retira el aire que pudiese haber dentro de él.
3. **Conexión al reactor:** insertar por la parte inferior la manguera de extracción de gases del reactor, los cuales serán filtrados por el agua mediante burbujeo en el interior del tanque.

2.5.5. Guía de operación general del experimento (general)

Existe una guía de operación general del experimento, la cual se plantea en forma de lista de chequeo (checklist), a través de la cual se proporcionan instrucciones detalladas para llevar a cabo una operación correcta y segura de los equipos del conjunto. Esta guía se encuentra adjunta en el Anexo A.

Capítulo 3

Rediseño del reactor

En este capítulo se presenta el diseño del reactor rotatorio de aporte solar disponible para las pruebas experimentales. Para aquello se dispone de planos, diagramas de flujo y explicación de los sistemas que componen la instalación, basado en lo elaborado hasta el momento.

Para este trabajo se utiliza el reactor diseñado por los trabajos previos, con el fin de realizar un trabajo de continua mejora encadenada, como puede representarse por el ciclo de la mejora continua 3.1.

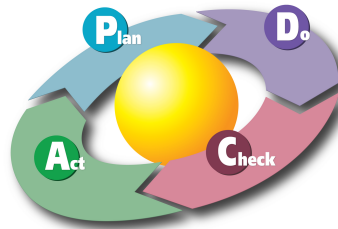


Figura 3.1: Ciclo de Deming

Se observa en la tabla 3.1 los valores obtenidos de moles de cada elemento en el gas de síntesis, teniendo un porcentaje de hidrógeno inferior a lo visto en el estado del arte por mucho. Se puede afirmar por ende que este reactor presenta resultados deficientes respecto a la cantidad de hidrógeno en el gas de síntesis generado, en comparación a lo esperado, por lo cual se debe buscar y corregir las o la causa raíz del problema.

Según los trabajos previos el parámetro crítico es la temperatura insuficiente dentro del reactor. Como se lee en el marco teórico, alcanzar una temperatura adecuada para el proceso es fundamental para la ocurrencia de la reacción de gasificación, dada la energía de activación que requiere la misma. Las temperaturas alcanzadas dentro del reactor no superaron los 300 [°C] dentro del reactor en pruebas realizadas por trabajos previos, por lo cual se espera incrementar las mismas lo más cercanas posibles a las de gasificación, que van del orden de los 800 [°].

En la gráfica de la figura 3.2 se visualiza el orden de las temperaturas alcanzadas

Tabla 3.1: Resultados de Análisis de cromatografía de gases de experimentos previos [28]

(*) Análisis	Resultados	Test 18/05/2023	Test 27/09/2023	Test 04/10/2023
Hidrógeno H ₂	0.50	1.02	1.27	0.92
Monóxido de Carbono CO	16.45	11.56	7.75	7.78
Dióxido de Carbono CO ₂	82.73	86.73	90.46	90.78
Metano CH ₄	0.19	0.51	0.39	0.39
HC como etano C ₂ H ₆	0.13	0.17	0.13	0.13
%H ₂ (molar)	0.5	1.020102	1.27	0.92

(*) Todas las unidades se expresan en Porcentaje [mol de () / 100 moles muestra]

en pruebas realizadas por Mena [28] en fechas de otoño de 2023, las cuales sirven como referencia de lo que se tiene previo a cualquier cambio aplicado al sistema. Cabe destacar que estas temperaturas pueden variar dependiendo de la radiación disponible entre otros numerosos factores.

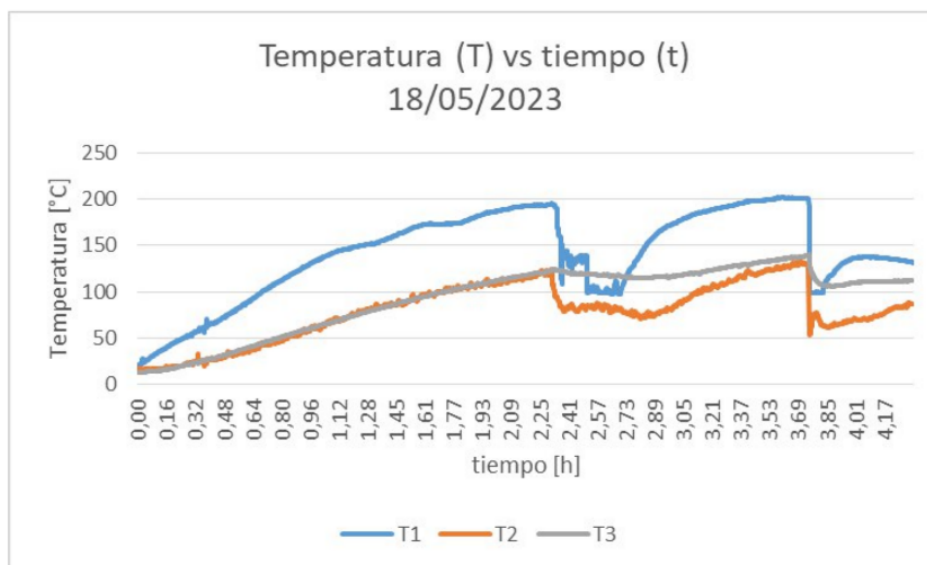


Figura 3.2: Gráfico Temperatura [°C] vs. tiempo [h] dentro del reactor, medido por termocuplas tipo K 1,2,3 [28].

Para superar los inconvenientes, se tienen en cuenta las recomendaciones dadas por los tesisistas anteriores [28] que trabajaron con el conjunto, con el fin de atacar la causa raíz de la baja temperatura en el reactor. Estas se categorizan según el área, y se presentan en en plan de mejora.

Plan de Mejora

El plan de mejora realizado por el autor tiene como objetivo general generar mejores condiciones para la gasificación dentro del reactor, específicamente llegar a una temperatura adecuada y mejorar el manejo de los gases generados. Para ello, se desarrolla aplicaciones de mejora en cuanto al reactor rotatorio de medios porosos, mejoras en

cuanto a la óptica que entrega la energía solar y mejoras en cuanto al manejo de los gases, de esta forma se abordan tres ejes que apuntan a generar las condiciones óptimas para un correcto desarrollo de la experiencia.

Tabla 3.2: Plan de mejora para elevar la temperatura del reactor, clasificando cada mejora según problema, acción específica y luego prioridad.

Problema Principal	Acción Específica	Prioridad
Pérdidas por transferencia de calor (reactor)	Cambiar acoplado rotatorio del reactor	Relevante
	Cambio de placa receptora de radiación	Relevante
	Optimización de cavidad interna del reactor	Opcional
Foco no ajustado a reactor (óptica)	Cambio de concentrador parabólico	Relevante
	Añadir segundo espejo (hiperbólico)	Descartado
	Agregar etapa de lupa	Opcional
	Mejorar la estructura del helióstato	Opcional
Fuga de gases (Toma de muestras)	Mejorar sistema de extracción de muestras	Opcional
	Hermeticidad en tapa de entrada para carga	Relevante
	Verificar estanqueidad del reactor	Relevante

Se presenta en la tabla 3.2 un resumen de las aplicaciones con fin de mejora del proceso, a modo de visualizar cuales fueron consideradas como prioritarias y cuales no. Posteriormente, en cada sección se explicará en detalle los motivos de cada selección, como también el desarrollo de aplicación de la misma.

Se categoriza las mejoras según su prioridad a la hora de buscar corregir la causa raíz de la baja cantidad de hidrógeno generado en el gas de síntesis, tanto las bajas temperaturas en el reactor como una posible fuga de gas.

3.1. Mejoras en relación al reactor

Las modificaciones del reactor se enfocan en corregir las pérdidas de energía por transferencia de calor que hay en el proceso.

- Cambiar acoplado rotatorio del reactor.
- Cambiar el material de la placa receptora de radiación.
- Optimizar el diseño de la cavidad interna del reactor.

3.1.1. Cambiar acoplado rotatorio del reactor

3.1.1.1. Antecedentes pérdida de calor en acoplado

El reactor que se utiliza para este trabajo ha sido manufacturado por memoristas que han trabajado previamente en este proyecto. Para esto, se ha reutilizado un flange ciego, lo cual se ve reflejado en que la geometría que presenta el reactor. El diseño que se utilizaba no era el óptimo, lo anterior se ve reflejado en la zona donde se recibe la radiación, poseyendo esta un acoplado que permite la rotación, pero que a su vez recibe gran parte de la radiación, actuando más bien como un disipador del calor de grandes dimensiones. Este acoplado se puede visualizar en la figura 3.3.



Figura 3.3: Acoplado rotatorio en la parte inferior de la figura, junto a reactor en el fondo.

La radiación incidente al foco generado por el concentrador parabólico utilizado en trabajos previos por la dirección de los rayos de los mismos demuestra en primer lugar que una parte importante de la radiación no llega a la placa receptora del reactor, sino más bien a la parte exterior o frontal del acoplado rotatorio. Esta situación se ve reflejada gráficamente en la figura 3.4 recogida del trabajo de Mena [28].

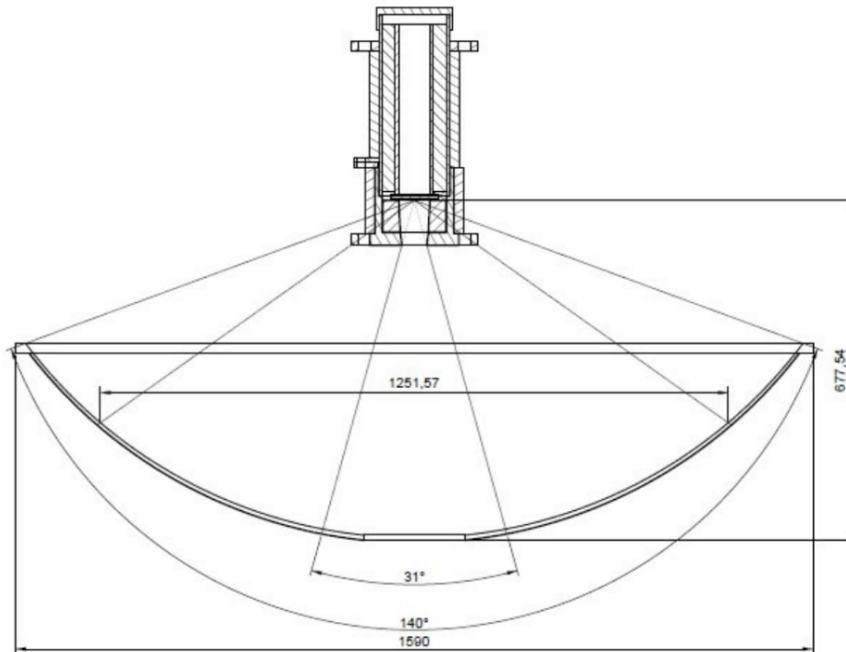


Figura 3.4: Rayos proyectados del concentrador parabólico previamente usado sobre el acoplado rotatorio previamente utilizado

Se evidencia además gráficamente esta situación en la figura 3.5, dado que no se alcanza a formar el punto focal de la forma óptima, sino más bien los rayos impactan sobre el acoplado rotatorio generando una silueta de foco, aportando más evidencia a la pérdida de calor que se genera en el acoplado.



Figura 3.5: Silueta del foco generado sobre el acoplado rotatorio previamente utilizado

Lo anterior no es tan solo por la proyección de rayos realizada, sino también que se tomaron registros de temperaturas, tanto en la zona focal como en el reactor mismo como se visualiza en la figura 3.6. Para profundizar en esto, se adjunta en el anexo E mayor evidencia que respalda las temperaturas alcanzadas en la zona del acoplado rotatorio previamente utilizado.

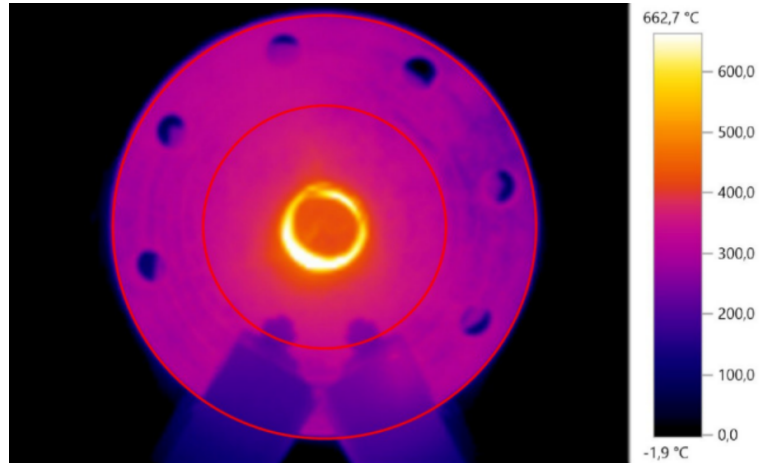


Figura 3.6: Acoplado rotatorio en la parte inferior de la figura, junto a reactor en el fondo.

Sumado a lo anterior, se cuenta con una simulación realizada en el trabajo de Mena [28], la cual representa las temperaturas en el reactor.

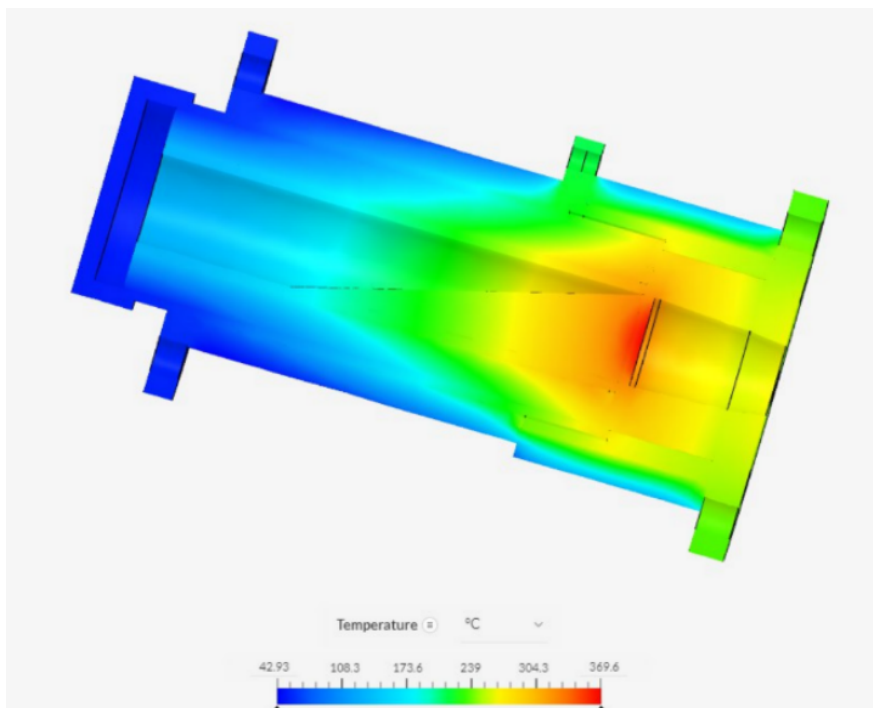


Figura 3.7: Distribución térmica simulación 12600 segundos [28].

Si bien este modelo presenta ciertas simplificaciones, las cuales se detallan en el trabajo citado, este permite traer más evidencia de que el acoplado rotatorio es un lugar donde se pierde parte considerable del calor que llega a través de la radiación, como se evidencia en la figura 3.7.

Dado lo anterior, se formula la hipótesis que reemplazando el acoplado rotatorio por una pieza de menor tamaño pero igual diámetro se permitirá que la radiación incida directamente sobre la placa receptora del reactor, con el consiguiente aumento de la temperatura interna en la cámara de combustión del reactor.

3.1.1.2. Fabricación de acoplado sustituto

Para fabricar la nueva pieza que actuará como acoplado que permita el apoyo y rotación del reactor, se modela en Autocad Inventor una nueva pieza. Esta pieza a diferencia de la anterior es mucho más corta, manteniendo el diámetro de rotación de la anterior, evitando así las pérdidas descritas en la subsección anterior. En la figura 3.8 se observan las principales dimensiones de la pieza fabricada

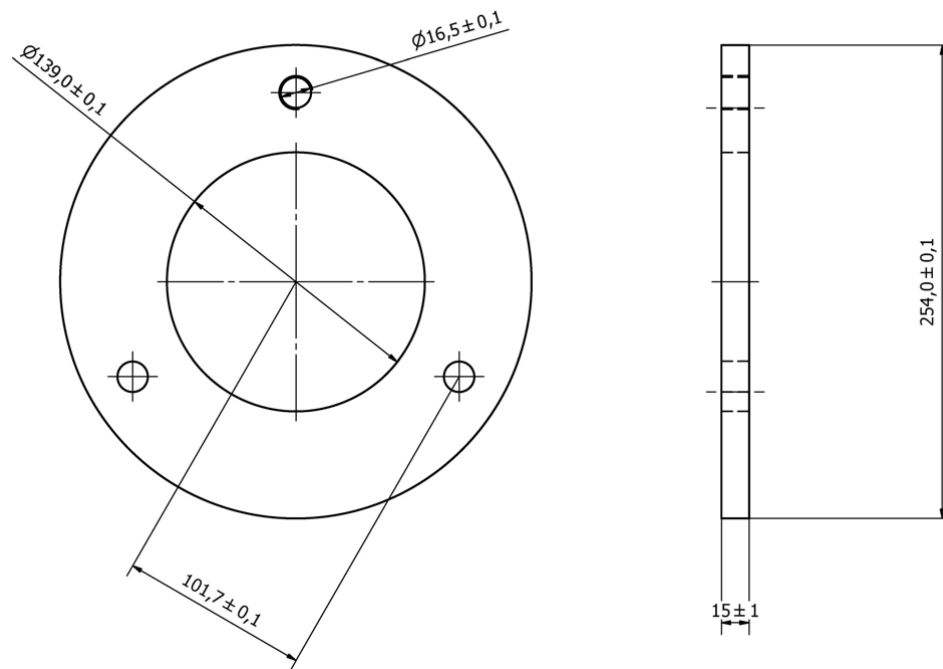


Figura 3.8: Dimensiones nuevo acoplado rotatorio.

En cuanto a las tolerancias utilizadas para la pieza a manufacturar las medidas tienen una tolerancia de la orden de las décimas de milímetro, tanto como agujeros como para el diámetro del disco. Por su parte, la medida del espesor de la pieza tiene mayor tolerancia. Cabe destacar que el espesor de la pieza es menor que el espesor del disco que presentaba el acoplado rotatorio previamente.

3.1.1.3. Reajuste dimensiones base

El reactor rotatorio posee la capacidad de rotar dada la instalación realizada. En primer lugar el reactor mismo tiene dos discos, uno fijo en su estructura y otro que va en la tapa que se aperna. esto dado a que su construcción se realizó con flanges de tubería reciclados. Se tiene que este cuerpo rota sobre un conjunto de 6 rodamientos dispuestos según la figura 3.9.

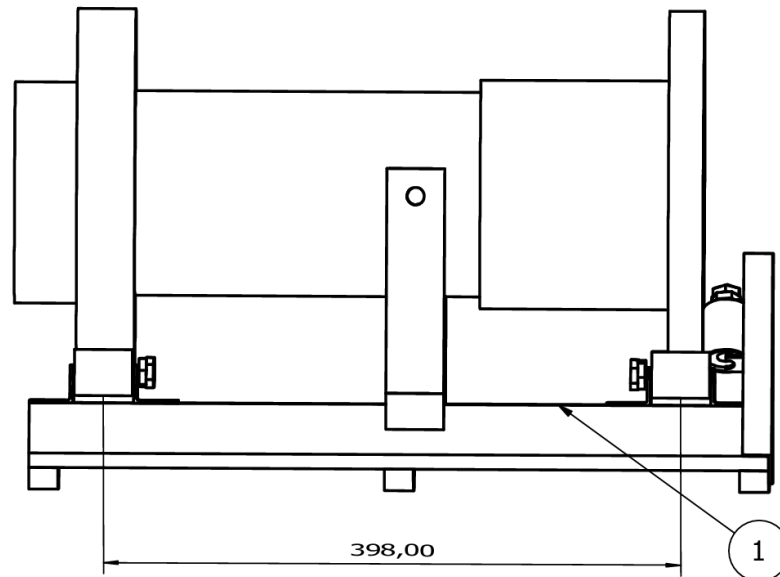


Figura 3.9: Diseño original de reactor montado en base de rodamientos.

Dada el cambio que se realiza en la tapa anexa al cuerpo del reactor, la distancia entre los discos del reactor disminuye. Se puede apreciar en la figura 3.10 el cambio de dimensiones realizado a la base.

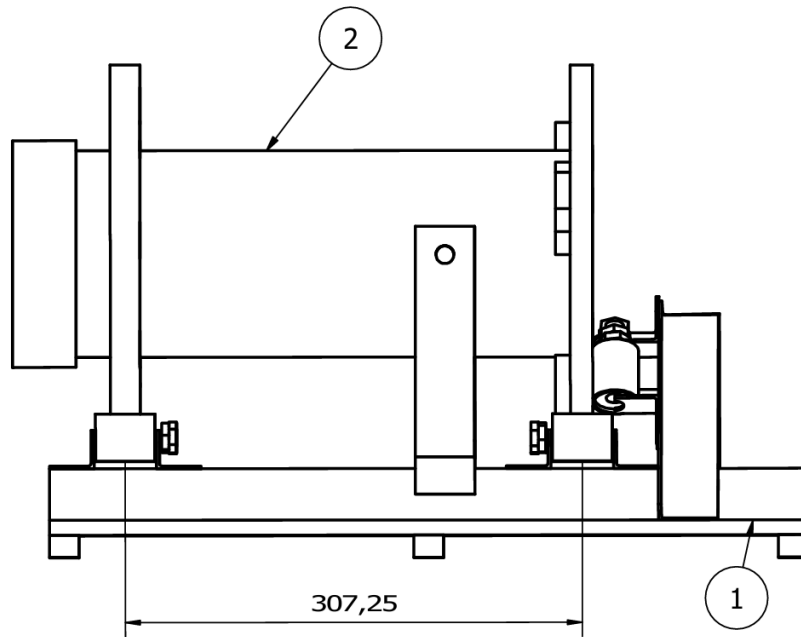


Figura 3.10: Rediseño de reactor montado en base de rodamientos.

