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

"DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN REACTOR PILOTO SOLAR DE GASIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS"

BASTIÁN IGNACIO OLIVARES RIVERA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: DR. ING. RODRIGO BARRAZA V.

DICIEMBRE – 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, que siempre me ha acompañado y apoyado en mi camino a este momento, a mi madre por estar ahí en los momentos difíciles, a mi padre por inculcarme estos intereses que resultaron en que ambos estudiáramos ingeniería mecánica, a mi hermana, que, a pesar de ser tan distintos, nos queremos y apoyamos siempre. También me gustaría agradecer a mis abuelos maternos y paternos, quienes siempre me motivaron y quisieron ver este momento, y aunque lamentablemente no lo pudieron hacer, sé que están orgullosos, donde quiera que estén.

A los "mecamigos", sin los cuales, y gracias a las incontables noches de estudio ft. papajohns, no habría podido terminar esta carrera. A mis amigos fuera de la universidad, siempre haciendo más llevaderos los momentos difíciles, con merecidos momentos de distención. Específicamente a quienes me acompañaron en la escritura de este trabajo de título con los infaltables ludos conversables.

A la universidad y las personas que la componen. A mis profesores, especialmente a Mario Toledo, quienes cumplieron su labor de excelente manera. A Nicolás Ripoll, por acompañarme y guiarme durante este proceso. A los ayudantes de los laboratorios, quienes me ayudaron y guiaron en la realización de la parte experimental de este trabajo de título.

DEDICATORIA

A mis Padres

A mind needs books as a sword needs a whetstone, if it is to keep its edge.

George R R Martin

RESUMEN

En el marco del proyecto de investigación de producción de combustibles solares del *Solar Energy Research Center* (SERC-Chile), el presente trabajo de titulación tiene por objetivo general el desarrollo de pruebas experimentales a un reactor de lecho poroso inerte diseñado para la gasificación de combustibles sólidos.

En primer lugar, se realiza el diseño del reactor con sus sistemas de medición y control de temperatura, el cual tendrá un funcionamiento con un flujo radiativo solar indirecto por medio de una placa emisora. En segundo lugar, se implementa un sistema de aporte de calor desde un quemador radiativo, que permite simular de cierta manera la energía solar proporcionada al gasificador de combustibles sólidos. En tercer lugar, se verifica experimentalmente la ventaja y desventaja de la utilización de distintos tipos de esferas de alúmina como lecho poroso inerte al interior de la cavidad gasificadora, para un sistema operando en estado estático. Finalmente, se presenta un análisis de resultados y recomendaciones para la futura operación del gasificador en estado rotatorio.

Se obtuvieron los perfiles térmicos del gasificador, cuyas temperaturas alcanzan los ~500°C, con una eficiencia del ~30% en el quemador y entre 0.1–1.7% en la relación quemador-cavidad gasificadora. Se analiza el efecto del diámetro y masa de las esferas de alúmina, y los beneficios del uso de esferas huecas dada la mayor velocidad de transferencia de calor para un futuro uso de combustibles carbonosos.

La principal recomendación se encuentra en la utilización un material ad-hoc para la placa emisora. Por otra parte, se recomienda la utilización de cada tipo de esfera para propósitos distintos y también considerar la radiación al interior de las esferas huecas para futuros análisis.

Palabras claves: Transferencia de calor, medio poroso, radiación indirecta, diseño, reactor.

ABSTRACT

Within the framework of the "Solar Energy Research Center" (SERC-Chile) investigation project, the present work has the overall objective of developing experimental testing for a, packed bed and inert porous media filled, solar gasifier, designed, also by this work, for the purpose of gasifying carbonaceous fuels.

Firstly, the gasifier is designed with its control and measurement systems, which will work with an indirect concentrated solar flux that will flow through an emitter plate via conduction. Secondly, a porous burner is implemented as a radiative heat input system, in an effort of emulating concentrated solar radiation. Thirdly, the advantages and disadvantages between the use of two types of alumina spheres implemented as inert porous beds inside the gasifying cavity are, for a static system, experimentally verified. Finally, a results analysis is presented, as well as recommendations for future operation of this gasifier reactor in the expected working conditions.

Thermal profiles are obtained from inside the gasifier, where the temperatures achieved are ~500°C, with a ~30% porous burner efficiency and a 0.1−1.7% efficiency in the burner-gasifying chamber energy interaction. The effect of the alumina sphere's mass and diameter, with respect to the effective conductivity of the packed bed, is analyzed, along with the benefits of using hollow spheres in these processes when considering their greater thermal diffusivity, which would help when working with carbonaceous fuels.

The most important recommendation given here, is to use an ad-hoc material for the emitter plate, as to considerably increment the porous burner-gasifier chamber thermal efficiency. In addition, it is recommended to consider the radiation heat transfer taking place inside the nucleus of hollow spheres in future analyses.

Key words: Heat transfer, porous media, indirect radiation, design, reactor.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ..... **I**

DEDICATORIA ..... **II**

RESUMEN ..... **III**

ABSTRACT ..... **IV**

ÍNDICE ..... **V**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **IX**

ÍNDICE DE GRÁFICOS ..... **IX**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **XII**

ÍNDICE DE ECUACIONES ..... **XIV**

GLOSARIO DE TÉRMINOS ..... **XVI**

SUBÍNDICES ..... **XVII**

SUPERÍNDICES ..... **XVII**

ESPECIES QUÍMICAS ..... **XVIII**

1. INTRODUCCIÓN & OBJETIVOS **1**

1.1 CONTEXTO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO MUNDIAL 1

1.1.1 Relación entre progreso y demanda energética *1*

1.1.2 Combustibles fósiles: demanda y reservas disponibles *4*

- Petróleo 6
- Gas Natural 6
- Carbón 7

1.1.3 Emisiones y cambio climático *8*

- Sumideros térmicos 9
- Efectos a corto plazo 11
- Efectos a largo plazo 11

1.2 HIDRÓGENO 12

1.2.1 Características generales *12*

1.2.2 Métodos de obtención *14*

- Clasificación 14
- Métodos de Producción de hidrógeno. 15

1.3 REALIDAD ENERGÉTICA CHILENA 19
1.4 OBJETIVOS 22

2. MARCO TEÓRICO 23

2.1 GASIFICACIÓN 23
2.2 GASIFICADOR SOLAR DE COMBUSTIBLES CARBONOSOS SÓLIDOS 25
2.2.1 Radiación directa versus radiación indirecta 27
- Radiación Directa 28
- Radiación Indirecta 28

2.2.2 Cavidad Solar 30
- Apertura 31
- Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) 33
- Ventanilla 33
- Bridas o anillos para placa emisora 34

2.2.3 Placa emisora 34
2.2.4 Cavidad Gasificadora 35
2.3 CONCENTRACIÓN SOLAR 37
- Sistema de torre de poder central 38
- Sistema de disco parabólico 39
- Sistema de doble concentración solar 39

2.4 MEDIOS POROSOS 39
2.4.1 Quemador poroso 40
- Radiación térmica 40

2.4.2 Transferencia de calor a través de un lecho poroso inerte 41
- Porosidad 41
- Conductividad de una esfera hueca 41
- Conductividad efectiva del lecho poroso inerte 42
- Difusividad Térmica 43
- Conductividad y calor especifico de los materiales involucrados 43
- Potencia conducida a través de un sólido 46

2.5 VARIABLES DE ANÁLISIS 46
- Eficiencia del quemador 46
- Eficiencia de absorción radiativa 46

3. DISEÑO EXPERIMENTAL 48

3.1 GASIFICADOR SOLAR 48
3.1.1 Cavidad Solar 49

- Apertura 49
- Placa emisora 50
- Paredes 51

3.1.2 Cavidad Gasificadora 51

3.2 FUENTE DE ENERGÍA TÉRMICA 52

3.2.1 Quemador poroso 53

- Esponja cerámica 53
- Trampa de llama 54
- Aislación lateral 55
- Cabezal de combustión 56

3.3 OTROS COMPONENTES 56

3.3.1 Soporte 56

3.3.2 Compresor 57

3.3.3 Tubo de escape 58

3.4 EQUIPAMIENTO DE CONTROL Y MEDICIÓN 59

3.4.1 Controladores de flujo másico (CFM) 59

3.4.2 Termopares y "Data Logger" 60

3.4.3 Pirómetro 62

3.5 PRUEBAS 64

3.5.1 Banco de pruebas 64

3.5.2 Esferas de alúmina 65

- Esferas compactas "sólidas" 65
- Esferas huecas 65

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 66

4.1 PROCEDIMIENTO DE SEGURIDAD 66

4.1.1 Elementos de seguridad 66

4.1.2 Detección de fugas 66

4.2 OPERACIÓN 67

4.2.1 Puesta en marcha 67

4.2.2 Fin de prueba 68

4.3 TOMA DE DATOS 68

4.3.1 Termopares y data logger 68

4.3.2 Pirómetro y temperatura del quemador poroso 69

4.4 PRUEBAS 69

4.4.1 Prueba 1 70

4.4.2 Prueba 2 70

4.4.3 Prueba 3 ..... *70*
4.4.4 Prueba 4 ..... *71*
4.4.5 Prueba 5 ..... *71*
4.4.6 Prueba 6 ..... *71*

5. RESULTADOS 73

5.1 PRUEBAS 73
5.1.1 Temperaturas *75*
5.1.2 Difusividad térmica *80*
5.1.3 Temperatura superficial del quemador poroso *81*
5.1.4 Potencia conducida y eficiencia de absorción radiativa *84*

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS 87

6.1.1 Temperatura, velocidad de calentamiento y Difusividad térmica *87*
- Temperatura y velocidad de calentamiento 87
- Conductividad efectiva y difusividad térmica 89

6.1.2 Eficiencia térmica *96*
- Eficiencia del quemador 97
- Eficiencia de absorción radiativa 97

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 100

7.1 CONCLUSIONES 100
7.2 RECOMENDACIONES 101
- Esferas de alúmina 101
- "Data Logger" 102
- Cavidad solar 102
- Cavidad gasificadora 103
- Ubicación de los termopares 103
- Placa emisora 103

8. REFERENCIAS 104

ANEXOS 108

8.1 ANEXO A: POTENCIA DE COMBUSTIÓN Y FLUJOS DE AIRE Y COMBUSTIBLE 108
8.2 ANEXO B: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN 110
8.3 ANEXO C: ÁREA VISIBLE DEL PIRÓMETRO PROPORCIONAL 118
8.4 ANEXO D: PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA PRUEBA 2 121
8.5 ANEXO E: COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE SALIENDO DESDE EL QUEMADOR 121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de un gasificador solar de radiación indirecta, con ventanilla y extracción lateral de productos. Fuente: Adaptado de [18]. 26
Figura 2: Esquema de transferencia de calor en una cavidad solar de un gasificador solar de radiación indirecta con ventanilla. Fuente: Adaptado de [10]. 30
Figura 3: Métodos de concentración solar en gran escala: (a) cilindro parabólico, (b) torre central, (c) disco parabólico y (d) doble concentración. Fuente: Adaptado de [17]. 38
Figura 4**:** Esquema del quemador poroso. La esponja cerámica se denomina en esta figura como "Medio poroso". Fuente: Adaptado de [30] 53
Figura 5: esponja cerámica utilizada. Fuente: Adaptado de [30]..... 54
Figura 6: Trampa de llama. Fuente: Adaptado de [30] 55
Figura 7: Soporte utilizado, junto al resto de los equipos. Fuente: fabricación propia. 57
Figura 8: Tubo de escape. Fuente: Confección propia. 58
Figura 9: tubo de escape empotrado al reactor. Fuente: Confección propia..... 59
Figura 10: Ubicación de los termopares en el reactor. Fuente: fabricación propia..... 61
Figura 11: Esquema de la instalación para las pruebas. Fuente: Fabricación propia. 64
Figura 12**:** Esquema posicionamiento del pirómetro respecto del quemador poroso (el cual se denomina como medio poroso en la figura). Dimensiones en centímetros. Fuente: Confección propia. 118
Figura 13: Proyección de la circunferencia de visibilidad del pirómetro utilizado y las fórmulas entregadas por el fabricante para el cálculo de su diámetro. Fuente: Adaptado de [31]. 118
Figura 14: Triangulo a resolver para obtener la información requerida. Fuente: Confección propia. 120

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: GDP global en [T$]. 2017 y proyectada al 2040. Fuente: adaptado de [1]..... 2
Gráfico 2: Crecimiento global de GDP y contribución por región. % promedio por año en dos periodos de tiempo. Fuente: Adaptado de [1]..... 2
Gráfico 3: Demanda energética global en trillones de toneladas equivalentes de petróleo [Gtep]. Proyectada y actual. Contribuyentes principales en % promedio por año en dos periodos de tiempo. Fuente: adaptado de [1] 3