Este cambio involucra la parte frontal, donde se ubican 4 rodamientos. Se ajustó de modo que calce con el reactor en sus nuevas dimensiones, respetando que la catarina que va sobre el reactor quede alineada con el piñón motriz que viene desde el motor ubicado en la base del reactor.

Con las modificaciones ya realizadas, se procede a montar la cadena con el engrase respectivo de la misma, para posteriormente realizar una **prueba del funcionamiento de la rotación del reactor** con el motor encendido, la cual resulta positiva por lo cual el sistema está en condiciones óptimas para operar con rotación.

3.1.2. Cambio de placa receptora de radiación

En el contexto de la búsqueda del aumento de temperaturas dentro del reactor, una de las medidas para aprovechar mejor el calor proveniente de la radiación solar fue la de realizar un cambio a la placa donde se recibe la radiación solar. Se plantea entonces un cambio de la placa metálica por la de un mejor material, específicamente cristal de cuarzo según las sugerencias de trabajos de título previos.

Se realiza una visita al vidriero de la universidad, don Antonio Rubilar (Jovino), con el fin de averiguar las posibles alternativas para una placa de cristal que permita irradiar dentro del reactor por radiación solar. Se desprende entonces la clasificación de los cristales considerados:

- **Vidrio Pyrex y Vidrio Alcalino:**

- Ambos tipos soportan temperaturas de hasta aproximadamente 400°C, lo que los hace inadecuados para las altas temperaturas requeridas en el reactor.
- **Vidrio de Cuarzo:**
 - Resistencia a temperaturas de 800 a 1000°C.
 - Coeficiente de deformación térmica extremadamente bajo.

Es importante señalar que que los vidrios de cuarzo soportan las temperaturas a las que se debe llegar para gasificar, es decir alrededor de 800 [°C]. En cambio las otras categorías no soportan sobre 400 [°C] aproximadamente. El cuarzo tiene un coeficiente de deformación térmica extremadamente bajo, lo cual favorece además su comportamiento mecánico en la empaquetadura.

Se desprende además que un tratamiento térmico podría ayudar a mejorar las propiedades mecánicas del cristal. Considerando el mismo tema de las propiedades mecánicas, se realiza una simulación de cargas de posibles dimensiones de una placa de cuarzo, también llamada sílice vítrea. Para realizar esto, se considera las propiedades mecánicas de la sílice vítrea [30], las cuales se aplican como un material en el software que se aplica a la geometría de la placa.

3.1.2.1. Propiedades del Vidrio de Sílice Vítrea (SiO₂)

- **Propiedades Térmicas:**

- Conductividad térmica: 1.3 W/m*K
- Coeficiente de dilatación térmica: 0.5 μm/(m·°C) (0-1000°C)

- **Propiedades Mecánicas:**

- Módulo de Young: 75 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0.16
- Densidad: 2.2 g/cm³

– Resistencia máxima a la tracción: 110 MPa

En el anexo I se observa la **simulación de esfuerzos sobre la placa de cuarzo**, que se usó para tener una referencia de los esfuerzos que soportaría según las dimensiones dadas en la empaquetadura.

3.1.2.2. Cotización y Dimensiones

Se obtuvo una cotización de Soviquim con un valor de 271,320 CLP para la placa de cuarzo.

Las dimensiones de la placa son:

- Diámetro: 76 mm
- Espesor: 3 mm

El uso de un cristal de cuarzo en lugar de una placa metálica otorga la ventaja de permitir el paso del calor tanto por radiación como por conducción. El cuarzo es altamente transparente a la radiación solar gracias a su **alta transmitancia o transmitividad óptica**, lo que facilita la transferencia de calor hacia el interior del reactor sin las pérdidas que podrían ocurrir con una placa metálica, la cual solo transfiere calor por conducción. Esto resulta en una eficiencia térmica superior y un mejor aprovechamiento de la energía solar.

A pesar de las ventajas de un uso de placa de cuarzo para radiación, se fabricó una placa metálica de iguales dimensiones para operar en caso de que se requiera un cambio rápido o para comparar el desempeño bajo diferentes condiciones de operación.

3.1.3. Optimización de cavidad interna del reactor

La optimización de la cavidad interna del reactor se considera opcional dado que por el momento se sigue utilizando el reactor disponible en sus dimensiones originales. Estas pueden no ser óptimas si se hace una relación entre el volumen interno del la zona de reacción y la cantidad de energía recibida por la radiación, por lo que un modelo de reactor con menores dimensiones podría aprovechar de menor manera el calor disponible. Se considera entonces esto como una posible mejora a futuro, cuando se realice un rediseño completo del reactor rotatorio de medios porosos.

Considerando lo anterior, se comenta que se ha realizado pruebas experimentales en reactores de menores dimensiones previamente, como se observa en la figura 3.11

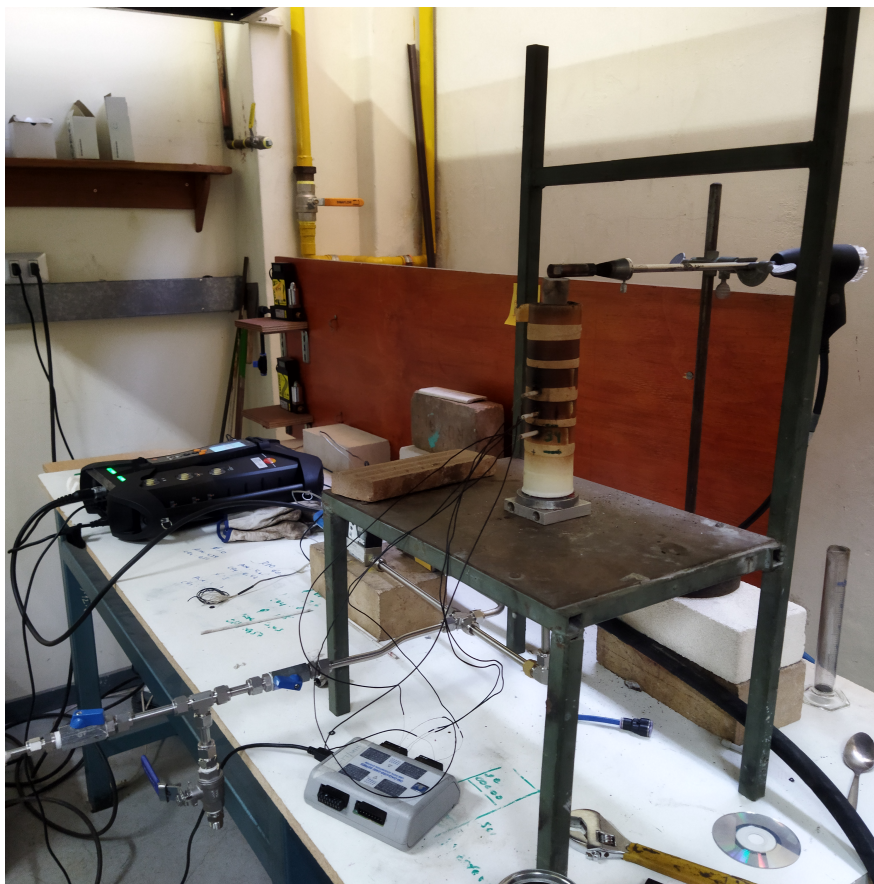


Figura 3.11: Reactor utilizado para pruebas previas en casa central.

Las menores dimensiones de este reactor permiten que se complete el volumen total del reactor, operando con 5 gramos de carbón y el resto del espacio ocupado por alúminas.

3.2. Mejoras en relación a la óptica solar

Las mejoras a la óptica solar tienen como finalidad que el foco de energía solar generado sea el óptimo.

- Cambiar el concentrador parabólico.
- Agregar un segundo espejo hiperbólico para mejorar el ángulo de ataque.
- Incorporar una etapa de lupa.
- Mejorar la estructura del heliostato.

3.2.1. Cambiar el concentrador parabólico.

Se tiene en cuenta que el concentrador solar es un factor de primera relevancia a la hora de alcanzar la temperatura requerida en el reactor, ya que dependiendo de sus características y estado puede afectar directamente la radiación que es reflejada hacia la zona focal, que da hacia el reactor.

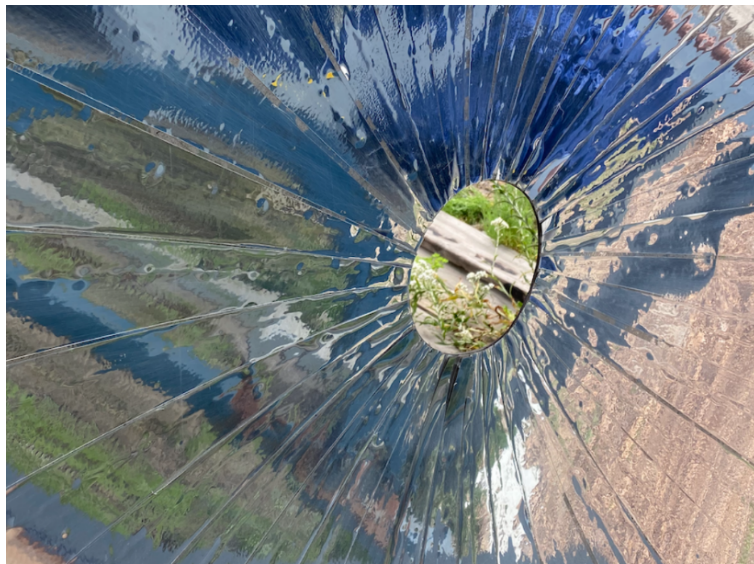


Figura 3.12: Estado del concentrador solar utilizado en pruebas previas al cambio.

En la figura 3.12 se evidencia que el concentrador parabólico utilizado en pruebas previas presenta desperfectos en su superficie reflectora, ya sea que las láminas reflectoras presentan piquetes, irregularidades e incluso algunas se han ido desprendiendo, lo cual disminuye el coeficiente de reflectividad teórico estimado en trabajos previos.

3.2.1.1. Características de los concentradores solares utilizados

Tabla 3.3: Características del concentrador antiguo[7] y el nuevo[31]

	Concentrador antiguo	Concentrador nuevo
Material	Cobre	Acero al carbono
Diámetro externo	1580 mm	1500 mm
Diámetro interior	170 mm	170 mm
Eficiencia reflectante	80 %	90 %
Poder calórico equivalente	-	1800 W
Peso	~90 kg	16 kg

Dadas las características del nuevo concentrador, se opta por el cambio, permitiendo renovar con esto la superficie reflectante, lo cual teóricamente proporciona mejores resultados en cuanto a la cantidad de radiación concentrada. Esto se verifica al momento de hacer pruebas de temperatura dentro del reactor.

La instalación del nuevo colector se realiza comprando algunos materiales adicionales, dado que la estructura previamente diseñada está pensada para un colector de diferente diámetro y diferente geometría en la circunferencia, por lo cual la estructura previa no serviría para el caso.

En el anexo C se detalla las razones y el proceso del armado de la nueva estructura.

3.2.1.2. Estado final nuevo concentrador

Se tiene como resultado la instalación del nuevo concentrador parabólico, con el cual a través de su superficie en mejores condiciones que el anterior se busca obtener mejoras en cuanto a la concentración de radiación. En la figura 3.13 se aprecia el resultado de la instalación.



Figura 3.13: Concentrador montado visto frontalmente por su parte reflectante.

3.2.2. Agregar un segundo espejo hiperbólico para mejorar el ángulo de ataque

El arreglo originalmente era del tipo Cassegrain, el cual consiste en un disco hiperbólico ubicado en el foco del concentrador parabólico, el cual reflejase la radiación hacia el reactor a través de un agujero en el parabólico. Cabe destacar que el origen del motivo por el cual se decidió por usar esta configuración radica en que un estudio realizado añadiendo un espejo secundario a los concentradores de una etapa [32] demostró un aumento del ratio de concentración en un 80 %.

Según lo que se menciona en el trabajo de un tesista [28], cuando se trabajó en optimizar el campo de pruebas se tomó la decisión de no añadir este espejo cassengrein. Inicialmente, esta etapa de concentración se consideraba necesaria según el diseño original del campo de pruebas. Sin embargo, las pruebas experimentales no demostraron de manera concluyente la utilidad de este componente. Los motivos detallados para su descarte son los siguientes:

- Dificultades operativas para enfocar la radiación en la placa emisora del reactor.
- Problemas con el material del espejo: aunque tenía un sistema de refrigeración por agua, el material PLA se deformaba debido a la alta temperatura.
- Las termocuplas no registraron un aumento de temperatura en el reactor mayor a 15°C.

3.2.3. Incorporar una etapa de lupa

Esta alternativa en efecto es una buena alternativa si es que se utiliza en reemplazo del concentrador parabólico. Según indica un estudio realizado por un ingeniero de la universidad de Chile [33], teniendo en cuenta una radiación incidente al lente de $600 \text{ [W/m}^2\text{]}$ además de un área efectiva de concentración de $0,87 \text{ [m}^2\text{]}$ se logra obtener una energía máxima de 522 [W] . La transmisividad de 92% del material según la hoja de datos del lente utilizado por el ingeniero se traduce en una energía incidente en el foco de 480 [W] . Lo anterior en términos de temperatura y radiación se puede observar en la gráfica de la figura 3.14:

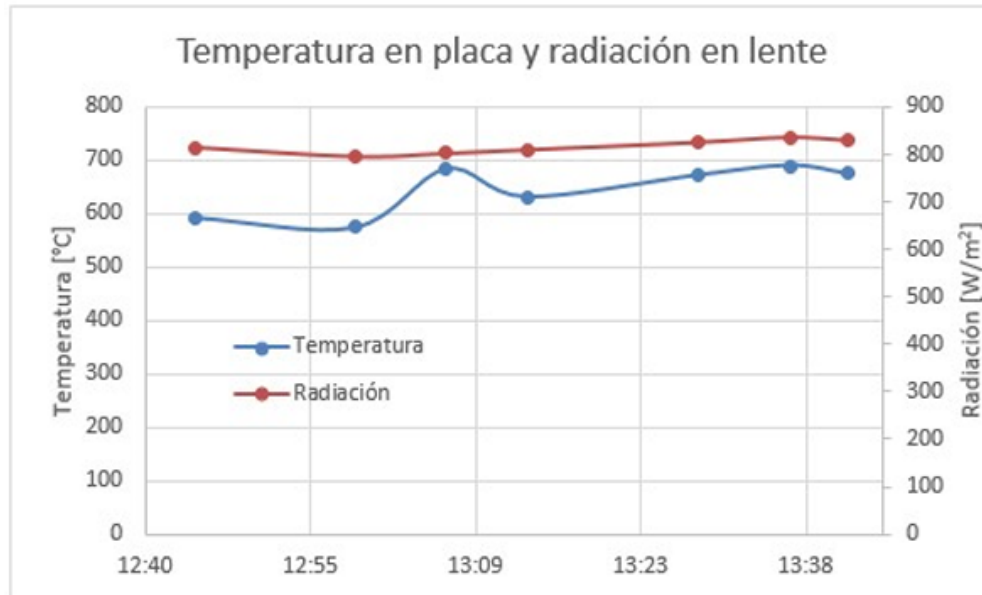


Figura 3.14: Gráfica de valores obtenidos de temperatura en foco usando concentrador fresnel según referencia [33].

Esta alternativa ha sido tenida en cuenta, no obstante ha sido relegada a sólo una potencial solución a causa de que no podría ser utilizada como una segunda etapa de concentración dado que el material, Poli(metacrilato de metilo) (PMMA), comienza a degradarse a bajas temperaturas del orden de 230 a $300 \text{ [}^\circ\text{C]}$ [34] y dado que las temperaturas alcanzadas por el concentrador usado previamente superan los $300 \text{ [}^\circ\text{C]}$ en el foco se prioriza la alternativa de utilizar un nuevo concentrador parabólico.

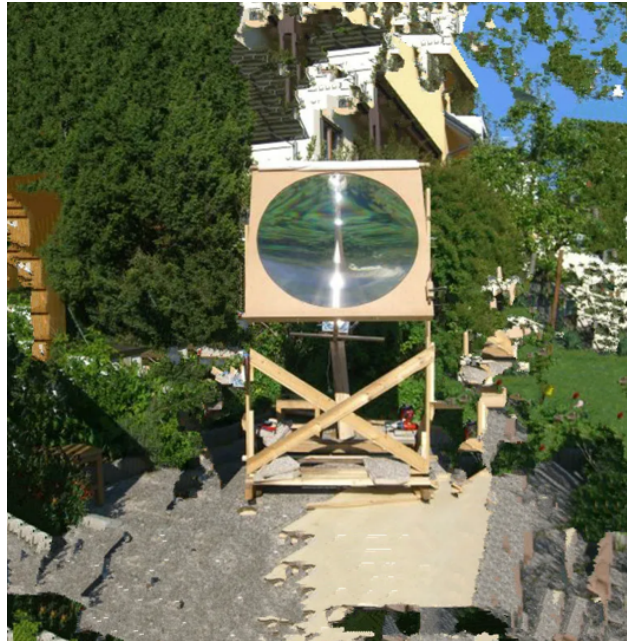


Figura 3.15: Imagen referencial de un disco fresnel comercial

Se observa en la figura 3.15 el disco fresnel encontrado en el comercio, el cual según la descripción de su publicación es de PMMA.

3.2.4. Mejorar la estructura del heliostato

El soporte estructural del heliostato está conformado por el marco del espejo y la base que lo soporta. El marco ha sido fabricado a base de perfiles de aluminio similares al que se puede visualizar en la figura 3.16.



Figura 3.16: Perfil T-slot de aluminio referencial

El marco de aluminio del cual está soportado el espejo del heliostato puede visualizarse en la figura 3.17. Este marco al montarse sobre el soporte del heliostato mostrado en la figura 3.18 por acción del propio peso, el peso del espejo y la posición en la cual se monta tiene a curvar el espejo, produciéndose una deformación en el mismo que afecta la forma en la cual la radiación es reflejada sobre el concentrador parabólico.

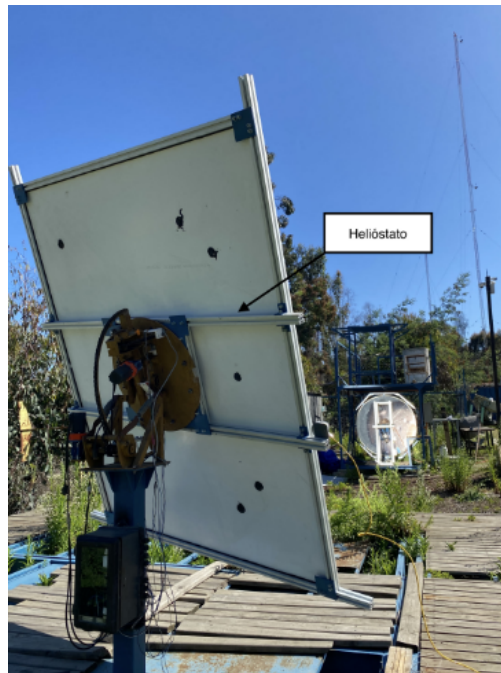


Figura 3.17: Heliostato montado visto desde la parte posterior. [28]



Figura 3.18: Soporte de heliostato con movimiento por accionamiento eléctrico

Se desconoce el impacto que puede llegar a tener la deformación del espejo del heliostato en el porcentaje de radiación que pudiese no estar siendo reflejada correctamente a la zona de concentración, el concentrador parabólico en este caso. Asimismo, es posible apreciar en la figura 3.19 que la radiación proyectada por el heliostato no es completamente dirigida hacia el concentrador parabólico. Lo anterior puede explicarse por la deformación que se genera en el heliostato, la cual implica que los rayos se reflejan en un rango más amplio. Resulta una alternativa a futuro para evaluar en detalle, requiriendo posiblemente añadir un campo de heliostato para sumar mucha más radiación hacia el concentrador parabólico.



Figura 3.19: Proyección de radiación generada por heliostato.

La alternativa de cambiar la estructura del helióstato no se considera prioritaria debido a que se prioriza otras que alteran en mayor medida la temperatura alcanzada. Sin embargo, resulta importante considerar añadir el campo de helióstato, dado que lo más común en aplicaciones de alta energía es contar con más de una fuente de radiación incidente en el concentrador.

3.3. Mejoras en cuanto al manejo de gases

- Mejorar el sistema de extracción de muestras.
- Mejora en tapa de entrada para carga.
- Verificar la estanqueidad del reactor.

3.3.1. Mejorar el sistema de extracción de muestras

El sistema de extracción de muestras consiste en un tanque que tiene una cantidad de agua suficiente como para sumergir un tanque invertido, dentro del cual a través de una manguera proveniente del reactor se inyecta el gas de síntesis generado, yéndose este por densidad hacia la superficie interna superior del tanque invertido por densidad, permitiendo extraerlo de forma adecuada en una bolsa TEDLAR.

Mejorar el sistema de extracción de muestras se consideró una tarea no prioritaria, principalmente debido a que se priorizó tareas de mejora que implican un alza en las temperaturas alcanzables en la zona de reacción. Lo anterior no significa que el sistema se haya verificado más allá de las muestras extraídas en trabajos previos [28], por lo cual queda como tarea para trabajos futuros una posible mejora del sistema de extracción de muestras de considerarse necesaria.

3.3.2. Mejora en tapa para carga de reactivos

Se tiene en cuenta que la tapa de carga del carbón y el medio poroso es una de las partes que puede afectar la hermeticidad del reactor. Si bien es cierto se busca una mayor hermeticidad con el uso de teflón, en ocasiones se notó falta de un adecuado agarre de la tapa a la hora de abrir o cerrar la misma. Se usó una llave de cadena, lo cual provocada resbalones o simplemente un agarre insuficiente para cerrar de la mejor manera la tapa.



Figura 3.20: Tapa de entrada de reactivos, con los pernos ubicados para mejor agarre.

Para resolver de manera sencilla esto, se instaló tuercas en una posición de 180° , esto con el fin de poder adosar tuercas a la hora de abrir o cerrar la tapa, sin generar problemas a la hora de rotar el reactor.

3.3.3. Verificar la estanqueidad del reactor

Para verificar la estanqueidad del reactor propiamente tal es sugerido realizar una prueba de estanqueidad. Esta prueba de estanqueidad si bien se ha realizado previamente sobre el cuerpo del reactor, de realizarse nuevamente puede dar certeza de la hermeticidad del mismo. Según se conversó Nicolás Arancibia, tesista que ha trabajado con el reactor rotatorio de medios porosos, cuando se realizó previamente la prueba de estanqueidad se utilizó una pieza de caucho o goma en la zona de la placa de recepción de radiación a modo de empaquetadura, la cual no se utilizó durante las pruebas de gasificación. Esto evidentemente puede indicar que el reactor no estaba lo estanco que se creía, pudiendo perderse parte del gas de síntesis generado en esas pruebas y alterando así las muestras obtenidas.

Según informa el artículo de SEMMAQ [35], empresa dedicada a instalaciones de gas, una prueba de hermeticidad o estanqueidad es aquella que permite verificar que un gas o fluido dentro de un estanque o tubería no escape, es decir que se mantenga como un sistema cerrado. Esto es un factor relevante a considerar cuando se trabaja con gases inflamables como lo pueden ser los gases de la gasificación, que además son ricos en metano, el cual por temas de seguridad no debería escapar al ambiente.

Las pruebas de estanqueidad van desde una **prueba por burbujeo**, que consiste en una prueba en la cual se vierte un líquido jabonoso sobre la superficie a evaluar y dentro del sistema se inyecta aire a presión, de forma que si el sistema presenta fugas estas se vean reflejadas en la superficie del elemento como burbujas. Esta prueba es la más sencilla, y según se verificó en trabajos anteriores esta prueba es la que se ha realizado previamente sobre el reactor.

Pruebas más sofisticadas consisten en las **pruebas por cambio de presión**, en las cuales se instala un manómetro en la entrada y en la salida de flujo del elemento, de forma que se compare las presiones de entrada y salida, siendo estas iguales si es que el elemento no presenta fugas, y diferentes si existe alguna.

3.3.3.1. Prueba de estanqueidad 04-06-2024

Para realizar la prueba de estanqueidad por burbujeo, se requirió los siguientes elementos:

- **Compresor de aire:** a través del cual se hace llegar el reactor a una presión superior a la presión de trabajo, la cual es de 1 [atm] o 1,01325 [bar], de forma que se verifique si se escapa aire del ensamblaje del reactor o de alguna conexión que llegue a este.
- **Manómetro:** Se utiliza el que va adosado al compresor, para tener noción de la presión aplicada en el reactor.
- **Agua jabonosa:** se utiliza para verificar el aire que pudiese salir, ya que este genera burbujas con la solución de agua jabonosa.
- **Otros:** lubricante multiusos WD-40, teflón gas y pernos para los agujeros de las termocuplas.

Para preparar la prueba en primer lugar, se unieron todas las piezas que permiten cerrar el reactor, ya sea la tapa receptora de radiación, la tapa de entrada del carbón y vapor tanto también como las perforaciones donde van las termocuplas. Las que llevan rosca han sido insertadas utilizando teflón para asegurar una correcta hermeticidad, tal cual se visualiza en las figuras 3.21, 3.22 y 3.23.



Figura 3.21: Rosca de tapa de suministros con teflón.



Figura 3.22: Pernos para zona de termocuplas con teflón.



Figura 3.23: Acoplado de suministro rotatorio con teflón en rosca.

Una vez inserto el acoplado de suministro de aire, el setup queda como se visualiza en la figura 3.24.



Figura 3.24: Setup prueba de estanqueidad

Teniendo armado el setup para la prueba, se prepara el compresor a una presión superior a una presión de 2 [bar]. Además, se prepara un vaso con la solución jabonosa, hecha con jabón de manos y agua.

Se procede a ejecutar la prueba de estanqueidad suministrando aire a presión dentro del reactor, y vertiendo el líquido jabonoso sobre las zonas de posibles fugas del mismo. Se visualiza no burbujeo en la zona de la tapa de suministro gracias al uso de teflón y en el cuerpo del reactor, como se visualiza en la figura 3.25



Figura 3.25: Prueba de burbujeo reactor

Se detecta burbujeo en la zona de la placa receptora. Para resolver esto se añade teflón a la empaquetadura de la misma, y queda como se ve en la figura 3.26.



Figura 3.26: Empaquetadura de placa receptora con añadido de teflón.

Finalmente, se realiza nuevamente la prueba de estanqueidad, verificando burbujeo en la zona de los pernos de la placa receptora únicamente, como se visualiza en la figura 3.27. Se concluye por ende que se debe usar teflón en los pernos de la placa receptora.



Figura 3.27: Burbujeo en pernos de placa receptora.

Como conclusión de la prueba, se puede afirmar que el reactor está efectivamente estanco, es decir no debiese haber problemas de fuga de gases si se usa correctamente a la presión de trabajo de 1 [bar], considerando siempre el uso de teflón en las zonas con rosca y en la empaquetadura de la placa receptora.

3.4. Otras mejoras adicionales

A través de esta sección se buscará mostrar las mejoras adicionales realizadas sobre el banco de pruebas solar. Estas surgieron para resolver problemáticas encontradas en el desarrollo de este trabajo de título, y se espera que su aplicación sea de beneficio futuro para el desarrollo óptimo y seguro del proyecto FONDECYT N°1241030.

3.4.1. Medición de Temperaturas

El sistema de medición de temperaturas en el reactor rotatorio de medios porosos fue diseñado para obtener datos precisos y en tiempo real durante la operación del equipo. Como se muestra en la Figura 3.28, el HAT (placa azul) está montado sobre una Raspberry Pi, que se encarga de medir las temperaturas dentro del reactor. Este dispositivo es esencial para garantizar el control térmico, lo cual es fundamental a la hora de considerar la temperatura óptima de gasificación.

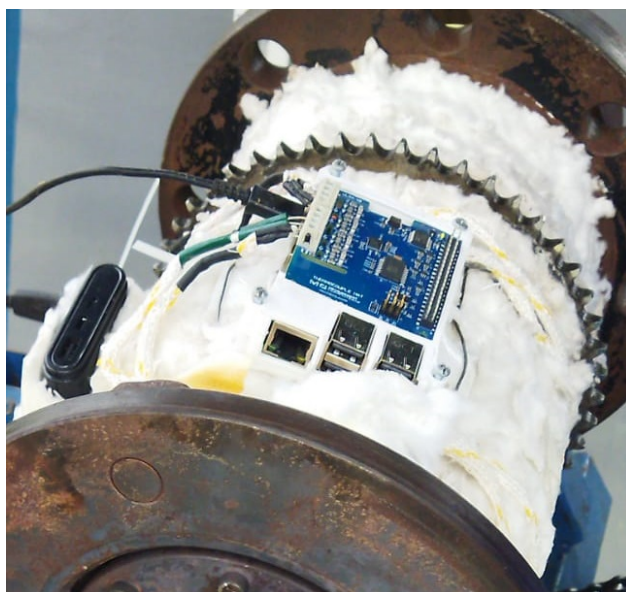


Figura 3.28: Hat (placa azul) montado sobre Raspberry Pi en reactor rotatorio de medios porosos.

Para gestionar y monitorear estas mediciones de forma remota, se estableció una red de conexión entre la Raspberry Pi y un computador a través de un router, como se puede observar en la Figura 3.29. Esta red permite controlar la Raspberry Pi desde el PC, facilitando la supervisión continua y el análisis de los datos de temperatura.

Summary

Dynamic IPv4

Wi-Fi 2.4 GHz

Enable:	Yes
SSID:	SOLBERTO-NET
Encrypt:	WPA2-Personal
Password:	solberto_net

Device

Model:	DIR-615
Software version:	3.0.5
Serial number:	TW0P113008648
IP:	192.168.0.1
Mode:	Router

Login data

Username:	admin
Password:	👁 SOLBERTO

[SAVE CONFIGURATION FILE](#)

Figura 3.29: Red de router a través del cual se realiza conexión Raspberry Pi y computador.

Dentro de la Raspberry Pi, el programa encargado de registrar y visualizar las temperaturas medidas se encuentra organizado en un directorio específico, como se muestra en la Figura 3.30. Este directorio permite acceder de manera sencilla a los datos almacenados para su posterior análisis y optimización.

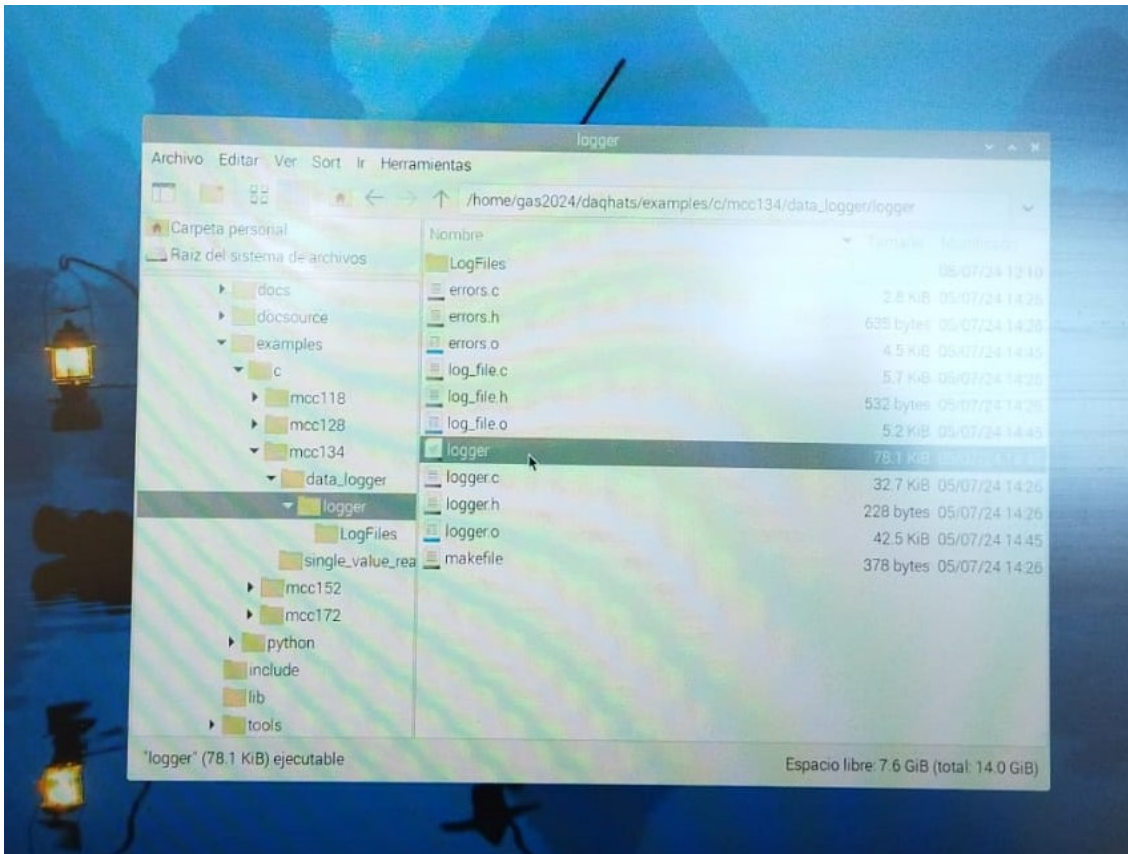


Figura 3.30: Directorio de programa para medir temperaturas dentro de Raspberry Pi (HAT MCC134).

Finalmente, la Figura 3.31 presenta el programa mismo utilizado para visualizar y registrar las temperaturas dentro del reactor rotatorio de medios porosos. Este software es una herramienta fundamental para el monitoreo continuo, ya que no solo permite la visualización en tiempo real, sino también el registro de los datos, lo que facilita el análisis detallado y la mejora del rendimiento del reactor.

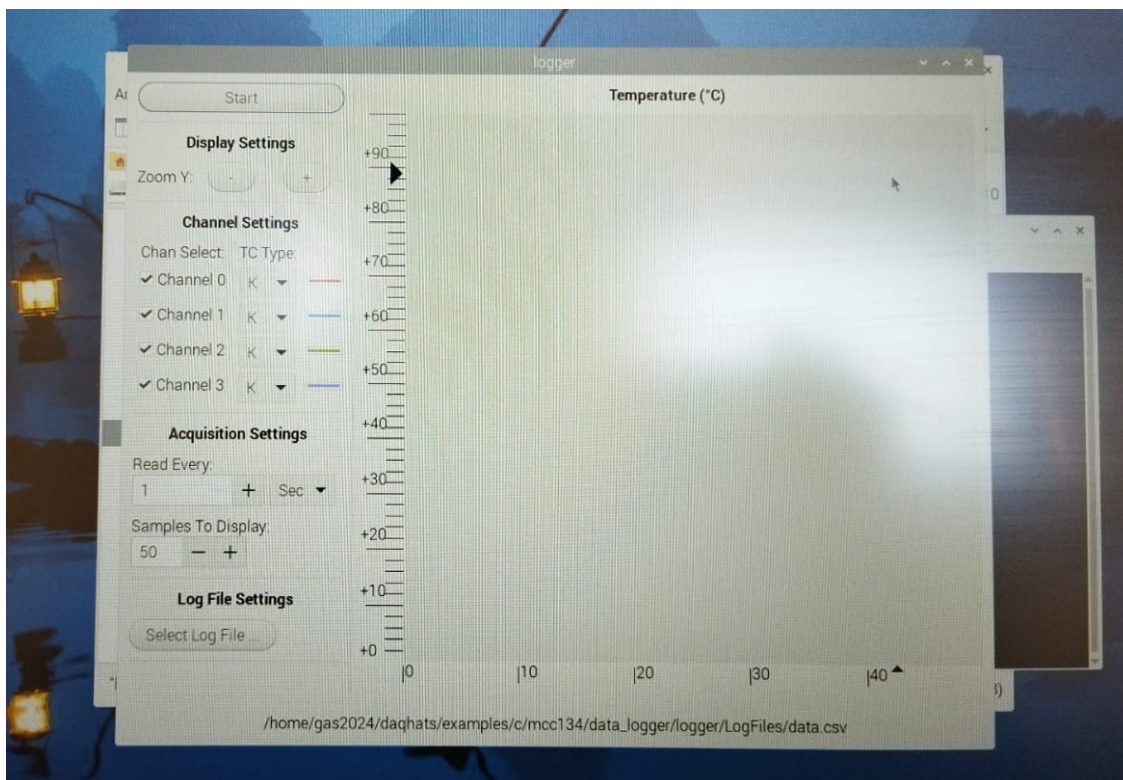


Figura 3.31: Programa a través del cual se visualiza y registra temperaturas medidas en reactor rotatorio de medios porosos, dentro de Raspberry Pi.

Se espera que esta mejora permita un control continuo y en tiempo real de las temperaturas. Se sugiere en las mejoras a futuro mejorar la fuente de alimentación de la raspberry PI, dado que la batería portátil (o también powerbank) presentó problemas por las altas temperaturas alcanzadas en la superficie del reactor.

3.4.2. Limpieza del Banco de Pruebas Solar

Antes de la limpieza, el banco de pruebas solar presentaba un estado que comprometía tanto la seguridad como la fase operativa. En la Figura 3.32, se observa la zona del gasificador, donde la presencia de tablas y diversos objetos fuera de lugar dificultaban la operación y el tránsito seguro, además de generar un mal aspecto en la zona de trabajo. Esta situación fue mejorada en la Figura 3.33, despejando la zona y limpiando las malezas, lo que facilitó un entorno de trabajo más seguro y eficiente.



Figura 3.32: Estado del banco de pruebas solar previo a la limpieza desarrollada por el tesista (A. Zona gasificador, B. Zona heliostato)

Aunque se han logrado mejoras significativas, todavía falta añadir tablas para asegurar un tránsito seguro en la plataforma, una de las mejoras en las cuales se está trabajando actualmente. Esta intervención se está llevando a cabo gracias a los fondos obtenidos en el programa Ingeniería 2030, gestionado por Andrés Arriagada, correferente de este trabajo de título.



Figura 3.33: Estado del banco de pruebas solar posterior a la limpieza desarrollada por el tesista (A. Zona gasificador(1), B. Zona gasificador (2), C. Zona heliostato)

3.4.3. Reparación de la Plataforma del Helióstato

La plataforma del heliostato, como se observa en la Figura 3.34, se encuentra en un estado que requiere reparaciones urgentes para garantizar la seguridad y funcionalidad del equipo. Actualmente, la plataforma presenta varias deficiencias, incluyendo la falta de tablas en ciertas áreas, lo que complica el tránsito seguro. Además, la base metálica tiene pernos expuestos que representan un riesgo de accidente al transitar por la zona.

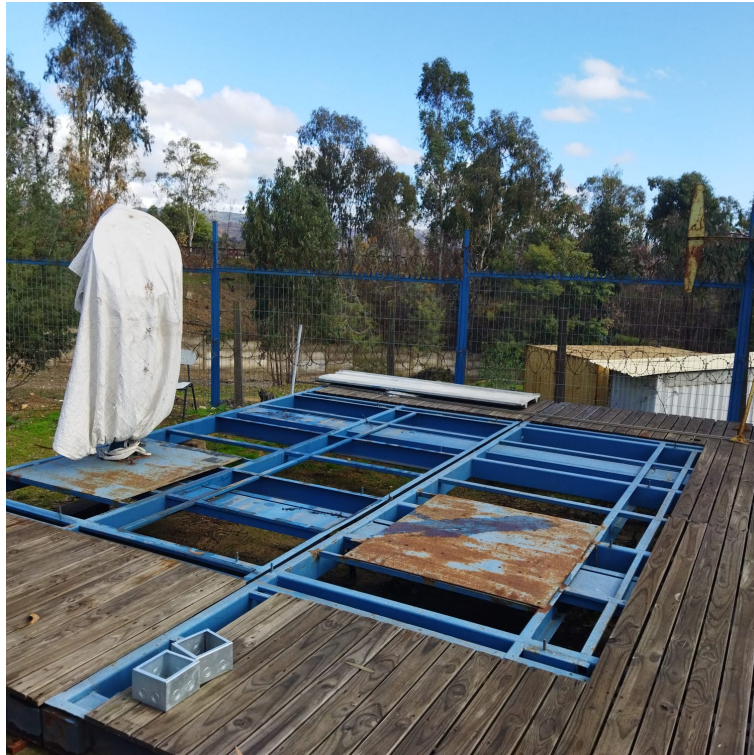


Figura 3.34: Plataforma de heliostato en estado actual (agosto de 2024)

Para mejorar esta situación, se llevarán a cabo varias acciones. Entre las principales, se añadirá una nueva serie de tablas para cubrir las áreas expuestas, lo que permitirá un tránsito más seguro por la plataforma. Además, se cortarán los pernos que sobresalen de la base metálica, eliminando así el riesgo de tropiezos o accidentes. Asimismo, se reforzará la estructura con ángulos adicionales en la base metálica para asegurar un soporte más estable y duradero.

Estas reparaciones resultan fundamentales para la correcta instalación y operación del heliostato y se están gestionando bajo los fondos obtenidos a través del programa Ingeniería 2030, coordinado por Andrés Arriagada, quien también actúa como correfe-
rente de este trabajo de título.

La Figura 3.35 muestra la cotización de los materiales y la mano de obra necesarios para llevar a cabo las reparaciones mencionadas. El presupuesto incluye los costos de los ángulos metálicos, tablas de madera, tornillos, aceite de linaza para protección de la madera, y el flete para transportar los materiales, además del costo de la mano de obra.

CLIENTE Universidad Técnica Federico Santa María				
DIRECCIÓN:			MAIL:	
FONO:				
COMUNA: Quilpué				
OBRA: Reparación plataforma de madera				
De acuerdo a lo solicitado por usted, tenemos el agrado de enviar la siguiente cotización				
ITEM	DETALLE	UNID	P. UNITARIO (CLP)	TOTAL (CLP)
1	Angulo 20x20	1	\$5.990	\$5.990
2	Tablas 1x4 cepillada	50	\$2.500	\$125.000
3	Caja tornillos autoperforante 1 1/2	5	\$11.990	\$59.950
4	Aceite Linaza	1	\$15.490	\$15.490
5	Flete	1	\$25.000	\$25.000
NOTA:	1. Tiempo de término de obra: 2 a 3 días hábiles.		Sub total de materiales	\$231.430
			Mano de obra	\$268.570
			Total	\$500.000

Figura 3.35: Cotización para la reparación de la plataforma del heliostato.

Capítulo 4

Resultados experimentales y análisis

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos a partir de las experiencias de gasificación desarrolladas en el marco del gasificador con aporte solar, considerando la aplicación de las mejoras de diseño sobre el reactor, la óptica y el manejo de gases. Se presentarán datos sobre el registro de temperaturas dentro del reactor, flujos, velocidad de rotación, fuente de calor, entre otros. Estos datos serán seleccionados y analizados con el fin de generar conclusiones sobre el actual diseño, posibles mejoras y futuro desarrollo del proyecto Fondecyt N°1241030.

4.1. Registros temperatura interna reactor

Se realiza una prueba preliminar el día 09 de julio de 2024. En esa prueba solamente se calienta el reactor usando soplete, sin alúminas ni carbón en el interior. Se alcanza una temperatura máxima de 450°C, lo cual considerando que no existe un medio que retenga calor como las alúminas o un reactivo como el carbón da a entender que se puede alcanzar temperaturas superiores.

4.2. Registros con extracción de gases

Como fuente de calor, se emplea un soplete que apunta directamente a la placa receptora, ya que es invierno y la irradiación solar no es suficiente para realizar pruebas representativas. Es importante conocer el flujo de gas utilizado, por lo cual se utiliza un controlador de flujo para este propósito.

Para la toma de muestras de gases se utiliza el analizador de gases Testo, dado que no se encuentra disponible cromatografía de gases al momento de realizar las pruebas. Es importante considerar que el hidrógeno registrado por el analizador de gases es calculado en función de los gases detectados.

La configuración utilizada se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1: Configuración pruebas reactor.

4.2.1. Test 10/07/2024

Tabla 4.1: Tabla de datos experimentales día 1 de pruebas.