Gráfico 4: Consumo energético per cápita por región en [GJ]. Fuente: Adaptado de [3] 4
Gráfico 5: Consumo mundial de energía en [Mtep] separado por materia prima. Fuente: adaptado de [3] 5
Gráfico 6: Razón "Reservas a producción" de petróleo, por región, actual e histórico, en [años]. Fuente: adaptado de [3] 6
Gráfico 7: Razón "Reservas a producción" de gas natural, por región, actual e histórico, en [años]. Fuente: adaptado de [3]..... 7
Gráfico 8: Razón "Reservas a producción" de carbón, por región, actual e histórico, en [años]. Fuente: adaptado de [3]. 8
Gráfico 9: Temperatura mundial promedio anual y por década relativo al periodo de 1986-2005 en [ºC]. Fuente: Adaptado de [5]. 10
Gráfico 10: Promedio global de nivel del mar relativo al periodo 1986-2005 en [m]. Fuente: Adaptado de [5]. 11
Gráfico 11: Composición molar del sistema de la Ecuación 1 en función de la temperatura, para carbón antracita seco y des-sulfurado. Fuente: Adaptado de [16]. 25
Gráfico 12: Tamaño óptimo de apertura y temperatura óptima de funcionamiento, para un reactor solar ideal, en función de la densidad energética "peak" del flujo solar. El radio de la apertura se encuentra en unidades de la desviación estándar. Fuente: Adaptado de [20]. 33
Gráfico 13: Temperaturas dentro de la cavidad solar de la Figura 3 durante la gasificación de carbón sudafricano. Fuente: adaptado de [18]. 36
Gráfico 14: Resultados obtenidos en el trabajo realizado por Ruíz G. en [29]. Fuente: adaptado de [29]. 76
Gráfico 15: Temperaturas medidas por los termopares durante la prueba 3, en los tiempos medidos por el trabajo realizado por Ruiz G. en. Fuente: confección propia. 77
Gráfico 16: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 3. Fuente: Creación propia. 78
Gráfico 17: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 4. Fuente: Creación propia. 79
Gráfico 18: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 5. Fuente: Creación propia. 79
Gráfico 19: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 6. Fuente: Creación propia. 80
Gráfico 20: Difusividad térmica de la prueba 3. Fuente: confección propia. 81

Gráfico 21: Difusividad térmica de la prueba 6. Fuente: confección propia. 81
Gráfico 22: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 3. Fuente: Creación propia. 82
Gráfico 23: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 4. Fuente: Creación propia. 83
Gráfico 24: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 5. Fuente: Creación propia. 83
Gráfico 25: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 6. Fuente: Creación propia. 84
Gráfico 26: Comparación de las temperaturas alcanzadas por los primeros tres termopares en las pruebas 3 (P3, T1,2 y 3) y 6 (P3, T1,2 y 3). Fuente: confección propia. 88
Gráfico 27: Comparación de las conductividades efectivas de las esferas de alúmina en las pruebas 3 y 6, calculadas para las zonas medidas por los tres primeros termopares en cada una. Fuente: confección propia. 90
Gráfico 28: primera hora en el desarrollo de las conductividades efectivas del lecho. Se puede notar como la prueba 6 comienza su actividad térmica aproximadamente 10 minutos antes que la prueba 3. Fuente: confección propia. 91
Gráfico 29: Difusividades térmicas de los lechos de esferas compactas y huecas en función de su temperatura. Fuente: confección propia. 93
Gráfico 30: Conductividad efectiva de lechos de esferas compactas de 5.6 [mm] y esferas huecas de 5 y 5.6 [mm] en función de la temperatura del lecho, entre 300 K y 800 K, y entre 1000 K y 1500 K. La curva TP6 (5.6mm) muestra el caso hipotético donde se utilizan esferas huecas del mismo diámetro de las compactas. Fuente: confección propia..... 94
Gráfico 31: Composición de la conductividad efectiva de los dos primeros discos medidos en la prueba 3. Fuente: confección propia. 95
Gráfico 32: Razón entre la difusividad térmica lineal del lecho de esferas y la cañería, para las pruebas 3 y 6. Se considera el área transversal de cada componente. Fuente: confección propia. 98
Gráfico 33: Perfil de temperatura de la prueba 2. Fuente: confección propia. 121
Grafico 34: Temperatura de los gases de escape desde el quemador para las condiciones de aire combustible de las pruebas 3, 4 y 5. Fuente: confección propia.....122
Grafico 35: Cantidad de C_xH_y de los gases de escape desde el quemador para las condiciones de aire combustible de las pruebas 3, 4 y 5. Fuente: confección propia. 122

Grafico 36: Cantidad de CO de los gases de escape desde el quemador para las condiciones de aire combustible de las pruebas 3, 4 y 5. Fuente: confección propia. 123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Tipos de hidrógeno según origen. Fuente: confección propia a partir de información en [6]. 15
Tabla 1-2: Matriz energética chilena, año 2017. Fuente: Datos obtenidos de [14]..... 20
Tabla 1-3: Aporte de importaciones a matriz energética, año 2017. Porcentaje por materia prima y en comparación al presupuesto energético total. Fuente: datos obtenidos de [14].... 20
Tabla 2-1: Composición química elemental por masa, LVH y razones molares de las especies quimicas H/C y O/C para cuatro tipos de carbón. Fuente: Adaptado de [16]..... 24
Tabla 2-2: Parámetros de la Ecuación 17 para la conductividad de la alúmina. Fuente: datos obtenidos de [24]. 44
Tabla 2-3: Parámetros de la Ecuación 17 para la conductividad del aire. Fuente: datos obtenidos de [24]. 44
Tabla 2-4: Parámetros de la Ecuación 17 para la conductividad del acero 1020. Fuente: datos obtenidos de [24]. 45
Tabla 2-5: Parámetros de la Ecuación 17 para el calor especifico de la alúmina. Fuente: datos obtenidos de [24]. 45
Tabla 2-6: Parámetros de la Ecuación 17 para el calor especifico del acero 1020. Estos datos pueden ser utilizados hasta los 1000 K, ya que a temperaturas superiores la curva no es representativa. Fuente: datos obtenidos de [24]..... 45
Tabla 3-1: Componentes y características de la cavidad solar. Fuente: creación propia..... 49
Tabla 3-2: Componentes y características de la cavidad gasificadora. Fuente: fabricación propia. 51
Tabla 3-3: Características de la esponja cerámica. Fuente: Adaptado de [30] 54
Tabla 3-4: Características de la trampa de llama. Fuente: Adaptado de [30]..... 55
Tabla 3-5: Características del papel aislante. Fuente: Adaptado de [30] 55
Tabla 3-6: Datos del compresor. Fabricación propia. 57
Tabla 3-7: Características del CFM utilizado para gas natural. Fuente: fabricación propia... 60
Tabla 3-8: Características del CFM utilizado para aire. Fuente: fabricación propia..... 60