Fecha: 10/07/2024	Hora inicio: 12:00	Hora término: 16:00
Temperatura ambiental	11°C	12°C
Velocidad de rotación	0 RPM	
Inclinación reactor	30	
Contenido del reactor (m, v)	100 g Esferas de alúmina y 100 g carbón sub-bituminoso	
Contenido de vapor	3 g/min	
Tiempo operación	5 min carbón y 20 min inyección de vapor	
Masa post operación	99g de carbón sin quemar	
Flujo de gas	3,5 SL/min	

De la tabla 4.1 se desprende los valores del experimento. Es de destacar el bajo tiempo que se tuvo el carbón, lo cual pudo afectar en las concentraciones de hidrógeno obtenidas.

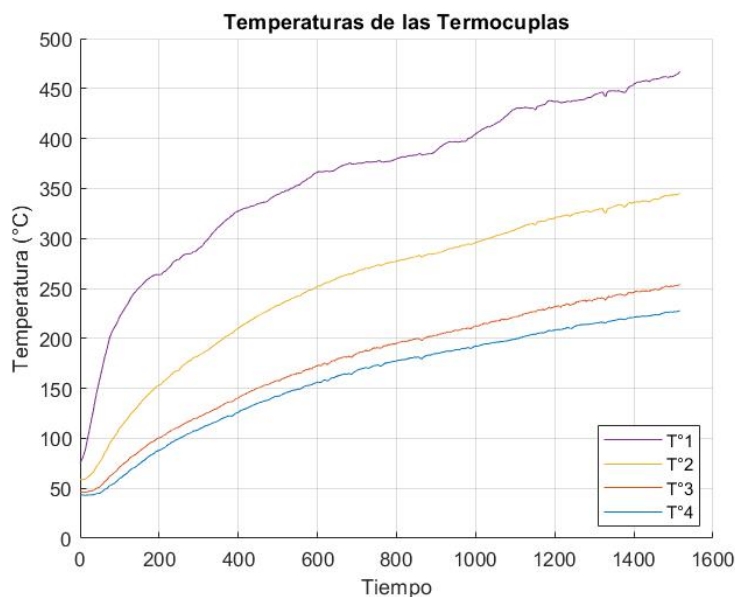


Figura 4.2: Temperaturas en reactor día 1 pruebas; ascendente

Se observa en la gráfica 4.2 el perfil ascendente de temperaturas, alcanzando casi los 500 [°C] en la primera termocupla ubicada cercana a la placa receptora.

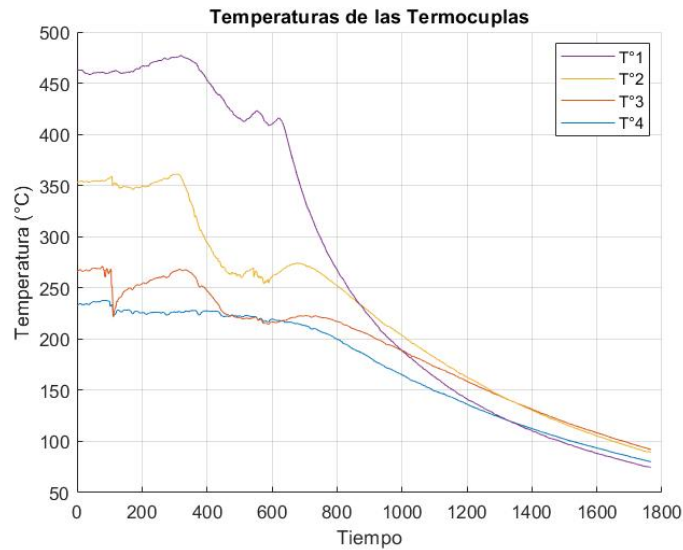


Figura 4.3: Temperaturas en reactor día 1 pruebas; enfriamiento

Se observa en la gráfica 4.3 el cambio de temperaturas provocado por la inyección del vapor. Posteriormente el enfriamiento del reactor.

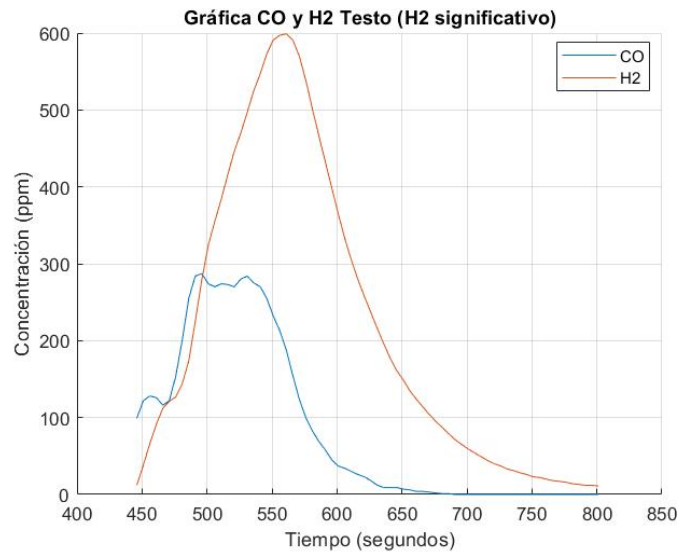


Figura 4.4: ppm de CO y H₂ en función del tiempo el día 1 de pruebas

En la figura 4.4 se observa una relación entre el ppm de CO y H₂ cercana al 1:2 .

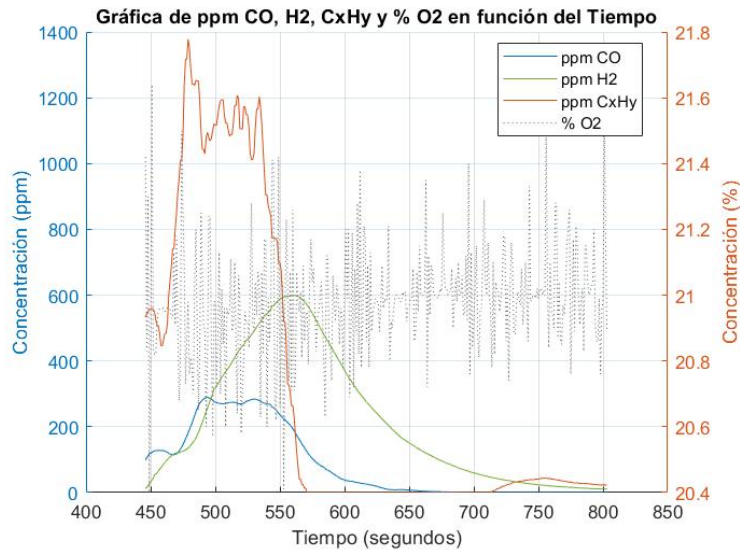


Figura 4.5: ppm de CO, C_xH_y , H_2 y % O_2 ref. y CO_2 máx. en función del tiempo el día 1 de pruebas.

Se desprende de la figura 4.5 la alta concentración de hidrocarburos en los gases medidos.

4.2.2. Test 11/07/2024

Tabla 4.2: Tabla de datos experimentales día 2 de pruebas.

Fecha: 11/07/2024	Hora inicio: 13:00	Hora término: 17:00
Temperatura ambiental	12°C	12°C
Velocidad de rotación	15 RPM	
Inclinación reactor	30	
Contenido del reactor (m, v)	566 g Esferas de alúmina y 100 g carbón subituminoso	
Contenido de vapor	3-2-4 g/min	
Tiempo operación	45 min carbón, 55 min inyección de vapor, 25 min rotación	
Masa post operación	97g de carbón sin quemar	
Flujo de gas	4 SL/min	

De la tabla 4.2 se desprende los valores del experimento. Es de destacar que se aumentó el tiempo teniendo el carbón en el reactor sin vapor, y el tiempo de vapor. Además, esta prueba es con rotación al momento de tener los reactivos dentro.

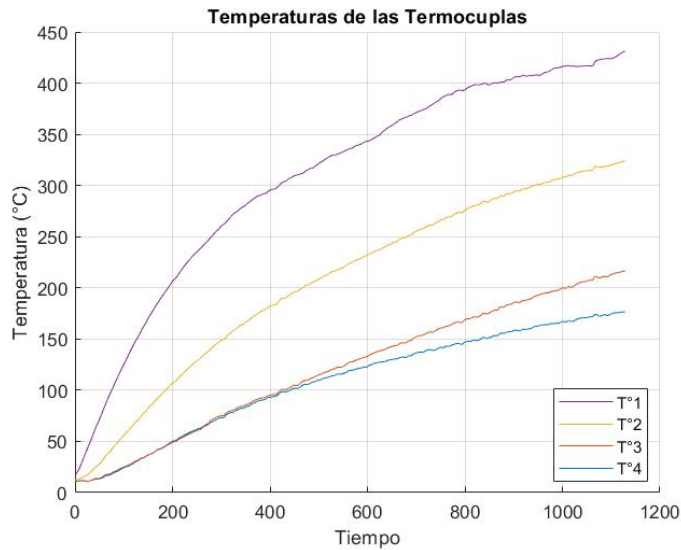


Figura 4.6: Temperaturas en reactor día 2 pruebas.

En la gráfica de la figura 4.6 se desprende el alza de temperatura en el reactor con alúmina dentro, a un mayor flujo de gas, siendo por ende más rápido que el test anterior.

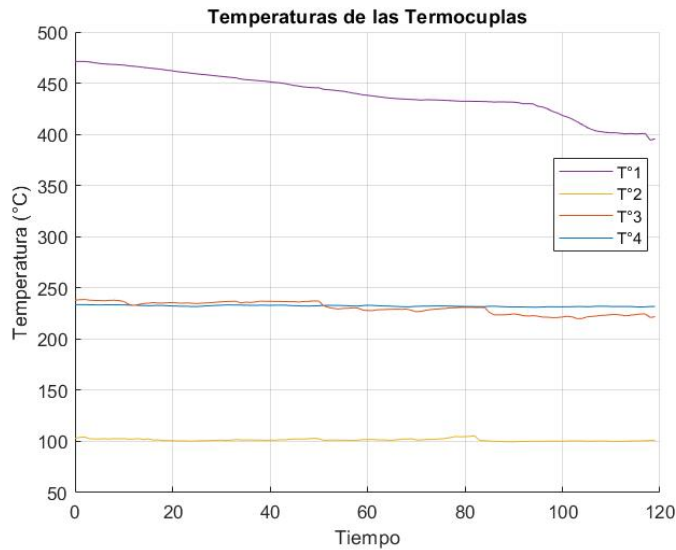


Figura 4.7: Temperaturas en reactor día 2 pruebas.

En la gráfica de la figura 4.7 se observa las temperaturas en el reactor con inyección de vapor, sin rotación dado que se detuvo para tomar temperaturas antes de hacer la rotación y posterior toma de muestras.

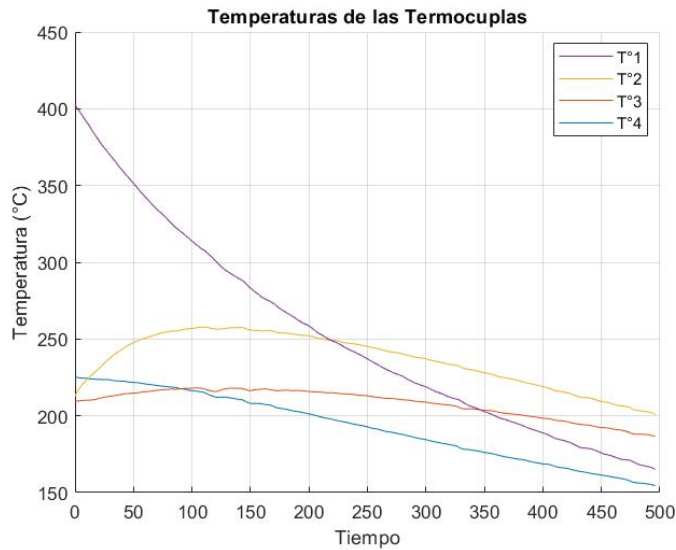


Figura 4.8: Temperaturas en reactor día 2 pruebas.

En la gráfica de la figura 4.8 se observa las temperaturas post finalización de la rotación, gas, inyección de vapor, tomando muestras aún.

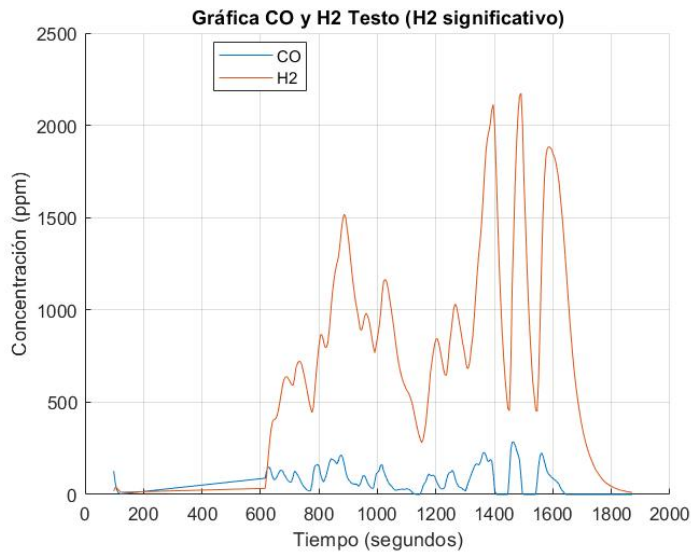


Figura 4.9: ppm de CO y H₂ en función del tiempo el día 2 de pruebas

La proporción de hidrógeno y monóxido de carbono fue mucho más cargada al hidrógeno, como se aprecia en la figura 4.9.

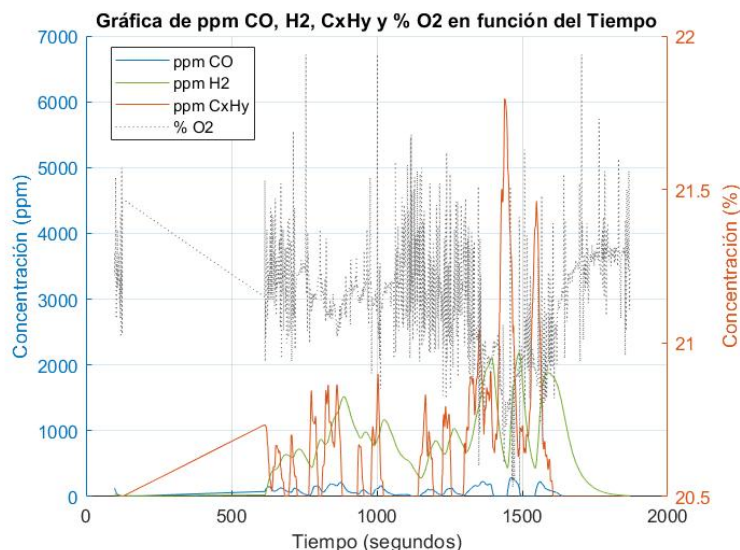


Figura 4.10: ppm de CO, C_xH_y , H₂ y % O₂ ref. y CO₂ máx. en función del tiempo el día 2 de pruebas.

Se aprecia un gran peak de hidrocarburos en el último tramo de las mediciones de la figura 4.10.

4.2.3. Test 12/07/2024

Tabla 4.3: Tabla de datos experimentales día 3 de pruebas.

Fecha: 12/07/2024	Hora inicio: 13:00	Hora término: 17:00
Temperatura ambiental	12°C	12°C
Velocidad de rotación	15-30 RPM	
Inclinación reactor	30	
Contenido del reactor (m, v)	566 g Esferas de alúmina y 100 g carbón subituminoso	
Contenido de vapor	4-3-5-7 g/min	
Tiempo operación	30 min carbón, 35 min inyección de vapor y 73 minutos de rotación	
Masa post operación	- g de carbón sin quemar	
Flujo de gas	5 SL/min	

De la tabla 4.3 se desprende los valores del experimento. Es de destacar que se aumentó el tiempo teniendo el carbón en el reactor sin vapor, y el tiempo de vapor. Además, esta prueba es con rotación al momento de tener los reactivos dentro.

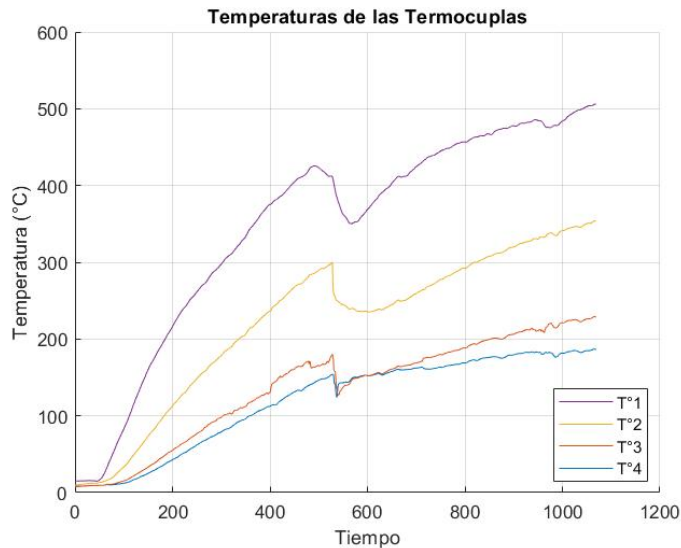


Figura 4.11: Temperaturas en reactor día 3 pruebas.

Se aprecia una disminución de temperaturas en el segundo 500 aproximadamente de la figura 4.11. Esto se debe a que se abrió el reactor para el ingreso de alúminas. El alza de temperaturas fue hasta sobrepasar los 500 [°C] o 773 [K], lo cual resulta muy interesante ya que sobrepasan la cota inferior de las temperaturas idóneas para gasificación.

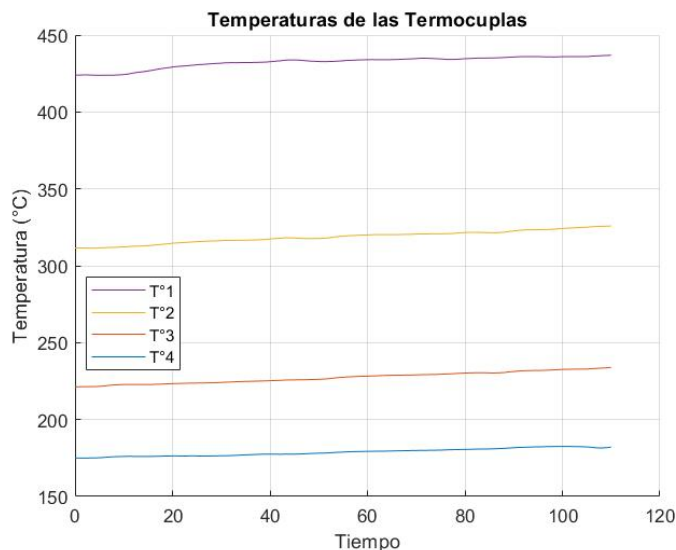


Figura 4.12: Temperaturas en reactor día 3 pruebas.

Se aprecia una breve medición de temperaturas al momento de tener carbón e inyección de vapor sin rotación, tras un periodo de rotación previo, en la figura 4.12. La temperatura en la termocupla más cercana es de alrededor de 430 [°C] o 703 [K].

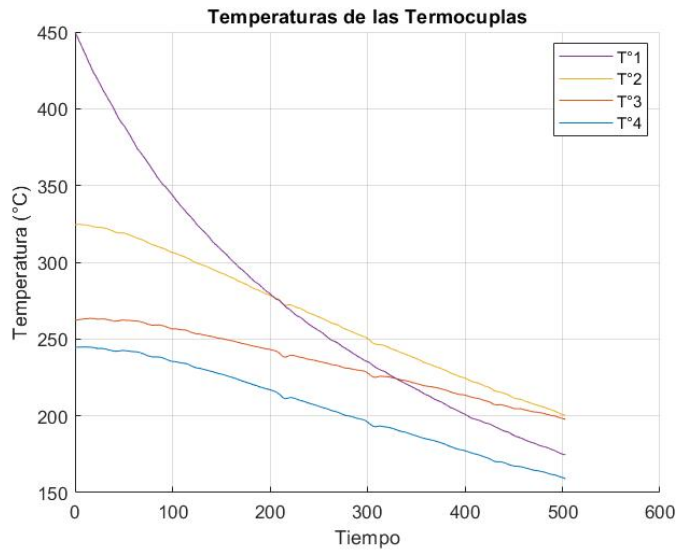


Figura 4.13: Temperaturas en reactor día 3 pruebas.

La gráfica de la figura 4.13 describe las temperaturas luego de detener el flujo de vapor, gas y rotación. Se sigue midiendo un periodo de tiempo y luego se deja enfriar el reactor.

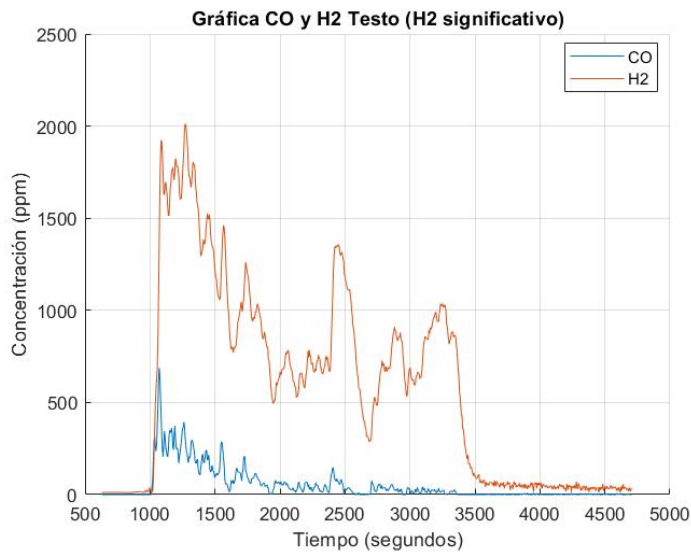


Figura 4.14: ppm de CO y H₂ en función del tiempo el día 3 de pruebas.

Se aprecia un alza considerable de hidrógeno en comparación al monóxido de carbono respecto de la primera prueba en la figura 4.14, y una disminución de monóxido de carbono a medida que pasa el tiempo de toma de muestras.

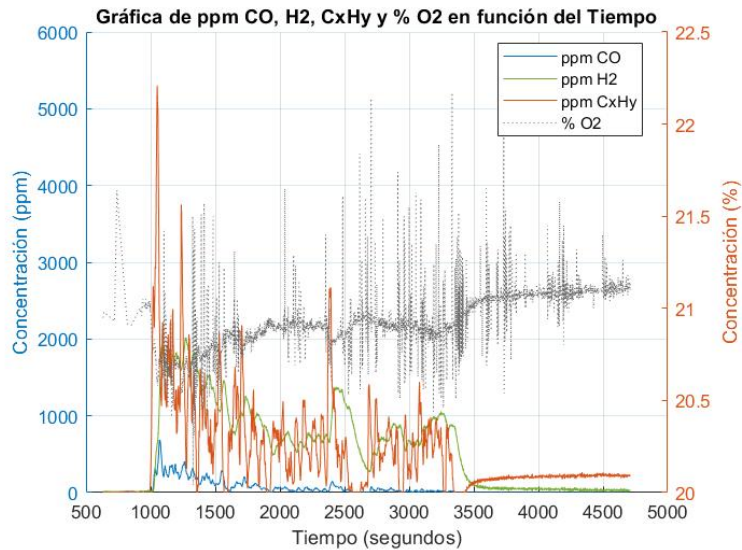


Figura 4.15: ppm de CO, C_xH_y , H_2 y % O_2 ref. y CO_2 máx. en función del tiempo el día 3 de pruebas.

En la gráfica de ppm medidos por el analizador de gases 4.15 los hidrocarburos están presentes en la prueba 3. Sin embargo, las ppm son más cercanas a las de hidrógeno, teniendo un gran peak al principio de la prueba. Esto representa una similitud respecto de la primera prueba.

4.2.3.1. Ratio de CO y H2

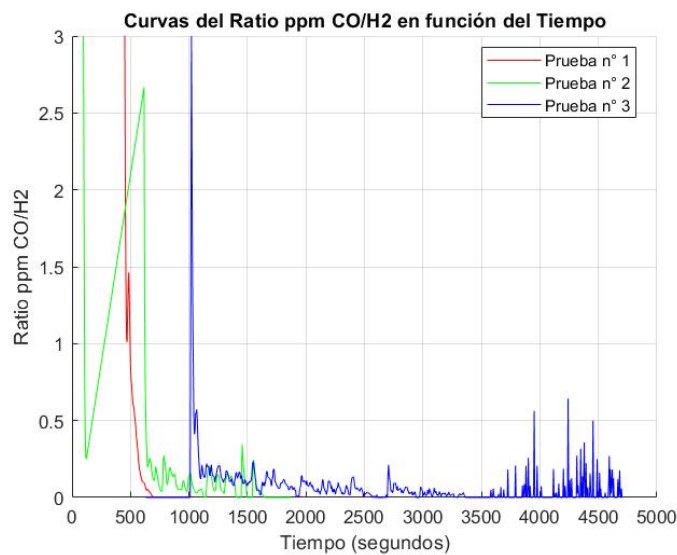


Figura 4.16: Ratio entre las ppm de CO y H_2 en función del tiempo los 3 días de pruebas.

Se observa en la figura 4.16 las curvas que relacionan los valores obtenidos de ppm de monóxido de carbono con los de ppm de hidrógeno. Es importante destacar que hubo peaks por sobre el 3 de ratio, pero gran parte de los valores oscilan entre los 0.0 y 0.5 .

4.2.3.2. Concentración de hidrógeno

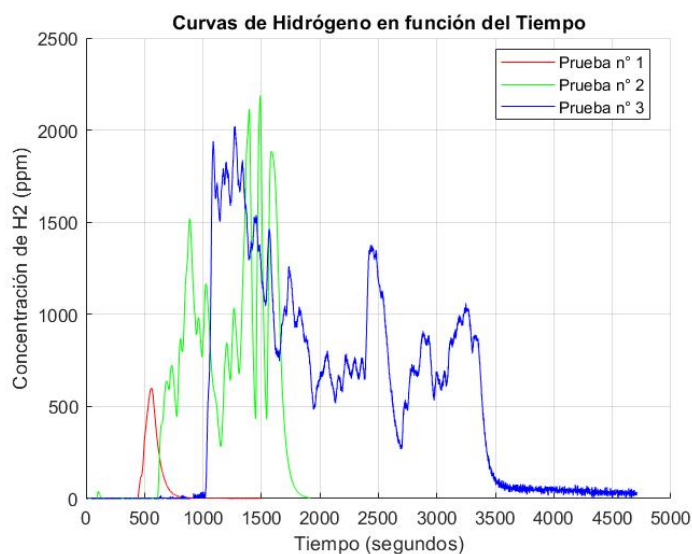


Figura 4.17: ppm de H₂ yen función del tiempo los 3 días de pruebas.

La figura 4.17 permite comparar la concentración de hidrógeno obtenida en cada una de las 3 pruebas en función del tiempo. Se observa que el valor más alto fue registrado en la prueba 2. Sin embargo, los valores más sostenidos se lograron en la prueba 3, puede deberse al tiempo de toma de muestras.

4.2.4. Resumen pruebas

A continuación se muestra la tabla 4.4 que condensa la información de las 3 pruebas realizadas:

Tabla 4.4: Resumen de datos experimentales de los tres días de pruebas.

Parámetro	Día 1 (10/07/2024)	Día 2 (11/07/2024)	Día 3 (12/07/2024)
Horario	12:00 - 16:00	13:00 - 17:00	13:00 - 17:00
Temperatura ambiental (°C)	11 - 12	12 - 12	12 - 12
Velocidad de rotación (RPM)	0	15	15 - 30
Inclinación del reactor (°)	30	30	30
Contenido del reactor	100 g Esferas de alúmina 100 g carbón sub-bituminoso	566 g Esferas de alúmina 100 g carbón sub-bituminoso	566 g Esferas de alúmina 100 g carbón sub-bituminoso
Contenido de vapor (g/min)	3	3 - 2 - 4	4 - 3 - 5 - 7
Tiempo de operación	5 min carbón 20 min inyección de vapor	45 min carbón 55 min inyección de vapor 25 min rotación	30 min carbón 35 min inyección de vapor 73 min rotación
Masa post operación (g)	99 g de carbón sin quemar	97 g de carbón sin quemar	-
Flujo de gas (SL/min)	3.5	4	5

Se muestra en la tabla 4.5 las concentraciones en volúmen de las especies obtenidas en las pruebas previas, mientras que en la tabla 4.6 las concentraciones de las pruebas actuales, específicamente en cuanto a concentraciones de hidrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos.

Tabla 4.5: Concentración de especies en porcentaje para tres pruebas realizadas por trabajos previos [28]

Especie	Día 1 (%)	Día 2 (%)	Día 3 (%)
Hidrógeno (H₂)	0,5	1,02	1,27
Monóxido de carbono (CO)	16,45	11,56	7,75
Hidrocarburos	0,13	0,17	0,13
Ratio H₂/CO	0,03	0,08	0,16

Tabla 4.6: Concentración de especies en porcentaje para los tres días de pruebas.

Especie	Día 1 (%)	Día 2 (%)	Día 3 (%)
Hidrógeno (H₂)	0,0599	0,2188	0,2020
Monóxido de carbono (CO)	0,0204	0,0136	0,0270
Hidrocarburos	0,0301	0,0714	0,0323
Ratio H₂/CO	2,93	16,08	7,48

4.2.5. Otros datos relevantes

- **Irradiación solar:** de 867 a las 12:00 a 678 a las 16:00 con un máximo de 890 a las 13:45 el primer día de pruebas.
- **Velocidad del viento:** de 9 a 11 km/h variando de dirección, el primer día de pruebas.
- **Humedad relativa:** de 84 a 72 % el tercer día de pruebas.
- **Calor aportado por el gas:** El propano comercial tiene un poder calorífico inferior (P.C.I.) de 11.082 [Kcal/Kg] y un poder calorífico superior (P.C.S.) de 12.052 [Kcal/Kg], con una densidad de 0.493 [kg/L]. La conversión de 12.052 [kcal/kg] es equivalente a 50.43 [kJ/kg].

El consumo de propano es de 4 SL/min, lo que, al multiplicarlo por la densidad (0.493 [kg/L]) y el poder calorífico (50.43 [kJ/kg]), resulta en un aporte energético de 99.40 [kJ/min]. Esto se traduce en 1,656.67 [W].

El piranómetro mide 800 [W/m²]. Si el espejo tiene unas dimensiones de 2.06 x 1.6 [m²], y el concentrador tiene un diámetro de 1.5 m, equivalente a 1.76 [m²], se obtiene que al concentrador parabólico llega una energía de 1408 [W] (800 [W/m²] x 1.76 [m²]). Con una eficiencia de transmisión del 90 %, la energía suministrada al foco es de 1267 [W].

Finalmente, **la energía suministrada al foco equivale a un 76 % de la energía suministrada por 4 [SL/min] de propano.**

Capítulo 5

Conclusiones

A través de este trabajo se han evaluado, priorizado y ejecutado mejoras de rediseño del conjunto que abarca al reactor de medios porosos rotatorio y alotérmico, con el fin de reducir las pérdidas de calor, optimizar el uso de radiación y así generar mejores condiciones para la gasificación de combustibles sólidos con aporte solar. En base a los objetivos planteados, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

- Se ha definido el estado del arte de los procesos termo-químicos solares, con especial énfasis en la gasificación solar de biomasa, lo que ha permitido identificar las principales áreas de mejora y las tecnologías emergentes aplicables en el rediseño del reactor.
- El reactor rotatorio de medios porosos ha sido rediseñado para su operación con biomasa, mejorando la estanqueidad del reactor y garantizando la no fuga de gases bajo las condiciones de presión de trabajo establecidas.
- Las mejoras implementadas, como el uso de un nuevo acoplado rotatorio y una nueva placa receptora, han permitido alcanzar temperaturas superiores a 450°C dentro del reactor, cercanas a las temperaturas de gasificación, demostrando un buen potencial térmico del sistema.
- Los experimentos realizados han permitido medir temperaturas y gases producto de la gasificación de carbón, como en pruebas previas, destacando la presencia de hidrógeno y monóxido de carbono en una ratio favorecedor al hidrógeno. Sin embargo, se requieren más pruebas para determinar con mayor precisión la concentración de hidrógeno.
- Se realizan mejoras para futuros trabajos en cuanto a la toma de muestras, instalación de raspberry, aislación del reactor, entre otras.

En el marco del proyecto FONDECYT N°1241030, titulado “Renewable hydrogen production from biomass using a novel allothermal rotary porous media reactor”, el presente trabajo ha logrado cumplir con el objetivo general de rediseñar un reactor rotatorio de medio poroso híbrido, expuesto indirectamente a energía solar concentrada,

para su operación con biomasa. Los objetivos específicos han sido abordados exitosamente, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y optimizaciones del reactor.

5.1. Recomendaciones para futuros trabajos

En esta sección se presenta las mejoras a considerar para futuros trabajos, de modo que la configuración realizada para el experimento sea la óptima y se recopile información de manera adecuada.

- **Evitar excentricidad acople vapor gases**
- **Evitar golpes a Hat:** el hat montado en la raspberry queda sobresaliendo excesivamente, por lo cual roza al rotar.
- **Cambiar llave de paso gases**
- **Cambiar fuente de energía raspberry:** la powerbank tuvo problemas por la temperatura. También se resuelve mejorando la aislación radial del reactor.
- **Repuestos para empaquetadura placa receptora del reactor**
- **Probar disco de cuarzo:** se debe realizar pruebas experimentales usando la placa de cuarzo y energía solar.
- **Mejorar aislación del reactor:** esto permitiría alcanzar altas temperaturas sin dañar componentes ubicados en superficie del reactor.
- **Mejorar vaciado de material dentro del reactor y retirado de aluminas/-restos**
- **Termocupla y manómetro en salida de gases:** la salida de gases es crítica, dado que es el producto que se espera obtener, por lo cual medir presión y temperatura puede aportar información valiosa.
- **Base para raspberry:** se debe implementar una nueva base para la raspberry, dado que la que estaba se derritió en la parte de los pernos.
- **Realizar una mayor cantidad de ensayos** para todas las condiciones posibles con el fin de determinar la configuración óptima y disminuir el error.
- **Evaluar y comparar el comportamiento del reactor y la producción de gas de síntesis de la gasificación de otros combustibles sólidos,** como lo puede ser la biomasa.
- **Realizar ensayos para mezclas de carbón y biomasa** y así gasificar ambos combustibles de manera simultánea.
- Las condiciones ambientales adicionales, como la velocidad del viento y la humedad relativa, pueden haber influido en los resultados, sugiriendo la necesidad de considerar estos factores en futuros estudios.

A través de este trabajo se han evaluado, priorizado y ejecutado mejoras de rediseño del conjunto que abarca al reactor de medios porosos rotatorio y alotérmico, con el fin de reducir las pérdidas de calor, optimizar el uso de radiación y así generar mejores condiciones para la gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

Entre las principales dificultades enfrentadas se encuentran la reducida radiación solar por la fecha de realización de la puesta en marcha, teniendo que acudir a una fuente alternativa para las pruebas experimentales, como fue el uso de gas.

Las condiciones óptimas de gasificación en cuanto a proporciones de carbón, alúminas y vapor no han sido determinadas para este reactor. Sin embargo, dado el enfoque en el rediseño de este trabajo, no es el objetivo. Se espera generar las mejores condiciones para que en futuros trabajos se puedan realizar pruebas que permitan determinar esos valores.

- Se ha demostrado que el reactor rotatorio de medios porosos es estanco, garantizando así la no fuga de gases bajo las condiciones de presión de trabajo establecidas. Esto se logró mediante el uso adecuado de teflón en las zonas con rosca y en la empaquetadura de la placa receptora.
- Los resultados experimentales muestran que es posible alcanzar temperaturas superiores a 450°C dentro del reactor, incluso sin la presencia de un medio que retenga el calor como las alúminas o un reactivo como el carbón, lo que indica un buen potencial térmico del sistema.
- La configuración del sistema de extracción de gases y el uso de un analizador de gases Testo han permitido obtener datos precisos sobre la composición de los gases producidos, destacando la presencia de hidrógeno y monóxido de carbono.
- Las pruebas de gasificación realizadas revelaron una cantidad máxima similar en concentración de ppm en la producción de hidrógeno respecto a pruebas de trabajos en el diseño previo. Esto no es concluyente respecto de la efectividad de las mejoras implementadas en el diseño del reactor y en el manejo de gases, ya que se requieren más pruebas de gasificación, además de una cromatografía de gases que permita determinar con más precisión el hidrógeno medido.
- Las condiciones ambientales adicionales a la irradiación solar y la temperatura ambiental, tales como lo son la velocidad del viento y la humedad relativa, pueden haber influido en los resultados obtenidos, lo que sugiere la necesidad de considerar estos factores en futuros estudios para optimizar el rendimiento del reactor.
-

Anexos

Anexo A. Guía de operación general del experimento

1. Verificación general:

- Para realizar el experimento es necesario contar con un mínimo de dos personas para una operación adecuada, continua y segura. Ambos deben contar con Equipo de Protección Personal (EPP), protector solar y tener precaución con respecto al uso de los equipos, comprendiendo el riesgo en los mecanismos de rotación, altas temperaturas y radiación solar.
- Es de suma importancia la inspección visual de los elementos operativos, donde se recomienda tener especial atención en límites de carrera electrónicos y elementos mecánicos de transmisión como cadenas y piñones.
- Tras periodos de tiempo sin utilizar los equipos del experimento, se sugiere realizar mantención general de estos.

2. Preparación del reactor:

- Antes de preparar el reactor debe estar definido el experimento a desarrollar (tiempo de operación, velocidad de rotación, inclinación, volumen de material carbonoso/alúmina, flujo de vapor).
- Previo a la prueba, se debe energizar las baterías en caso de realizar pruebas con rotación, en caso de realizar una prueba estática se puede energizar directamente la Raspberry Pi.
- Además se debe contar con los elementos de suministro eléctrico como extensiones, cables y adaptadores.
- Antes de iniciar el registro de temperaturas se debe cargar y sellar adecuadamente el reactor, para esto se recomienda utilizar teflón sobre el hilo para el sellado.
- Finalmente se debe conectar el router de internet en una ubicación cercana a la Raspberry Pi e iniciar el computador en la sala de control con VNC Viewer.
- Una vez con los elementos energizados, conectados y el reactor correctamente sellado, se encuentra preparado para operar.

3. Configuración del helióstato:

- Se debe energizar la fuente de poder y encender la placa mediante el botón ENA (se enciende led azul).
- Luego se recomienda conectar al teléfono mediante la aplicación ('controlador remoto' para android), una vez el helióstato verifica los límites de carrera se ingresa la fecha y hora.
- Para montar el espejo se recomienda posicionar el helióstato en una posición centrada para realizar el montaje del espejo.
- Entre 2 o más personas se debe montar y asegurar las fijaciones del marco del espejo.
- En este momento el helióstato se encuentra listo para operar pero solamente se debe apuntar al concentrador cuando se encuentren todos los demás elementos montados para operar.
- En este momento se debe tener especial atención del reflejo de la luz solar, se debe tener en consideración que en todo momento se debe tener un operador del helióstato asegurando su posición adecuada y preparado para cambiar la dirección de este por cualquier evento imprevisto.

4. Caldera:

- La caldera se ubica sobre la estructura de acero a un costado del reactor.
- Se debe conectar el *piping* al reactor y asegurar la estanquidad de la línea con el uso de llaves.
- Posteriormente se debe conectar la línea de alimentación al tanque con agua blanda.
- Se sugiere leer el manual de operación del equipo de caldera, esto con el fin de comprender y hacer uso correcto de la misma.

5. Adquisición de datos:

- El registro de datos principalmente se centra en el uso del manejo del *datalogger*, donde se hace uso del registro de datos en la Raspberry Pi.
- En este software se debe seleccionar el tipo de termocuplas (S, S, K, K) y verificar parámetros de cantidad de datos registrados y visibles en la gráfica en tiempo real.
- Una vez realizado este proceso se debe guardar el archivo con su nombre y se comienza el registro de los datos.
- Por otra parte se cuenta con un piranómetro para registrar la irradiación en el helióstato.
- La placa de este piranómetro se ajusta al marco del espejo del helióstato y los valores son entregados en W/m^2 , el piranómetro no cuenta con sistema de registro de datos autónomo.

6. Extracción de la muestra:

- El procedimiento de extracción de la muestra gaseosa se realiza a un costado de la caldera, donde con un estanque con agua se introduce el segundo estanque invertido que tiene la válvula en la parte superior.
- El primer tanque se debe llenar de agua con la válvula abierta para eliminar el aire dentro del mismo.
- Una vez realizado este procedimiento, se procede a cerrar la válvula y se levanta sobre el nivel del agua, por la parte inferior se introduce la manguera de color naranja que lleva los gases del reactor hasta el estanque invertido.
- Cuando se busca extraer la muestra se abre la válvula del reactor, con lo cual la muestra gaseosa comienza a burbujear, los gases extraídos se encuentran en el estanque invertido que permite conectar una bolsa Tedlar en la salida de la válvula.
- Finalmente se abre la válvula y se baja el estanque invertido hasta el nivel del agua.

7. Elementos de protección personal:

- De manera general se debe utilizar bloqueador solar, gafas de seguridad oscuras, zapatos de seguridad y Jockey Legionario.
- Para algunas operaciones es necesario contar con guantes preparados para superficies a alta temperatura.
- Si es necesario mirar el foco del concentrador se debe utilizar lentes para oxicorte o máscara de soldar, debido a la gran cantidad de luminosidad de la radiación concentrada.
- En toda experimentación se debe tener un extintor cerca y todos deben estar en conocimiento de la ubicación.

Anexo B. Procedimiento Testeo termocuplas tipo K

Para realizar esta tarea se utilizó el termómetro digital que se observa en la figura B.1.



Figura B.1: Termómetro digital DT-8891A (fuente: propia)

Especificaciones termómetro digital: [36]

- Grado de precisión: $(0,15 \% + 1 \text{ } ^\circ\text{C})$
- Apto para termocuplas tipo K
- Resolución $0.1^\circ\text{C}/0.1^\circ\text{F}/0.1^\circ\text{K}$

Se conectó los termopares al aparato, midiendo este tanto la temperatura ambiental, como llegando a medir la temperatura de un mechero ($800[^\circ\text{C}]$ tras unos pocos segundos de contacto).

Anexo C. Procedimiento de instalación de concentrador parabólico nuevo

Para comenzar, se plantea que la estructura octagonal sobre la cual es montado el antiguo no resulta de utilidad, dadas las diferentes dimensiones y geometría de ambos concentradores. Se utilizará por otra parte el marco sobre el cual está montada la estructura octagonal. Lo anterior se visualiza en la figura C.1.



Figura C.1: Estructura concentrador antiguo (fuente: propia)

Teniendo en cuenta el uso del marco azul, se observa que posee agujeros de 1 [mm] donde va puesta la estructura octagonal. Esta es retirada, para ser reemplazada por otra estructura que soporte el nuevo colector.

Para fabricar la nueva estructura, se utilizan:

- **Estructura disco:** esta estructura es propia del concentrador nuevo, por lo cual se utilizará para su montaje.
- **Perfil tipo C:** se utiliza un perfil tipo C de acero, con el fin de anclar la estructura propia del concertador al marco azul. Sus dimensiones son de 50X25X2 [mm].
- **Pernos:** se adquiere pernos de 1/4[in], con el fin de unir el perfil tipo C con la estructura del disco. Por otra parte, se reutiliza dos pernos de M10 que permiten unir el perfil tipo C a la estructura azul.

Se realiza un trabajo en taller con el fin de adecuar los materiales. Esto se visualiza en las figuras C.2 y C.3.



Figura C.2: Trabajo en cortadora



Figura C.3: Trabajo en taladro

Posteriormente, se realiza el montaje de la estructura soporte, reutilizando el marco existente para el concentrador antiguo en el concentrador nuevo, lo cual se puede apreciar en la figura C.4.



Figura C.4: Montaje de estructura soporte concentrador.

Finalmente, se realiza el montaje del concentrador parabólico en la estructura diseñada para este, como se visualiza en la figura C.5 y C.6 por la parte posterior en la figura , donde además se añade el uso de una amarra de carga, dado que se encontraba disponible por ser usada para el concentrador previo, y aportando soporte estructural al concentrador nuevo.



Figura C.5: Concentrador montado visto frontalmente por su parte reflectante.



Figura C.6: Concentrador montado visto por la parte posterior.