Tabla 3-9: Pormenores del recolector de datos. Fuente: fabricación propia..... 62
Tabla 3-10: Pormenores del pirómetro utilizado. Fuente: Fabricación propia. 63
Tabla 5-1: Potencia radiativa utilizada para los cálculos de eficiencia posteriores. Fuente: confección propia..... 84
Tabla 5-2: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 240 y 300 min. Potencia radiativa incidente = 734.6[W]. Fuente: confección propia..... 85
Tabla 5-3: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 300 y 345 min. Potencia radiativa incidente = 725.6[W]. Fuente: confección propia..... 85
Tabla 5-4: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 240 y 300 min. Potencia radiativa incidente = 532.1[W]. Fuente: confección propia..... 86
Tabla 5-5: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 210 y 270 min. Potencia radiativa incidente = 689.2[W]. Fuente: confección propia..... 86
Tabla 6-1: Velocidad de calentamiento de los tres primeros termopares durante la primera hora de funcionamiento para las pruebas 3 y 6, además de la diferencia relativa entre ellas. Fuente: confección propia..... 89
Tabla 6-2: Pendiente de la conductividad en el primer disco de medición para las pruebas 3 y 6. La diferencia relativa de las pendientes es del 20.9%. Fuente: confección propia. 92
Tabla 6-3: Composición de la conductividad efectiva del lecho poroso inerte para esferas de alúmina huecas y compactas a tres temperaturas de interés (673K, 973K y 1,500K). Fuente: confección propia..... 94
Tabla 6-4: Potencia radiativa y rendimiento del quemador poroso. Fuente: Confección propia. 97
Tabla 0-1: Potencia y flujos de aire y combustible para las pruebas realizadas. Fuente: Creación propia. 109
Tabla 0-2: Razón aire-combustible para las pruebas realizadas. Fuente: Creación propia. ..110

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación general de gasificación. Fuente: Adaptado de [11]..... 23
Ecuación 2: Reacción de Boudouard. Fuente: Adaptado de [11]. 23
Ecuación 3: Rotura de metano, hidrogasificación. Fuente: Adaptado de [11]. 24
Ecuación 4: Reformación, metanización. Fuente: Adaptado de [11]..... 24
Ecuación 5: Cambio Agua-Gas. Fuente: Adaptado de [11]..... 24
Ecuación 6: Eficiencia de absorción de una cavidad solar perfectamente aislada. Fuente: Adaptado de [20]. 32
Ecuación 7: Potencia a través de la apertura para un flujo solar de distribución gaussiana. Fuente: Adaptado de [20]. 32
Ecuación 8: Radio óptimo de trabajo para un equipo idealmente aislado y un flujo solar de distribución gaussiana. Fuente: Adaptado de [20]. 32
Ecuación 9: Potencia radiativa de una superficie..... 40
Ecuación 10: Porosidad de un lecho sólido. Fuente: Confección propia. 41
Ecuación 11: Equivalencia entre la conductividad de una esfera hueca y una esfera sólida. Fuente: Adaptado de [25]. 42
Ecuación 12: Conductividad efectiva del lecho poroso inerte. Fuente: adaptado de [26]..... 42
Ecuación 13: Conductividad de un lecho sólido. Fuente: Adaptado de [26]..... 42
Ecuación 14: Porción radiativa de la conductividad efectiva del lecho. Fuente: Adaptado de [26]. 43
Ecuación 15: Difusividad térmica de un material. fuente:[28]. 43
Ecuación 16: Difusividad térmica lineal. Fuente: confección propia..... 43
Ecuación 17: Polinomio de tercer grado utilizado para aproximar las propiedades (E: conductividad K o calor especifico cp) de los materiales en función de su temperatura. Fuente: confección propia. 44
Ecuación 18: Potencia conducida por un volumen ocupado por un lecho poroso inerte. Para este caso, el área superficial es de A=0.0129[m^2] y L corresponde a la distancia entre los termopares de cada sector. Fuente: Confección propia. 46
Ecuación 19: Eficiencia del quemador. Fuente: Confección propia. 46

Ecuación 20: Eficiencia de absorción radiativa. Porción de la energía radiativa que es transferida a través del lecho poroso inerte. Fuente: confección propia. 47
Ecuación 24: relación de volumen en CFM. Fuente: Adaptado de [32] 108
Ecuación 25: Masa de combustible. Fuente: Confección propia. 108
Ecuación 26: Potencia del quemador. Fuente: Confección propia.....108
Ecuación 27: LHV y HHV del gas natural, calculado a partir de la fracción másica de los gases que lo componen. Fuente: Datos obtenidos de [33]. 109
Ecuación 28: Flujo molar de aire. Fuente: Confección propia. 109
Ecuación 29: Razón aire combustible. Fuente: Confección propia. 109
Ecuación 27: Calculo del diámetro de la circunferencia de visibilidad del pirómetro al utilizar un "a" superior al entregado por el fabricante. Todas las variables corresponden a las ilustradas en la Figura 13. Fuente: Adaptado de [31]. 119
Ecuación 28: Relación trigonométrica útil para este caso. Todas las variables corresponden a las ilustradas en la Figura 14. Fuente: Confección propia.....120