Para finalizar, se observa en la figura C.7 el uso de una estructura cobertora de la zona reflectante del concentrador, de modo que se evite daños por condiciones ambientales o algún elemento extraño que pueda dañarla, evitando que esto perjudique su capacidad de reflectividad.



Figura C.7: Concentrador nuevo montado y tapado para su cuidado.

Anexo D. Análisis de trabajo seguro y listado de chequeo para operación

Para asegurar la seguridad durante la operación del reactor rotatorio de medios porosos, se deben seguir las siguientes medidas:

1. **Uso de guantes térmicos:** Es fundamental utilizar guantes resistentes al calor al abrir el reactor para evitar quemaduras.
2. **Protección ocular:** Utilice gafas antirradiación o una máscara de soldador para protegerse de la radiación al encontrar el foco de energía solar.
3. **Cuidado en la plataforma:** Al subir al heliostato, tenga cuidado con la estabilidad de la plataforma para prevenir caídas.
4. **Manejo de gases:** Maneje con cuidado los gases generados durante el proceso, asegurándose de trabajar en un área bien ventilada y utilizar equipo adecuado de protección personal.
5. **Manipulación del aislante:** Al manipular el aislante de lana de vidrio, utilice guantes y una mascarilla para evitar el contacto directo y la inhalación de fibras.
6. **Verificación de componentes sobresalientes:** Antes de la operación, chequee que no haya elementos sobresalientes que puedan interferir con la rotación del reactor.
7. **Supervisión de la fuente de energía:** Verifique que la fuente de energía, como la Raspberry Pi, no presente signos de sobrecalentamiento para evitar fallos en el sistema.

Siguiendo estas medidas de seguridad, se minimizarán los riesgos asociados a la operación del reactor y se garantizará un ambiente de trabajo seguro.

Anexo E. Pruebas cámara termográfica Testo sobre acoplado rotatorio antiguo

Se añade en anexo pruebas realizadas con la cámara termográfica Testo 868 en el trabajo de Mena [28], la cual muestra en las imágenes un foco no tan concentrado, perdiéndose calor en el acoplado rotatorio.



Informe Testo 868

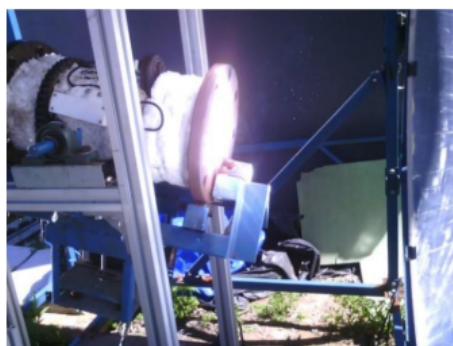
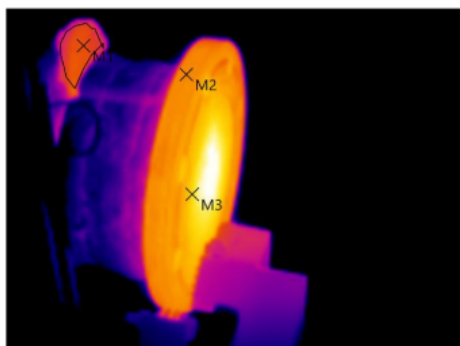
Archivo: IR000012.BMT

Fecha: 27-09-2023

Tipo de objetivo: 31° x 23°

Nº serie objetivo:

Hora: 14:01:03



Parámetros de la imagen:

Grado de emisividad: 0,79
Temp. refl. [°C]: 200,0

Marcas de imagen:

Objetos de medición	Temp. [°C]	Emis.	Temp. refl. [°C]	Comentarios
Punto de medición 1	177,5	0,79	200,0	-
Punto de medición 2	220,3	0,79	200,0	-
Punto de medición 3	284,2	0,79	200,0	-
Area promedio 1	168,6	0,79	200,0	-

Figura E.1: Imagen generada por cámara termográfica Testo 868 [28]

Anexo F. Planos de piezas y conjuntos

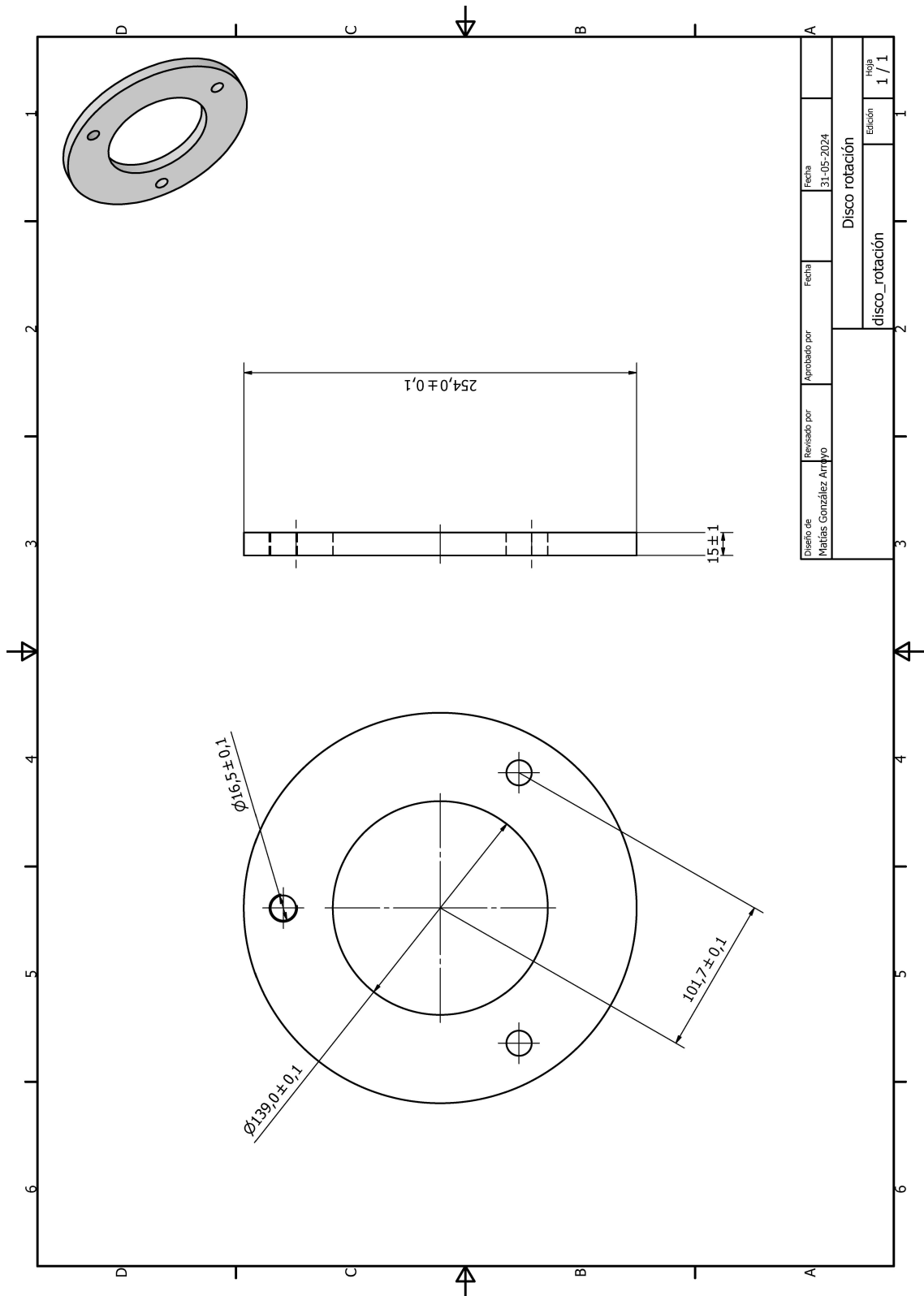


Figura F.1: Plano de nuevo acoplado rotatorio.

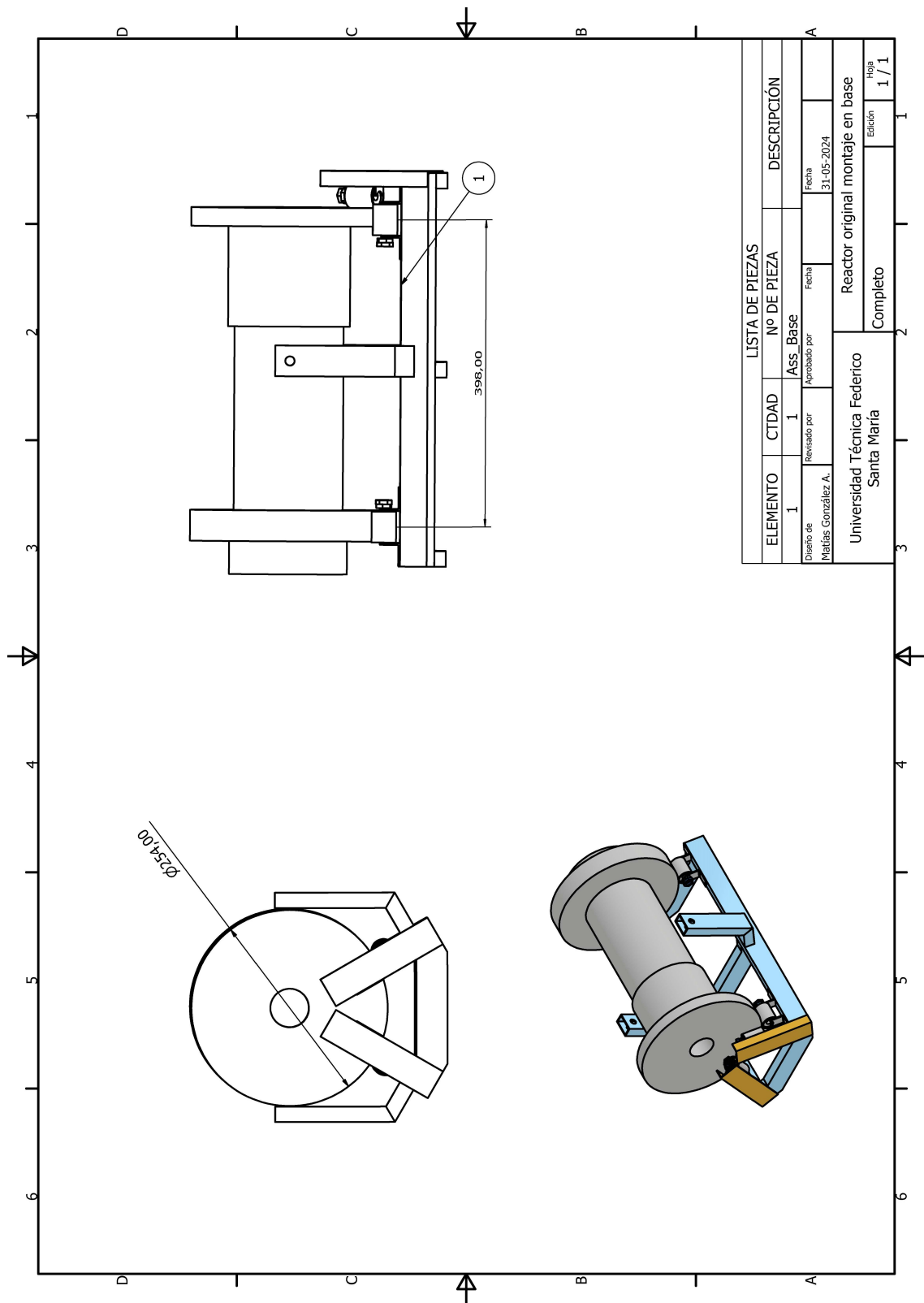


Figura F.2: Plano del diseño original del reactor montado en base de rodamientos.

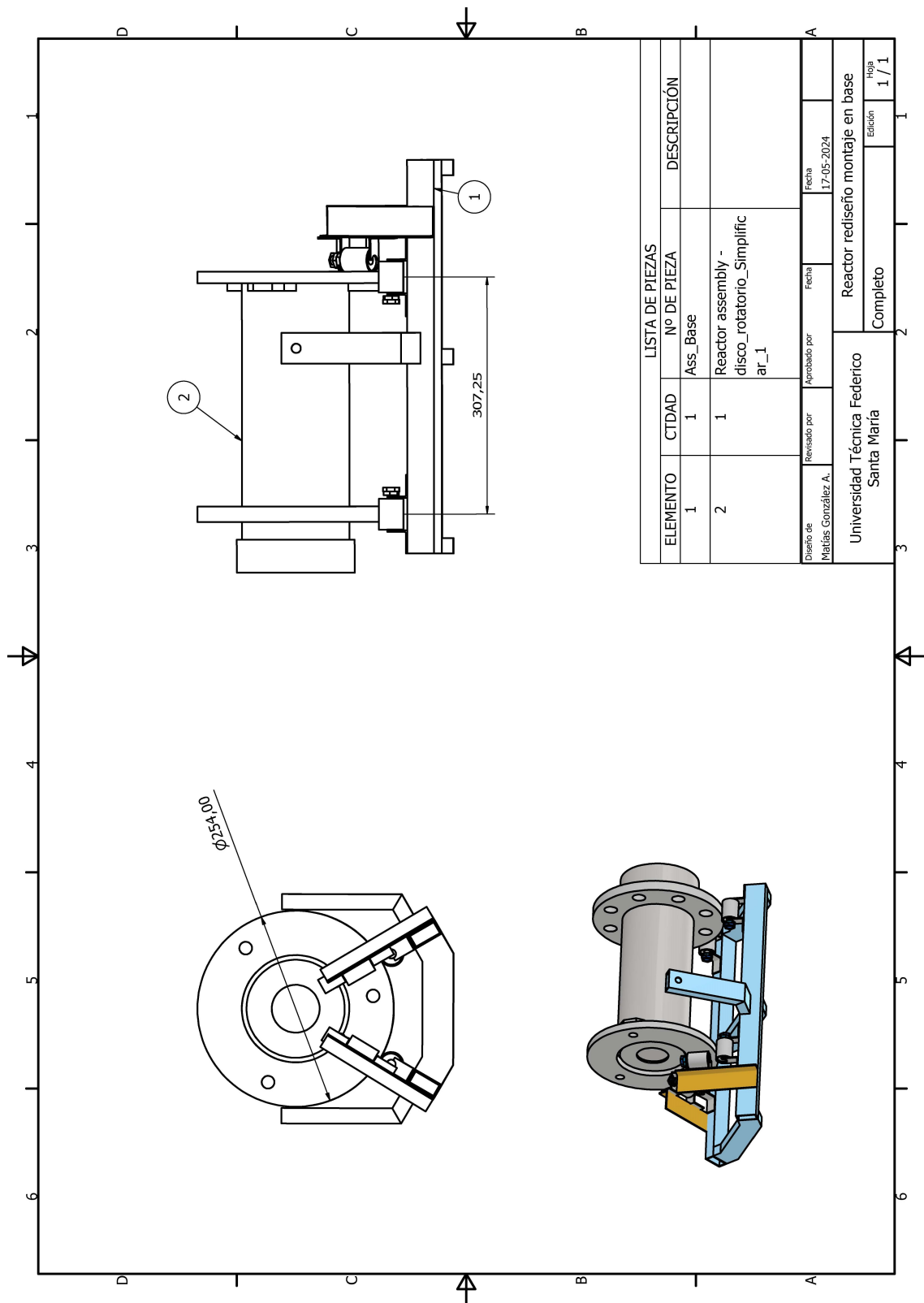


Figura F.3: Plano del rediseño de reactor montado en base de rodamientos.

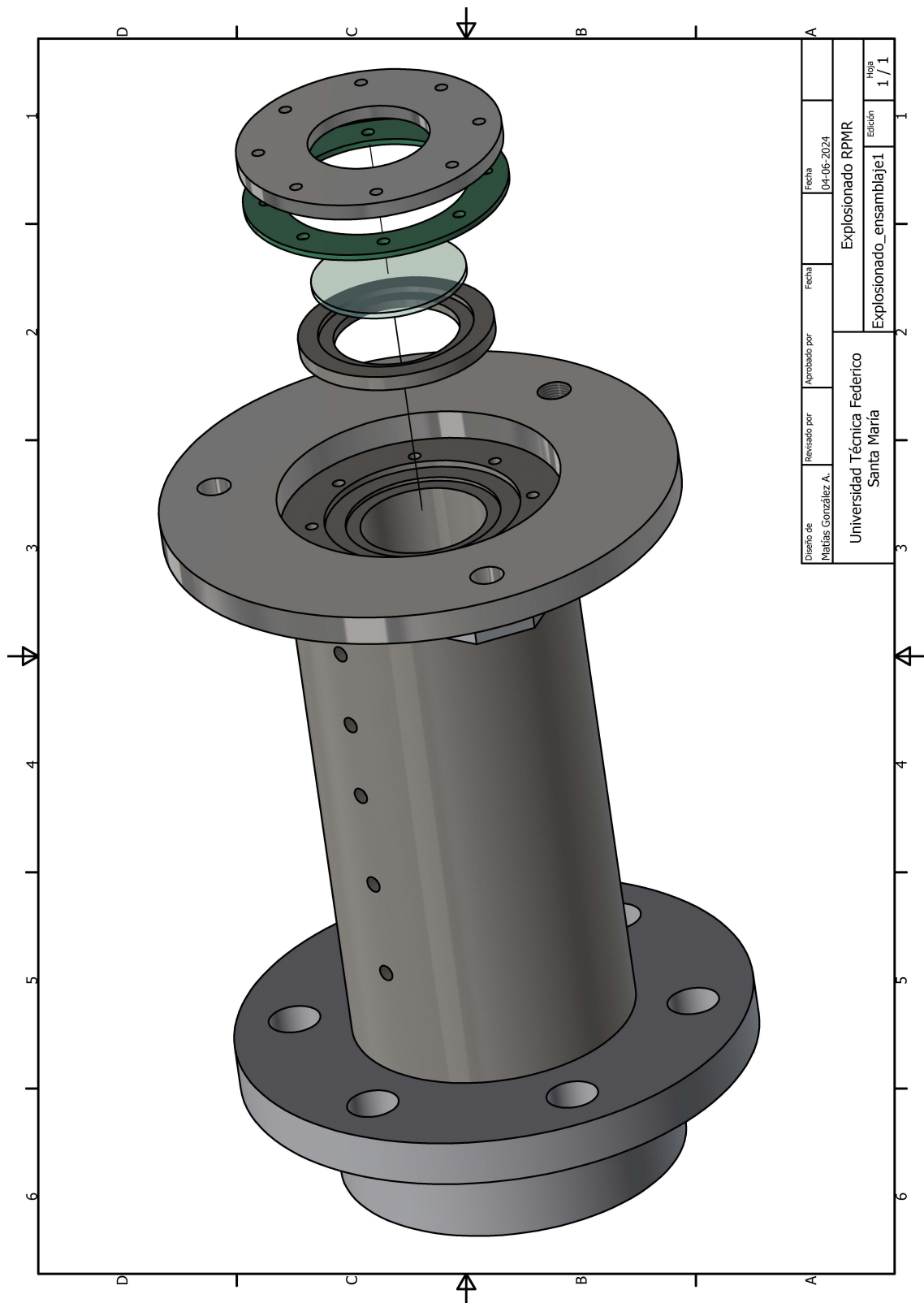


Figura F.4: Plano de explosionado de la zona donde va la placa receptora.

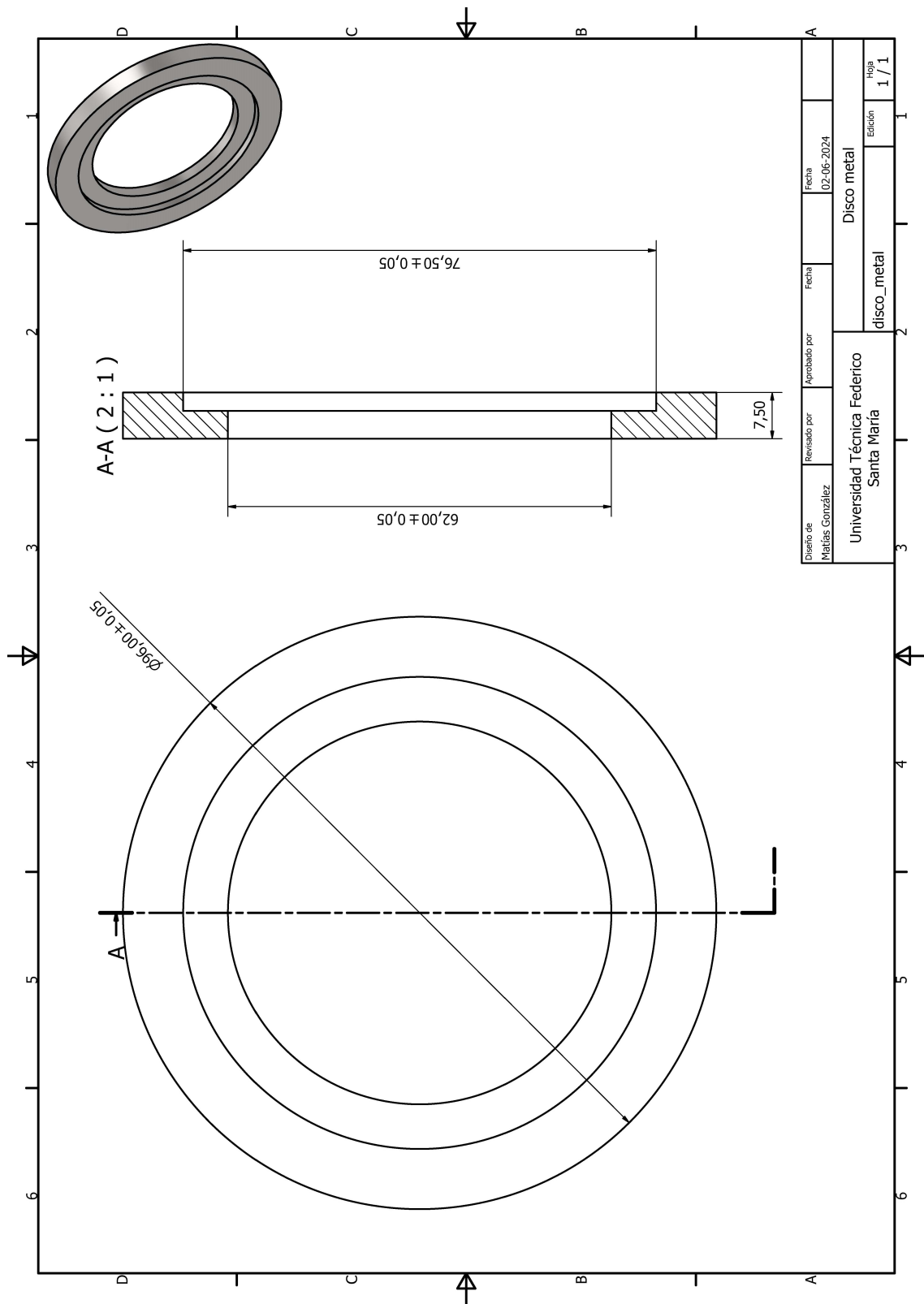


Figura F.5: Plano disco de metal para ubicar placa receptora.

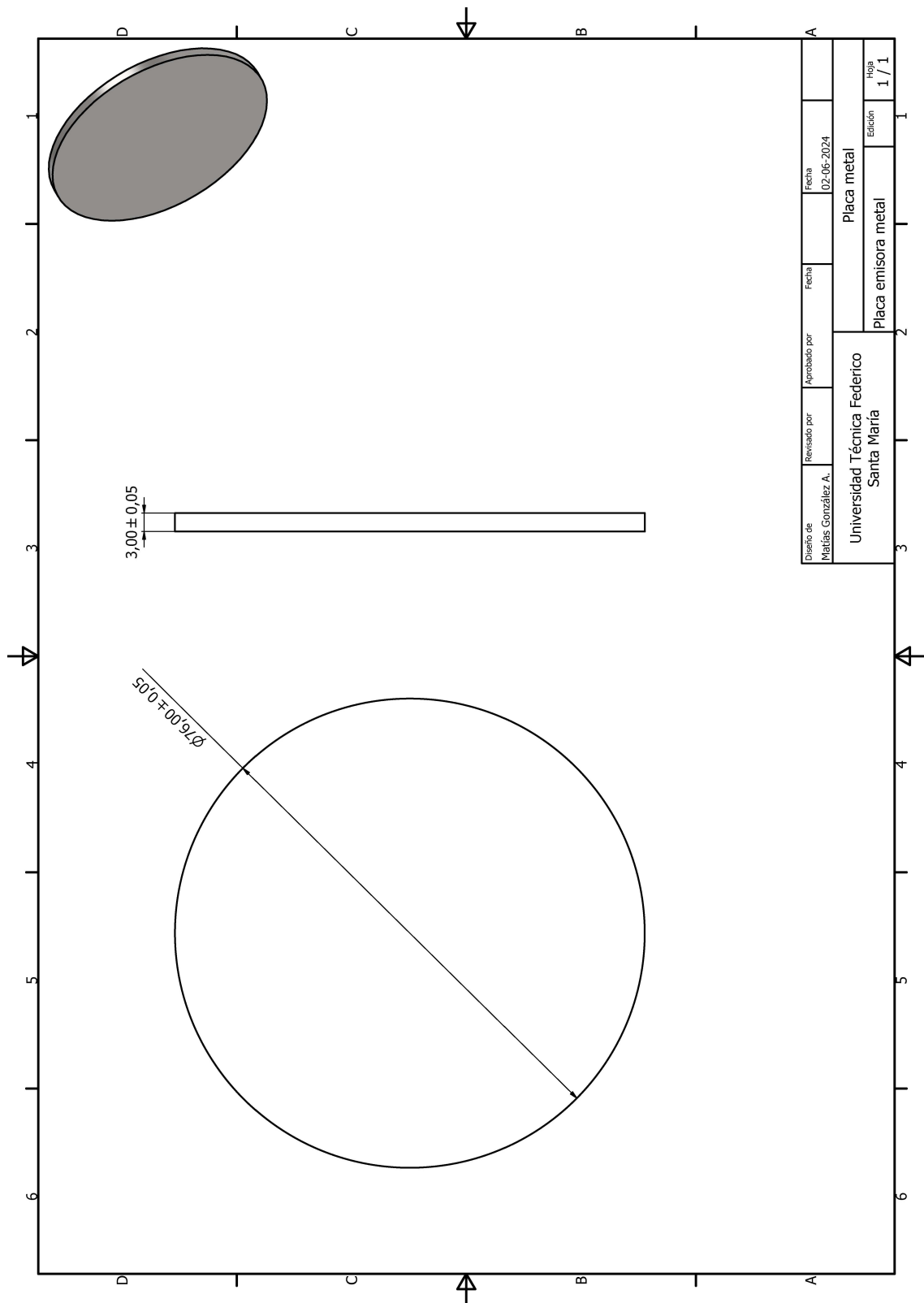


Figura F.6: Plano de placa receptora de metal.

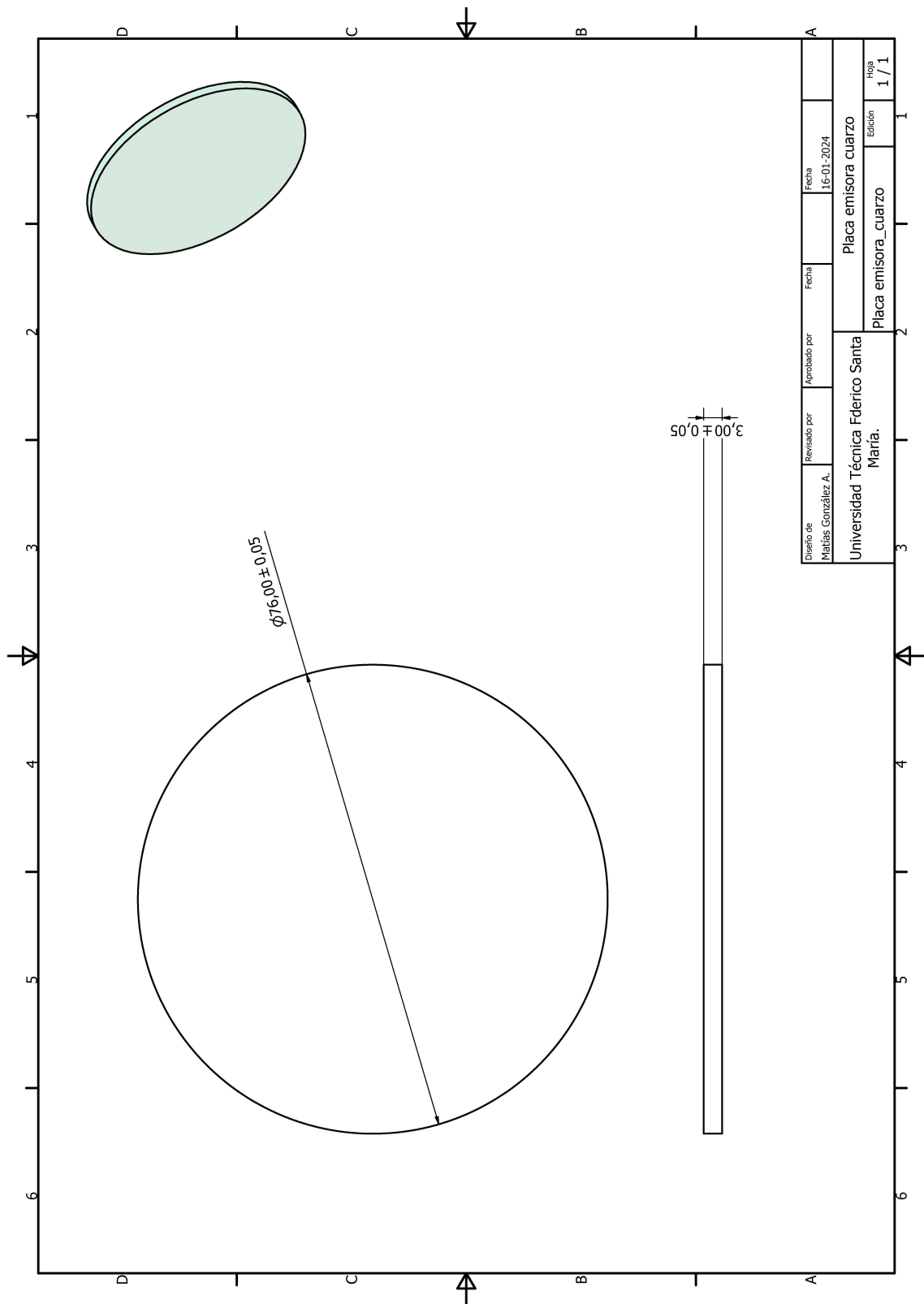


Figura F.7: Plano de placa receptora de cuarzo fabricada por Soviquim.

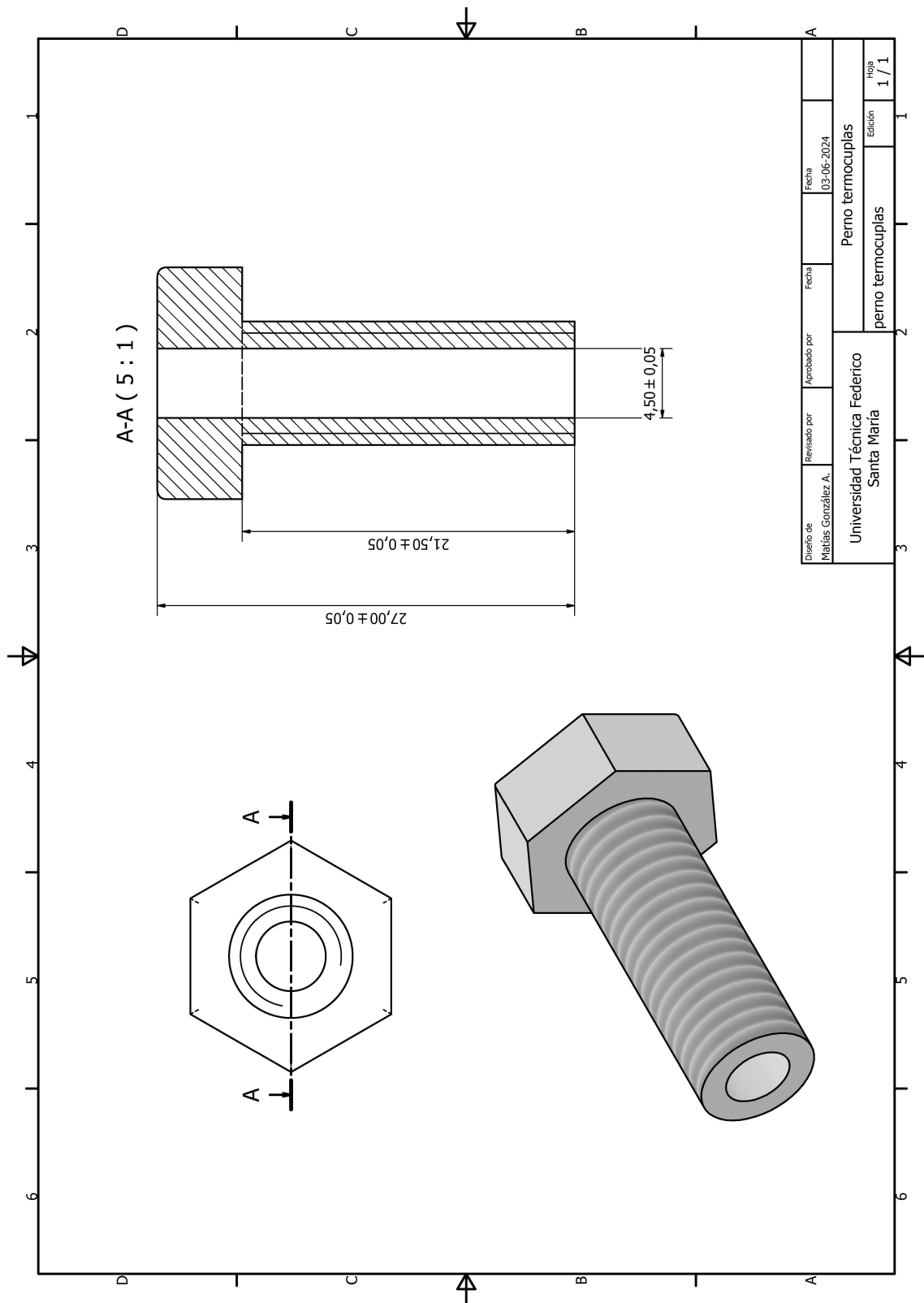


Figura F.8: Plano de perno donde van ubicadas las termocuplas.

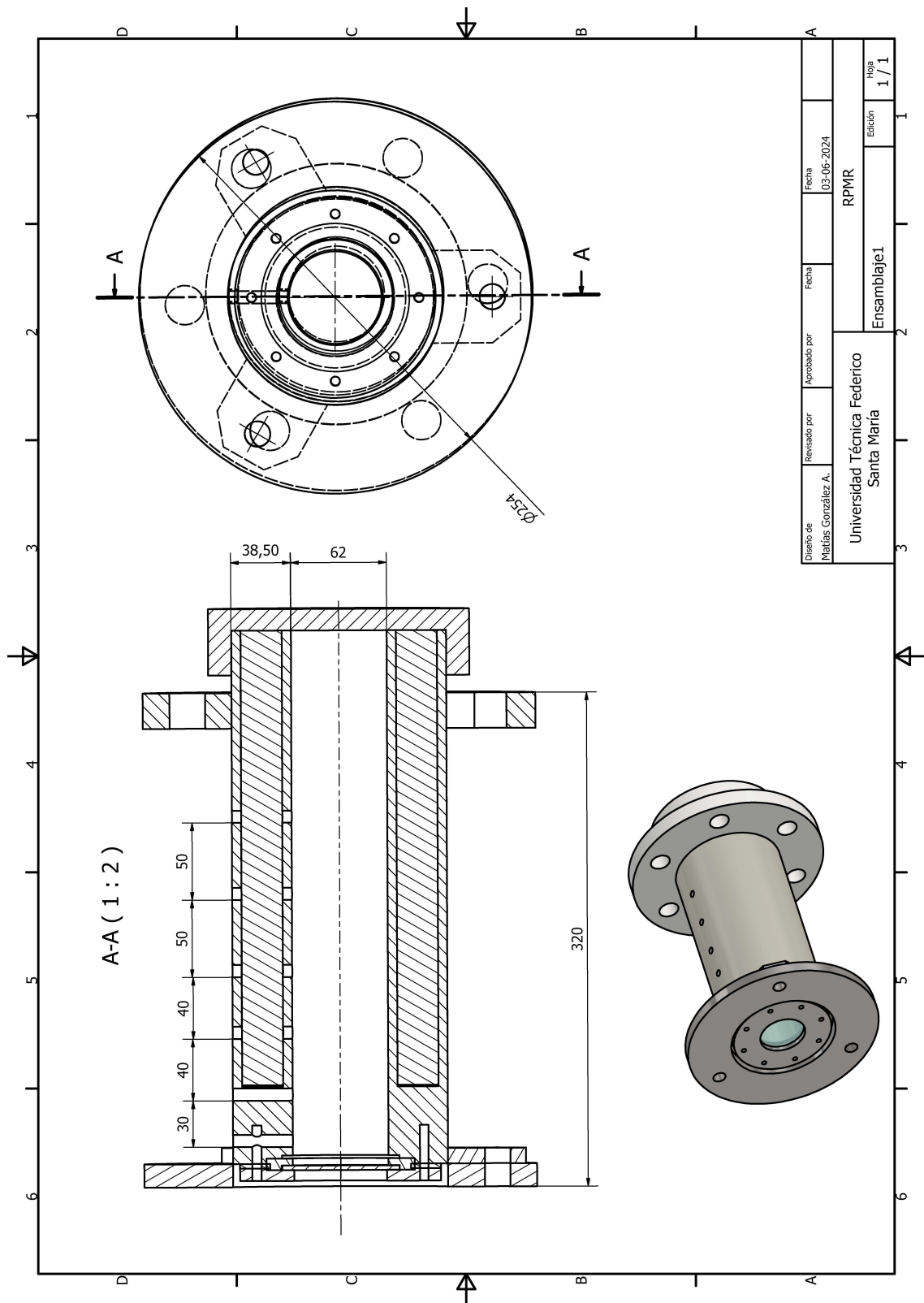


Figura F.9: Plano Rotary porous media reactor RPMR post rediseño.

Anexo G. Facturas de elementos fabricados y procesos de mecanizado



MAESTRANZA HETOL LIMITADA
 RUT 76.997.797 - K
 EMPRESA SERVICIOS DE INGENIERIA
 ARTURO PRAT 156 - FONO 32 2214416
 E-mail - maestranzahetol@gmail.com

PRESUPUESTO

N° 1922

Valparaiso, 15 de ENERO del 2024

Señor (es): MATIAS GONZALEZ ARAYA

Direccion: _____
 Rut: 20.026.879-2 Ciudad VALPARAISO

N° Pedido	ESPECIFICACIONES	CANT	V UNIT	VALOR TOTAL
	CONFECCION DE FLANGE DIAM. 254 TERMINACION (14,5 a 15MM) COND VENTA ORDEN DE COMPRA 50% AL INICIO TRABAJO 50% CONTRA ENTREGA DE TRABAJO VALOR + IVA	1	67.830	67.830

p.p. NELSON TOLEDO M

Figura G.1: Presupuesto acoplado rotatorio.

MAESTRANZA HETOL LIMITADA

Giro: EMPRESA DE SERVICIOS DE INGENIERIA
Y ACTIVIDADES CONEXAS DE CONSULTORI
E LILLO 239 245- VALPARAISO
eMail : MAESTRANZAHETOL@GMAIL.COM

Telefono :

TIPO DE VENTA: DEL GIRO

R.U.T.:76.997.797- K

FACTURA ELECTRONICA

Nº3316

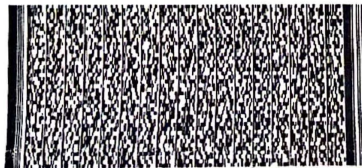
S.I.I. - VALPARAISO

Fecha Emision: 25 de Enero del 2024

SEÑOR(ES): ANDRES IGNACIO ARRIAGADA ROMERO
R.U.T.: 18.584.039- 5
GIRO: OTRAS ACTIVIDADES DE SERVICIOS PERSONALE
DIRECCION: AUSTRAL 4824 11 21 GOMEZ CARRENO
COMUNA VINA DEL MAR CIUDAD: VINA DEL MAR
CONTACTO:
TIPO DE COMPRA: DEL GIRO

Codigo	Descripcion	Cantidad	Preco	%Impto Adic.	%Desc.	Valor
-	SERVICIOS GASTOS OPERACIONALES BECA DOCTORADO ANID NACIONAL N° FOLIO 21211230 CONF FLANGE S/PLANO EN AC. CARBONO	1	67.830			67.830

Forma de Pago:Contado



Timbre Electrónico SII

Res.99 de 2014 Verifique documento: www.sii.cl

MONTO NETO	\$	67.830
I.V.A. 19%	\$	12.888
IMPUESTO ADICIONAL	\$	0
TOTAL	\$	80.718

Figura G.2: Factura acoplado rotatorio.



IMPORTADORA SOVIQUIM LIMITADA

Importadora de Equipos y Artículos Científicos, Soplado de Vidrio para Laboratorio, Fabricación
Miguel de Atero 2546 - Quinta Normal - Santiago

Teléfono: 56 2 2773 8684

Email: soviquim@soviquim.cl

www.soviquim.cl

RUT: 78.116.970-6

FACTURA ELECTRÓNICA

N° 353.596

S.I.I. SANTIAGO PONIENTE

NO-Prepa

Razón social MARIO GONZALO TOLEDO TORRES
Giro -
Dirección AV. ESPAÑA 1680
Facturación VALPARAISO
Comuna VALPARAISO
Guías

RUT 14.325.645-6
Fecha 05/04/2024
Atención
Ciudad VALPARAISO
Orden de Compra
Forma de pago Contado
Vendedor Benjamin Sepulveda

Dirección Despacho

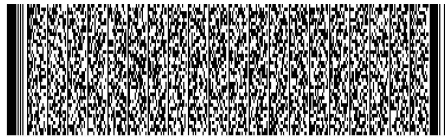
Pedidos 134.052

Nota

NO APLICA / OTRO

PROYECTO FONDECYT N°1241030

Cantidad	Producto	Precio Un. s/Dto.	Dto.	Dto. %	Total con Dto
1	CV-300 - DISCO DE CUARZO DIAM.76MM Y ESPESOR 3MM	228.000,00			228.000
SUBTOTAL					228.000
EXENTO					0
NETO					228.000
IVA 19%					43.320
TOTAL					271.320



Son doscientos setenta y un mil trescientos veinte pesos

Timbre Electrónico SII

Res. 209 del 30/12/2009 - Verifique documento: www.sii.cl
Documento generado por www.laudus.cl

Figura G.3: Factura disco de cuarzo para placa receptora de radiación.

MAESTRANZA HETOL LIMITADA

Giro: EMPRESA DE SERVICIOS DE INGENIERIA
Y ACTIVIDADES CONEXAS DE CONSULTORI
E LILLO 239 245- VALPARAISO

eMail : MAESTRANZAHETOL@GMAIL.COM

Telefono :

TIPO DE VENTA: DEL GIRO

R.U.T.:76.997.797- K

FACTURA ELECTRONICA

N°3518

S.I.I. - VALPARAISO

Fecha Emision: 15 de Mayo del 2024

SEÑOR(ES): MARIO GONZALO TOLEDO TORRES
R.U.T.: 14.325.645- 6
GIRO: SERVICIOS PROFESIONALES DE INGENIERIA Y
DIRECCION: Carlos Fernando 983 Mackenna
COMUNA VINA DEL MAR CIUDAD: 76971013
CONTACTO:
TIPO DE COMPRA: DEL GIRO

Codigo	Descripcion	Cantidad	Precio	%Impto Adic.*	%Desc.	Valor
-	SERVICIOS REF.; PROYECTO FONDECYT N° 1241030 MODIFICAR REACTOR SEGUN INDICACIONES.	1	150.000			150.000

Forma de Pago:Contado



Timbre Electrónico SII

Res.99 de 2014 Verifique documento: www.sii.cl

MONTO NETO	\$	150.000
I.V.A. 19%	\$	28.500
IMPUESTO ADICIONAL	\$	0
TOTAL	\$	178.500

Figura G.4: Factura de modificaciones y adaptaciones sobre reactor y base de reactor por cambio de dimensiones dado el nuevo acoplado rotatorio.