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Símbolo	Definición	Unidad SI
a	Difusividad termica	$m^2\ s^{-1}$
α	Absortancia	$-$
A	Área	m^2
A, B, C, D	Constantes de un polinomio tipo	-
c_P	Calor específico a presión constante	$j\ kg^{-1}\ K^{-1}$
d	Diámetro	m
ϵ	Emitancia	$-$
F_{peak}	Máxima densidad energética en el flujo solar	$W\ cm^{-2}$
GDP	Producto interno bruto	T$
k	Conductividad	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
K	Relación de volumen del CFM	$-$
ΔH_{298K}	Entalpía de reacción considerando los 298K de temperatura como punto de medición.	$kJ\ mol^{-1}$
λ	Relación aire combustible	$-$
L	Largo	m
LHV	Valor calorífico bajo (“Lower heat value”)	$kj\ kg^{-1}$
η	Eficiencia	-
η_{abs}	Eficiencia de absorción	-
η_E	Eficiencia de conversión energética	-
m	Masa	kg
N	Moles por unidad de masa	$kmol/kg$
P	Potencia	kW
P_{in}	Potencia desde los concentradores solares	kW
q	calor	kJ
r	Radio	mm
t	Tiempo	s
t_{esf}	Espesor de cáscara de una esfera hueca	mm
T	Temperatura	K
U	Factor de mejora	$-$
V	Volumen	m^3
φ	Porosidad del lecho sólido	$-$
μ_{solar}	Desviación estándar del flujo energético solar	mm
σ	Constante Stefan-Boltzmann	$5.67 \cdot 10^{-8}[W\ m\ K^{-4}]$
ρ	Densidad	$kg\ m^{-3}$

V	Volumen

SUBÍNDICES

Subíndices	Definición
ap	Apertura
aire	Propiedad del aire
bulk	A granel, aparente.
bottom	inferior
c	Cáscara de una esfera hueca
$comb$	combustible
cond	Conductividad
Cooling,water	Liquido (agua) de enfriamiento
eff	Efectiva
esf	Esfera
emitter	Placa emisora
gas	Propiedad del gas generado
i	Contador
inscone	Cono de aislamiento térmico
lower cavity	Cavidad gasificadora
n	Núcleo
nom	Nominal
opt	Óptimo
rad	Radiación
s	Esfera sólida
(s)	Fase sólida
T	Total
top	superior
x	Fracción molar de H/C
γ	Fracción molar de O/C

SUPERÍNDICES

Superíndices	Definición
$(\dot{tipo})$	Flujo

ESPECIES QUÍMICAS

Abreviatura	Definición
Al_2O_3	Óxido de aluminio
C	Carbono
CH_4	Metano
$C_1H_xO_y$	Carbohidrato tipo
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
H	Hidrógeno
H_2O	Agua (vapor)
Mg	Magnesio
O	Oxígeno
N	Nitrógeno
S	Azufre
Si	Silicona
SiC	Carburo de silicio

CONSIDERACIÓN

Se utiliza el "punto" (.) como separador decimal entre la parte entera y la parte decimal de un número real, y se usa la coma (,) como separador de miles de unidades.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN & OBJETIVOS

1.1 Contexto ambiental y energético mundial

El constante crecimiento económico del planeta se encuentra fuertemente relacionado con la demanda energética, la cual crece de igual forma. Esta creciente demanda es luego satisfecha por una matriz energética sucia y alta en emisiones de gases de efecto invernadero.

Estas emisiones luego tienen una influencia directa en los procesos de calentamiento global, perturbaciones en los ecosistemas y abastecimiento de recursos básicos para poblaciones. Esto lo transforma en un problema de importancia global.

Es imperativo entonces alcanzar soluciones competitivas que permitan abastecer las necesidades energéticas que el crecimiento económico solicita, de una forma limpia que logre hacer de este un crecimiento sustentable y sostenible en el tiempo.

1.1.1 Relación entre progreso y demanda energética

El mundo se encuentra en un periodo de intenso crecimiento, lo cual es evidenciado por las proyecciones de crecimiento del Producto Interno Bruto (GDP), como muestra el Gráfico 1. Este crecimiento está influenciado por dos factores principales: El crecimiento demográfico y el incremento general en los estándares de vida en el mundo [1]. Este último es el factor más trascendental en este crecimiento de GDP mundial, siendo casi tres cuartas partes de este crecimiento. Evidencia de esto es que grandes países en vías de desarrollo, como China e India, componen gran parte del crecimiento de GDP, como muestra el Gráfico 2.

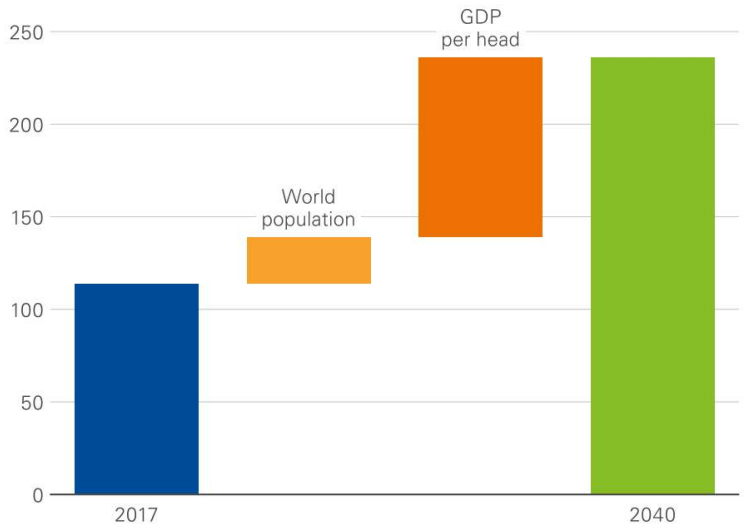


Gráfico 1: GDP global en [T$]. 2017 y proyectada al 2040. Fuente: adaptado de [1].

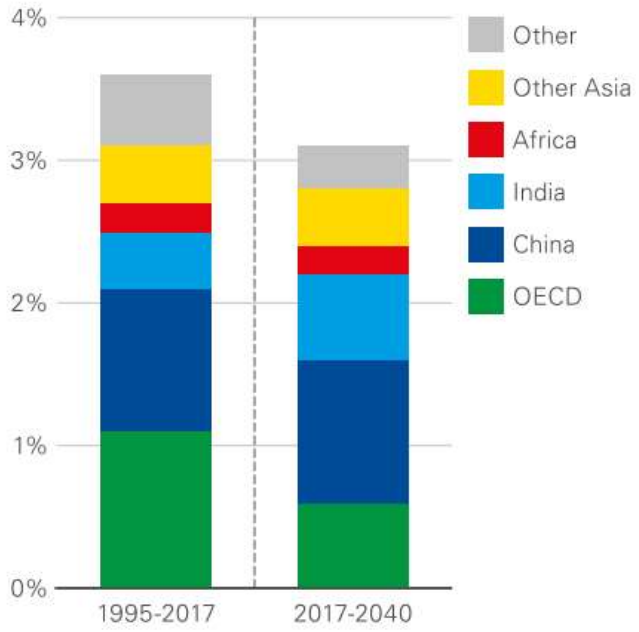


Gráfico 2: Crecimiento global de GDP y contribución por región. % promedio por año en dos periodos de tiempo. Fuente: Adaptado de [1]