Anexo H. Resultados de composición elemental y características de la biomasa y el carbón



INFORME DE ENSAYO N° QUI-160-23

Fecha emisión:
09.01.2024

Información del cliente	
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María
Solicitante	Mario Toledo Andrés Rivera.
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Análisis Elemental: Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno, Azufre. Análisis Proximal: Humedad, Cenizas, Materia Volátil, Carbono Fijo.		
Tipo de muestra	Muestra sólida de color negro		
Identificación muestras	Carbón Sub Bit		CI 274
Fecha de recepción	12 de diciembre de 2023	Fecha Inicio Análisis	12 de diciembre de 2023
Método utilizado	Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno, Azufre: Analizador Elemental en equipo Equipo Thermo Finnigan. Modelo Flash EA. Serie 1112. Humedad: ASTM D3173-11 Cenizas: ASTM D3174-12 Materia volátil: ASTM D3175-11 Carbón Fijo: Cálculo = [100 - (Humedad - Cenizas - Mat. Volátil)]		
Responsable del muestreo	Andrés Arriagada		



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-160-23

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 2

Figura H.1: Análisis elemental del carbón sub-bituminoso utilizado para pruebas en reactor, hoja 1.

RESULTADOS en base recibida

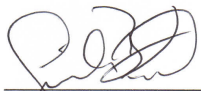
Análisis	Análisis	Unidad	Resultados (*)
			CI 274
Análisis Elemental	Carbono	[g de C/100 g de muestra]	56,2 ± 0,6
	Hidrógeno	[g de H/100 g de muestra]	3,44 ± 0,05
	Nitrógeno	[g de N/100 g de muestra]	1,43 ± 0,03
	Oxígeno	[g de O/100 g de muestra]	18,1 ± 0,3
	Azufre	[g de S/100 g de muestra]	< 0,45
Análisis Proximal	Humedad	[g de H ₂ O/100 g de muestra]	6,71 ± 0,01
	Cenizas	[g de Cenizas/100 g de muestra]	12,7 ± 0,3
	Materia Volátil	[g de Mat. Volátil/100 g de muestra]	38,8 ± 0,8
	Carbono Fijo	[g de C/100 g de muestra]	41,79

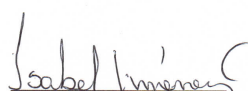
(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: $X \pm s$; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.

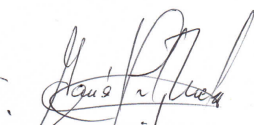
Observaciones: No hay observaciones.

Fin del documento




Gisela Bruhn
Químico analista


Isabel Jiménez
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-160-23

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 2 de 2

Figura H.2: Análisis elemental del carbón sub-bituminoso utilizado para pruebas en reactor, hoja 2.

Anexo I. Análisis de esfuerzos placa cuarzo inventor

Simulación realizada considerando un pivote en la zona central de la placa, la fuerza ejercida por el peso de la placa y una fuerza equivalente a 10 [kg] en la misma dirección, sobredimensionando el peso de alúminas y carbón, que son menos del 10

Nombre	Sílice vítrea	
General	Densidad de masa	2,2 g/cm ³
	Límite de elasticidad	45 MPa
	Resistencia máxima a tracción	110 MPa
Tensión	Módulo de Young	75,001 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,16 su
	Módulo cortante	32,328 GPa
Nombre(s) de pieza	Placa emisora_cuarzo.ipt	

Figura I.1: Propiedades mecánicas de la placa de cuarzo.

El factor de seguridad es de 15.

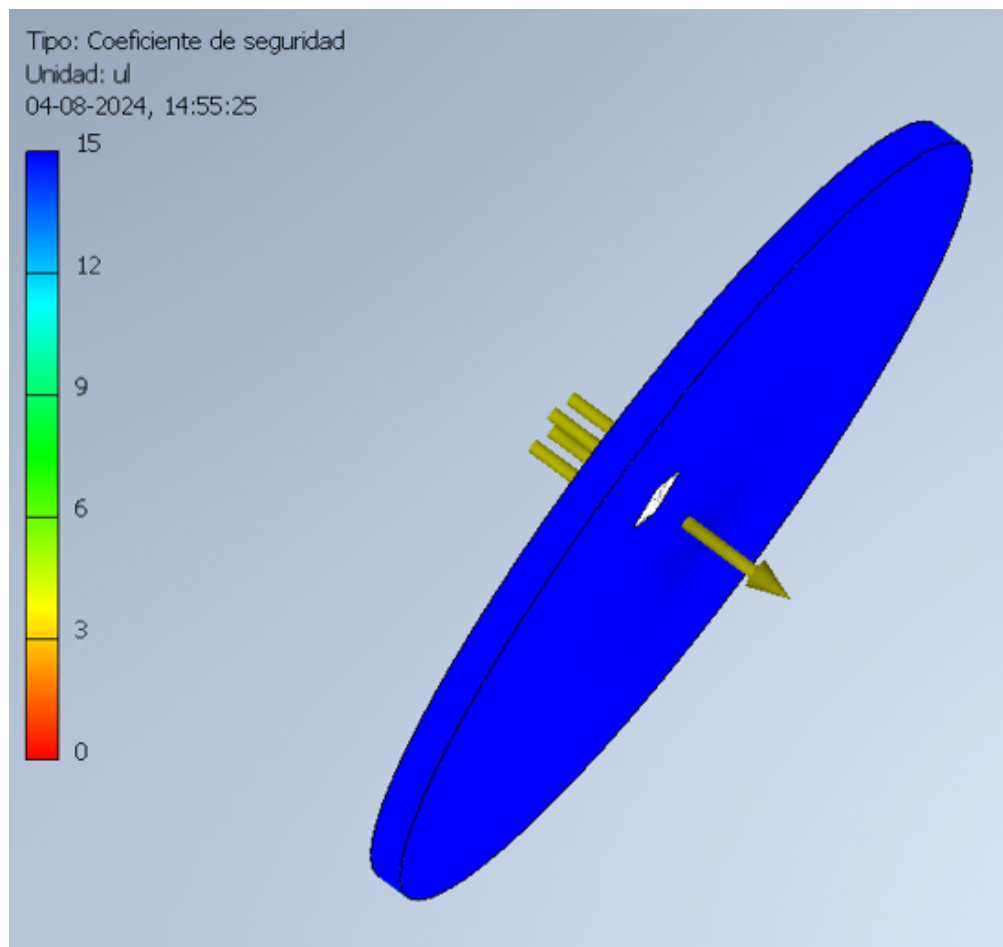


Figura I.2: Test placa de cuarzo, factor de seguridad.

Anexo J. Códigos Matlab

Código J.1: Temperaturas de las Termocuplas

```
1
2 % Leer el archivo CSV como texto
3 filename = '09-07-2024-2.csv';
4 fileID = fopen(filename, 'r');
5 data = textscan(fileID, '%s', 'Delimiter', '\n');
6 fclose(fileID);
7
8 % Convertir el contenido del archivo a una celda
9 data = data{1};
10
11 % Extraer los encabezados
12 headers = strsplit(data{1}, ',');
13
14 % Inicializar las matrices para almacenar los datos
15 numRows = length(data) - 1;
16 numCols = length(headers);
17 dataMatrix = zeros(numRows, numCols);
18
19 % Procesar cada fila de datos y separarlos por comas
20 for i = 2:length(data)
21     row = str2double(strsplit(data{i}, ','));
22     dataMatrix(i-1, :) = row;
23 end
24
25 % Extraer las columnas
26 chan0 = dataMatrix(:, 1);
27 chan1 = dataMatrix(:, 2);
28 chan2 = dataMatrix(:, 3);
29 chan3 = dataMatrix(:, 4);
30
31 % Crear el vector de tiempo en función del número de mediciones
32 time = (0:length(chan0)-1)';
33
34 % Crear la gráfica
35 figure;
36 hold on; % Para superponer múltiples gráficos
37 plot(time, chan0, 'DisplayName', headers{1});
38 plot(time, chan1, 'DisplayName', headers{2});
39 plot(time, chan2, 'DisplayName', headers{3});
40 plot(time, chan3, 'DisplayName', headers{4});
41
```

```

42 % Personalizar la gráfica
43 xlabel('Tiempo');
44 ylabel('Temperatura (°C)');
45 title('Temperaturas de las Termocuplas');
46 legend('Location', 'best');
47 grid on;
48 hold off;
49
50

```

Código J.2: Gráfica CO y H2 Testo (H2 significativo)

```

1
2 % Leer el archivo Excel
3 filename = 'GasSolar_12-07-24.xlsx';
4 data = readtable(filename);
5
6 % Definir un umbral para la concentración de H2
7 umbralH2 = 10; % Ajusta este valor según tus necesidades
8
9 % Filtrar los datos donde la concentración de H2 es significativa
10 indices = data.ppmH2 > umbralH2;
11 time = data.secRuntime(indices);
12 co = data.ppmCO(indices);
13 h2 = data.ppmH2(indices);
14
15 % Definir el intervalo de muestreo (cada 5 segundos)
16 intervalo = 5;
17
18 % Filtrar los datos para obtener solo los puntos que coincidan con el
19 ↪ intervalo de muestreo
20 muestra_indices = 1:intervalo:length(time);
21 time_muestra = time(muestra_indices);
22 co_muestra = co(muestra_indices);
23 h2_muestra = h2(muestra_indices);
24
25 % Crear la gráfica
26 figure;
27 hold on; % Para superponer múltiples gráficos
28 plot(time_muestra, co_muestra, 'DisplayName', 'CO');
29 plot(time_muestra, h2_muestra, 'DisplayName', 'H2');
30
31 % Personalizar la gráfica
32 xlabel('Tiempo (segundos)');

```

```

32 ylabel('Concentración (ppm)');
33 title('Gráfica CO y H2 Testo (H2 significativo)');
34 legend('Location', 'best');
35 grid on;
36 hold off;
37
38

```

Código J.3: Gráfica de mediciones TESTO(H2 significativo)

```

1
2 % Leer el archivo Excel
3 filename = 'GasSolar_10-07-24.xlsx';
4 data = readtable(filename);
5
6 % Definir un umbral para la concentración de H2
7 umbralH2 = 10; % Ajusta este valor según tus necesidades
8
9 % Filtrar los datos donde la concentración de H2 es significativa
10 indices = data.ppmH2 > umbralH2;
11 time = data.secRuntime(indices);
12 o2 = data.x_O2(indices);
13 co = data.ppmCO(indices);
14 cxy = data.ppmCxHy(indices);
15 h2 = data.ppmH2(indices);
16
17 % Crear la gráfica
18 figure;
19 hold on; % Para superponer múltiples gráficos
20
21 % Primer eje y (ppm)
22 yyaxis left;
23 plot(time, co, 'Color', [0, 0.4470, 0.7410], 'LineStyle', '-', 'DisplayName', '
↳ ppm CO'); % Azul intenso para CO
24 plot(time, h2, 'Color', [0.4660, 0.6740, 0.1880], 'LineStyle', '-', 'DisplayName',
↳ 'ppm H2'); % Verde intenso para H2
25 plot(time, cxy, 'Color', [0.8500, 0.3250, 0.0980], 'LineStyle', '-', 'DisplayName
↳ ', 'ppm CxHy'); % Naranja para CxHy
26 ylabel('Concentración (ppm)');
27
28 % Segundo eje y (porcentaje)
29 yyaxis right;
30 plot(time, o2, 'Color', [0.4, 0.4, 0.4], 'LineStyle', ':', 'DisplayName', '% O2');
↳ % Gris oscuro punteado para O2

```

```

31 ylabel('Concentración (%)');
32
33 % Personalizar la gráfica
34 xlabel('Tiempo (segundos)');
35 title('Gráfica de ppm CO, H2, CxHy y % O2 en función del Tiempo');
36 legend('Location', 'best');
37 grid on;
38 hold off;
39
40

```

Código J.4: Curvas del Ratio ppm CO/H2 en función del Tiempo

```

1
2 % Definir los nombres de los archivos
3 filenames = {'GasSolar_10-07-24.xlsx', 'GasSolar_11-07-24.xlsx',
↪ 'GasSolar_12-07-24.xlsx'};
4
5 % Definir un umbral para la concentración de H2
6 umbralH2 = 10; % Ajusta este valor según tus necesidades
7
8 % Definir el intervalo de muestreo (cada 5 segundos)
9 intervalo = 5;
10
11 % Definir colores para cada gráfica
12 colors = {'r', 'g', 'b'};
13
14 % Crear la figura para las curvas
15 figure;
16 hold on; % Para superponer múltiples gráficos
17
18 % Iterar sobre cada archivo
19 for i = 1:length(filenames)
20 % Leer el archivo Excel
21 data = readtable(filenames{i});
22
23 % Filtrar los datos donde la concentración de H2 es significativa
24 indices = data.ppmH2 > umbralH2;
25 time = data.secRuntime(indices);
26 co = data.ppmCO(indices);
27 h2 = data.ppmH2(indices);
28
29 % Calcular el ratio CO/H2
30 ratio_co_h2 = co ./ h2;

```

```

31
32     % Limitar el ratio CO/H2 a un máximo de 3
33     ratio_co_h2(ratio_co_h2 > 3) = 3;
34
35     % Filtrar los datos para obtener solo los puntos que coincidan con el
↪ intervalo de muestreo
36     muestra_indices = 1:intervalo:length(time);
37     time_muestra = time(muestra_indices);
38     ratio_muestra = ratio_co_h2(muestra_indices);
39
40     % Graficar la curva del ratio CO/H2 en función del tiempo para cada
↪ archivo
41     plot(time_muestra, ratio_muestra, 'Color', colors{i}, 'DisplayName',
↪ sprintf('Prueba n° %d', i));
42     end
43
44     % Personalizar la gráfica
45     xlabel('Tiempo (segundos)');
46     ylabel('Ratio ppm CO/H2');
47     title('Curvas del Ratio ppm CO/H2 en función del Tiempo');
48     legend('Location', 'best');
49     grid on;
50     hold off;
51
52

```

Código J.5: Curvas de Hidrógeno en función del Tiempo

```

1
2     % Definir los nombres de los archivos
3     filenames = {'GasSolar_10-07-24.xlsx', 'GasSolar_11-07-24.xlsx', '
↪ GasSolar_12-07-24.xlsx'};
4
5     % Definir colores para cada curva
6     colors = {'r', 'g', 'b'};
7
8     % Crear la figura para las curvas
9     figure;
10    hold on; % Para superponer múltiples gráficos
11
12    % Iterar sobre cada archivo
13    for i = 1:length(filenames)
14        % Leer el archivo Excel
15        data = readtable(filenames{i});

```

```

16
17     % Extraer el tiempo y las concentraciones de H2
18     time = data.secRuntime;
19     h2 = data.ppmH2;
20
21     % Graficar la curva de H2 en función del tiempo
22     plot(time, h2, 'DisplayName', sprintf('Prueba n° %d', i), 'Color', colors{i
↵ });
23     end
24
25     % Personalizar la gráfica
26     xlabel('Tiempo (segundos)');
27     ylabel('Concentración de H2 (ppm)');
28     title('Curvas de Hidrógeno en función del Tiempo');
29     legend('Location', 'best');
30     grid on;
31     hold off;
32
33

```

Bibliografía

- [1] International Energy Agency (IEA), “Coal 2023.” <https://www.iea.org/reports/coal-2023>, 2023. License: CC BY 4.0.
- [2] Biblioteca Nacional del Congreso, “Ley 21.305 sobre eficiencia energética (13-feb-2021).” <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>, 2021.
- [3] Biblioteca Nacional del Congreso, “Decreto ley 2224: Crea el ministerio de energía y la comisión nacional de energía (08-jun-1978).” <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=6857&idVersion=2021-02-13>, 1978.
- [4] Biblioteca Nacional del Congreso, “Decreto con fuerza de ley 1: Deroga decreto n° 20, de 1964, y lo reemplaza por las disposiciones que indica (14-feb-1979).” <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=3383&idParte=7112281&idVersion=2021-02-13>, 1979.
- [5] SolarGIS, “Mapas y datos gis.” <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>, 2024.
- [6] Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., y Dincer, I., “A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and opportunities,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 50, p. 25385–25412, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>.
- [7] Ripoll Kameid, N. A. A., “Estudio numérico-experimental de la generación de gas de síntesis en un reactor híbrido de medios porosos con carbón sub-bituminoso y vapor con aporte solar.” Universidad Técnica Federico Santa María, 2016.
- [8] Ministerio de la Energía, “Explorador solar, 2004-2016.” <https://solar.minenergia.cl>, 2004–2016.
- [9] Piatkowski, N., Wieckert, C., Weimer, A. W., y Steinfeld, A., “Solar-driven gasification of carbonaceous feedstock - a review,” *Energy and Environmental Science*, vol. 4, no. 1, p. 73–82, 2011, <https://doi.org/10.1039/c0ee00312c>.
- [10] Urzúa Bobadilla, R. E., “Diseño e implementación de un sistema de generación de gas de síntesis a partir de carbón y vapor de agua producido con aporte solar.” Universidad Técnica Federico Santa María, 2016, <http://hdl.handle.net/11673/23328>.
- [11] Luque, R. y Speight, J. G., eds., *Gasification for Synthetic Fuel Production: Fundamentals, Processes and Applications*. Woodhead Publishing, 1st ed., 2014.
- [12] Pyromation, “Thermocouple types.” <https://www.pyromation.com/products/Ther>

[mocouple/Thermocouple-Types.aspx](#).

- [13] Turner, D., “Cromatografía de gases: cómo funciona una máquina de cromatografía de gases, cómo leer un cromatógrafo y gcxgc,” Anthias Consulting Ltd., 2021.
- [14] Toledo, M., Vergara, E., y Saveliev, A., “Syngas production in hybrid filtration combustion,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 3907–3912, 2011, [doi:10.1016/j.ijhydene.2010.11.060](#).
- [15] Salgansky, E., Zaichenko, A., Podlesniy, D., Salganskaya, M., y Toledo, M., “Coal dust gasification in the filtration combustion mode with syngas production,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 11017–11022, 2017, [doi:10.1016/j.ijhydene.2017.03.056](#).
- [16] Glazov, S. y Polianczyk, E., “Filtration combustion of carbon in the presence of endothermic oxidizers,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 51, pp. 540–548, 2015, [doi:10.1134/S0010508215050044](#).
- [17] Dobrego, K., Zhdanok, S., y Koznacheev, I., “Gasification of belarusian oil shales in a filtration-combustion wave,” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 82, pp. 199–208, 2009, [doi:10.1007/s10891-009-0204-y](#).
- [18] Kislov, V., Glazov, S., Salgansky, E., Kolesnikova, Y., y Salganskaya, M., “Coal gasification by a mixture of air and carbon dioxide in the filtration combustion mode,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 52, pp. 320–325, 2016, [doi:10.1134/S0010508216030102](#).
- [19] Puig-Arnavat, M., Tora, E. A., Bruno, J. C., y Coronas, A., “State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock,” *Solar Energy*, vol. 97, p. 67–84, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.001>.
- [20] Gregg, D. W., “Apparatus and method for solar coal gasification,” 1980.
- [21] Taylor, R. W., Berjoan, R., y Coutures, J. P., “Solar gasification of carbonaceous materials,” *Solar Energy*, vol. 30, p. 513–525, 1983.
- [22] Z’Graggen, A., Haueter, P., Trommer, D., Romero, M., de Jesus, J., y Steinfeld, A., “Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power—ii. reactor design, testing, and modeling,” *International Journal*, 2006.
- [23] Shen, Y., “Biomass pretreatment for steam gasification toward h2-rich syngas production – an overview,” 2024, [doi:10.1016/j.ijhydene.2024.04.096](#).
- [24] Toledo, M., Arriagada, A., Ripoll, N., Salgansky, E. A., y Mujeebu, M. A., “Hydrogen and syngas production by hybrid filtration combustion: Progress and challenges,” 2023, [doi:10.1016/j.rser.2023.113213](#).
- [25] Agrafiotis, C., Storch, H. V., Roeb, M., y Sattler, C., “Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production - a review,” 2014, [doi:10.1016/j.rser.2013.08.050](#).
- [26] Arriagada, A., Mena, R., Ripoll, N., Hayes, R. E., Nikrityuk, P. A., y Toledo, M., “Solar-driven gasification for syngas production at low temperatures using a rotary hybrid porous media reactor,” *Chemical Engineering Journal*, p. 153011, 2024,

doi:10.1016/j.cej.2024.153011.

- [27] T. and Bernal, C. and Tomás, F., “Diseño, construcción e instalación de un concentrador solar tipo cassegrain.” Universidad Técnica Federico Santa María, 2022, <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/53777>.
- [28] Mena Fredes, R., “Investigación experimental de la producción solar de hidrógeno y gas de síntesis a partir de un combustible carbonoso y vapor de agua.” Universidad Técnica Federico Santa María, 2023.
- [29] Arancibia, N. P., “Simulación computacional del proceso de producción de hidrógeno y gas de síntesis a partir de un reactor solar.” Universidad Técnica Federico Santa María, 2021, <https://hdl.handle.net/11673/53721>.
- [30] AZoM, “Quartz - silica,” 2001, <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>. Accessed: 2024-07-01.
- [31] Ecotecnias, W., “Cocina solar parabólica.” <https://www.wakanecotecnias.cl/products/cocina-solar-parabolica>. Accedido: 18-may-2024.
- [32] Rodriguez-Sanchez, D. y Rosengarten, G., “Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror,” *Applied Energy*, vol. 159, p. 620–632, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.106>.
- [33] Friedman Ramírez, D., “Sistema de concentración solar fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria: Evaluación de prototipo,” 2017, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145345>. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145345>.
- [34] Hu, Y.-H. y Chen, C.-Y., “The effect of end groups on the thermal degradation of poly(methyl methacrylate),” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 82, no. 1, pp. 81–88, 2003, doi:10.1016/S0141-3910(03)00165-4.
- [35] Semmaq, “Pruebas de hermeticidad: medida de seguridad,” 2022,
- [36] Instruments, C., “CEM Instruments: DT-8891A Infrared Thermometer.” <https://www.cem-instruments.in/product.php?pname=DT-8891A>. Accedido: 23-may-2024.