Por otra parte, se tiene la creciente demanda energética mundial, que tiene también directa relación con el crecimiento del GDP y los mismos factores que controlan mayoritariamente este crecimiento de GDP, como muestra el Gráfico 3.[2]

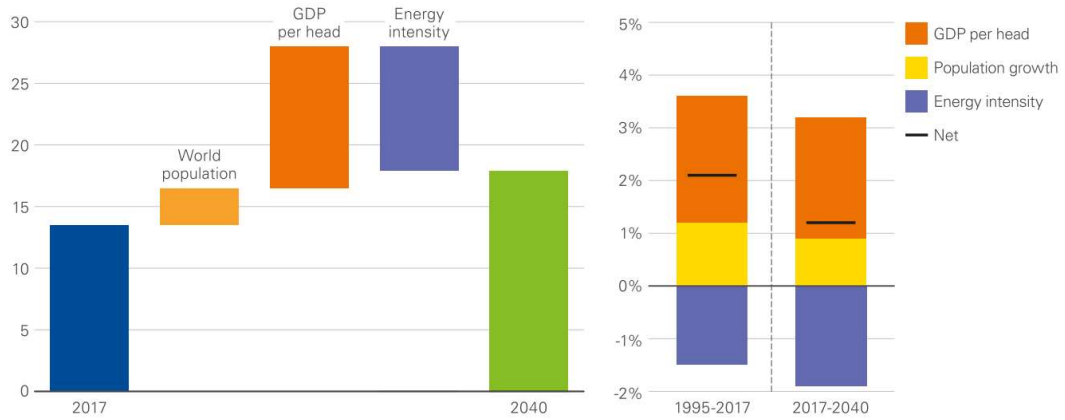


Gráfico 3: Demanda energética global en trillones de toneladas equivalentes de petróleo [Gtep]. Proyectada y actual. Contribuyentes principales en % promedio por año en dos periodos de tiempo. Fuente: adaptado de [1]

Nuevamente, y como se muestra en el Gráfico 4, esto explica porque grandes países en vías de desarrollo, como China e India ("Asia Pacific"), componen grandes incrementos en la demanda energética mundial.

Esta relación tiene vínculos a corto plazo, donde el aumento de GDP provoca directamente un aumento en el consumo energético, y a largo plazo, donde estos dos fenómenos tienen una relación recíproca.

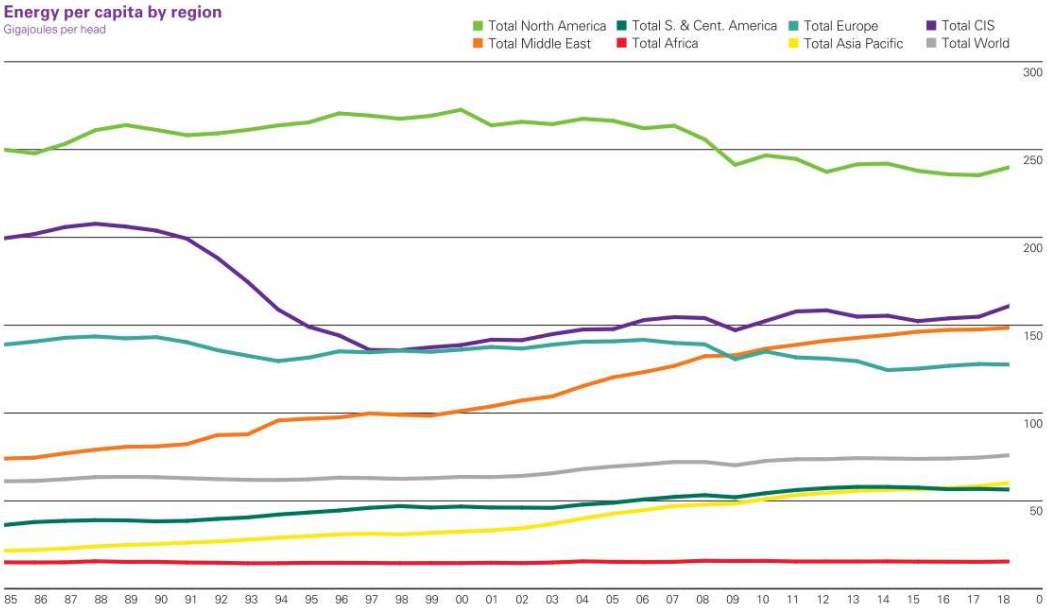


Gráfico 4: Consumo energético per cápita por región en [GJ]. Fuente: Adaptado de [3]

Esto es evidente cuando observamos que en los 90's los países de la OECD correspondían a casi dos tercios de la demanda energética mundial, mientras que hoy en día ese valor se está revirtiendo, siendo el mundo en vías de desarrollo el principal consumidor energético.

Otro factor a considerar acerca de estos países en vías de desarrollo corresponde a la composición de sus matrices energéticas, ya que éstas por lo general dependen casi exclusivamente del carbón durante las expansiones rápidas que suelen ocurrir en los inicios del proceso de desarrollo, y solo decrecen su dependencia en este combustible fósil una vez llegado a una pendiente de desarrollo más manejable.

1.1.2 Combustibles fósiles: demanda y reservas disponibles

Junto al crecimiento en la demanda energética mundial tenemos las distintas fuentes que la satisfacen. En el Gráfico 5 se puede observar el aumento en el consumo de las diversas fuentes de energía actuales.

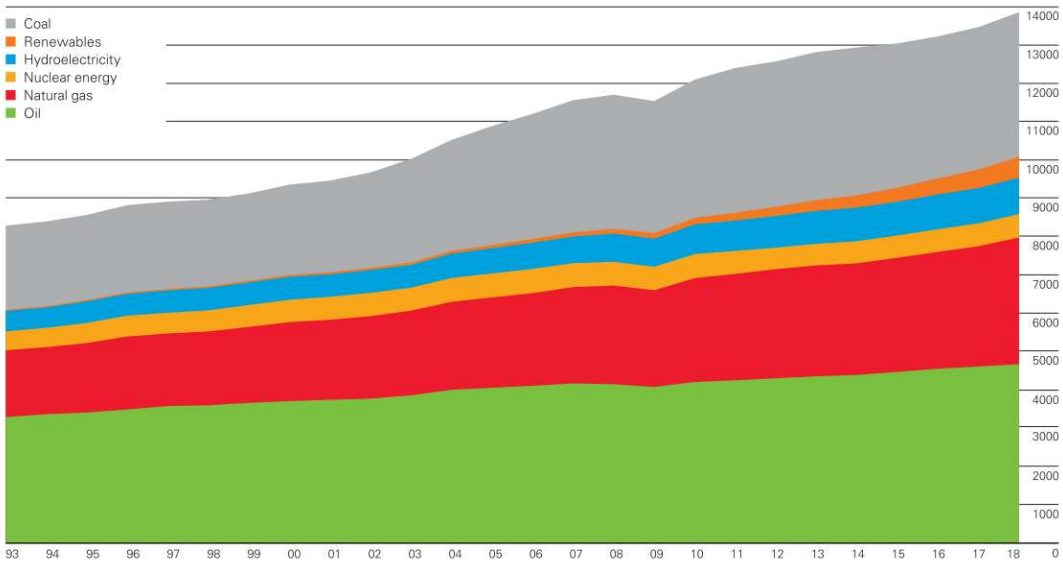


Gráfico 5: Consumo mundial de energía en [Mtep] separado por materia prima. Fuente: adaptado de [3]

Del Gráfico 3 se puede rescatar, además de la composición de la matriz energética de cada año, que el incremento de demanda energética el 2018 fue casi el doble del promedio de los diez años anteriores, donde el gas natural contribuyó con la mayor parte de este incremento (43%) y que en segundo lugar se encuentran las fuentes renovables (18%)[3].

De este crecimiento, los países de la OCDE contribuyeron con 82 [Mtep], donde gran parte de esta demanda fue satisfecha utilizando gas natural (70 [Mtep]). Por otra parte, los países que no forman parte de la OCDE tuvieron un crecimiento de 308 [Mtep], donde el gas natural (98 [Mtep]), el carbón (85 [Mtep]) y el petróleo (47 [Mtep]) contribuyeron la mayor parte de este crecimiento.

A continuación, se analiza la demanda y las reservas de los 3 mayores contribuyentes a la matriz energética mundial: el petróleo, el gas natural y el carbón.

- **Petróleo**

El consumo de combustibles líquidos crece principalmente debido a los países en vías de desarrollo, ya que en la OECD el consumo se encuentra en decrecimiento constante [1].

En el Gráfico 6 podemos observar las condiciones actuales de las reservas de petróleo en el planeta en relación al consumo actual. Se puede destacar que, al nivel de producción actual, las reservas durarían 50 años.

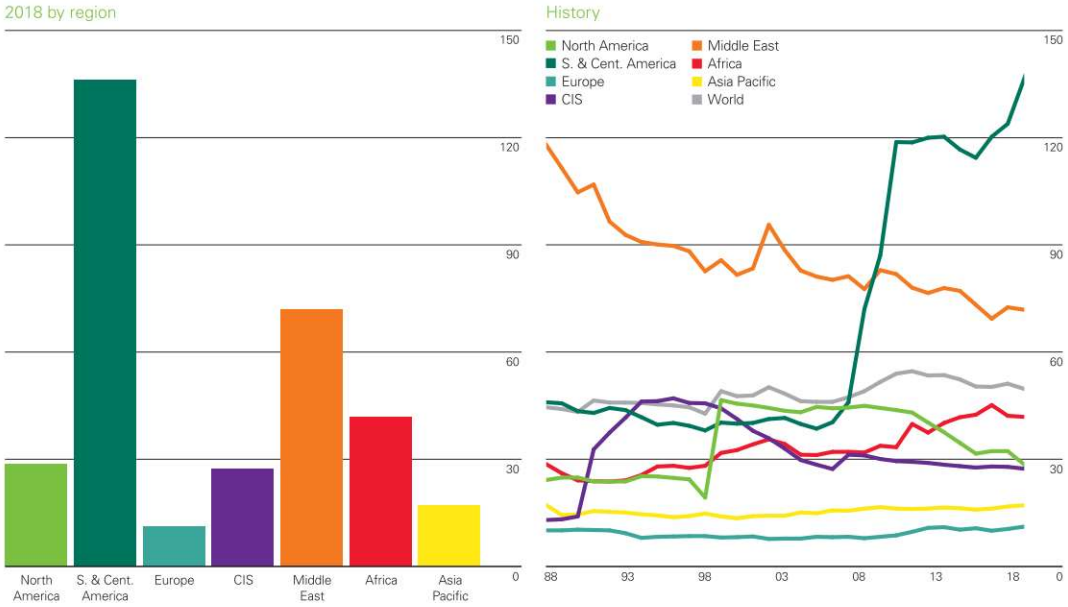


Gráfico 6: Razón "Reservas a producción" de petróleo, por región, actual e histórico, en [años]. Fuente: adaptado de [3]

- **Gas Natural**

Este combustible es utilizado intensivamente por países en vías de desarrollo y se estima que su demanda siga creciendo.

En el Gráfico 7 podemos observar las condiciones actuales de las reservas de gas natural en el planeta en relación al consumo actual. Se estima que las reservas actuales podrían durar 50.9 [años] al ritmo de consumo actual.

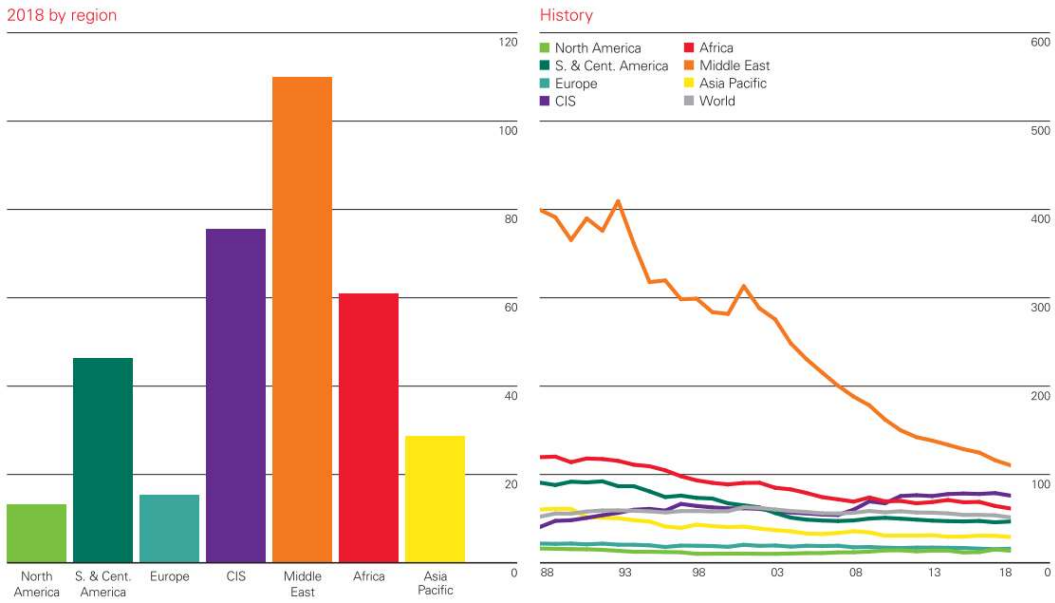


Gráfico 7: Razón "Reservas a producción" de gas natural, por región, actual e histórico, en [años]. Fuente: adaptado de [3].

- **Carbón**

Se estima que el uso de carbón vaya a la baja en países como China, que inician caminos de modernización de su matriz energética. A su vez, se ve incrementado su uso en países más atrás en la ruta del desarrollo, los cuales hacen uso intensivo de este recurso. En un escenario general relativamente optimista este combustible debería estancar su contribución a la matriz energética global.

En cuanto a las reservas de carbón, el Gráfico 8 muestra las condiciones actuales de estas en el planeta en relación al consumo actual. Se puede destacar que las reservas actuales están estimadas para durar 132 [años] al ritmo de consumo actual. Estas

reservas se encuentran concentradas principalmente en Estados Unidos (24%), Rusia (15%), Australia (14%) y China (13%).

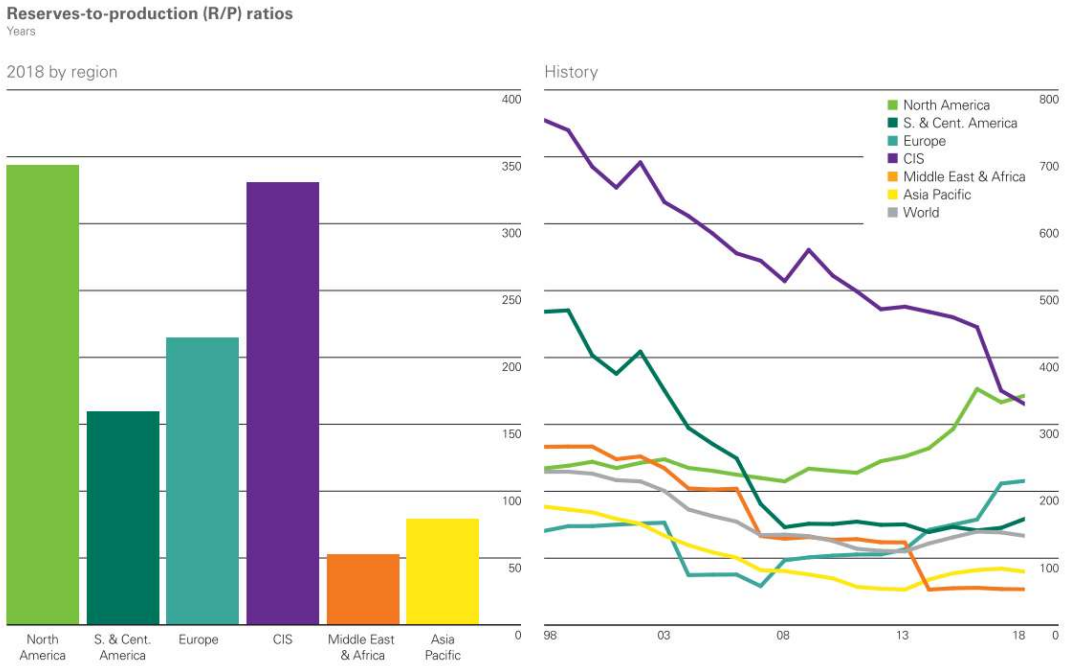


Gráfico 8: Razón "Reservas a producción" de carbón, por región, actual e histórico, en [años]. Fuente: adaptado de [3].

1.1.3 Emisiones y cambio climático

Estas fuentes primarias no renovables de energía, como los mencionados, carbón, petróleo y gas natural, tienen en común la liberación de gases de efecto invernadero al ser combustionadas en el proceso de obtención de energía. Estos gases de efecto invernadero son liberados a la atmósfera, donde tienen un efecto de Forzamiento Radiativo en el planeta.

El “Forzamiento Radiativo” provocado por un fenómeno o agente, generalmente el aumento o disminución de las concentraciones globales de gases de efecto invernadero en la atmósfera, se define como cualquier perturbación que este agente provoque en la cantidad de energía neta que está entrando o está saliendo del planeta por medio de

radiación y, por lo tanto, altera también el estado estacionario global de energía y la temperatura promedio global. Este forzamiento puede ser positivo, cuando el balance de energía neto del planeta y su temperatura aumentan, o negativo, cuando estos disminuyen [4].

Actualmente, el dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero contribuyente al forzamiento radiativo positivo del planeta. Esto ya que las emisiones de este gas han ido aumentando año a año [5].

Tanto así que aproximadamente la mitad del CO_2 acumulado en los últimos 260 años ocurrieron en los últimos 40 años provocando que los niveles actuales de gases de efecto invernadero en la atmósfera sean inéditos en los últimos 800 años.

Los principales agentes del incremento de emisiones son, como tradicionalmente lo han sido, el crecimiento poblacional y el desarrollo económico. El incremento poblacional sigue teniendo un efecto similar al de décadas pasadas, pero el efecto del desarrollo económico ha experimentado un acrecentamiento importante.

El 78% de las emisiones totales entre 1970 y 2010 fueron generadas por quema de combustibles fósiles o procesos industriales. Los incrementos de emisiones año a año son compuestas principalmente por: energía (47%), industria (30%) y transporte (11%).

Todo lo anterior nos lleva a la situación actual, donde el planeta se está calentando a una razón de 2.3 [W/m^2].

- **Sumideros térmicos**

Es muy probable que los últimos 30 años sean los más cálidos de los últimos 800 años. En el periodo 1850-2012, el aumento global promedio se puede observar en el Gráfico 9.

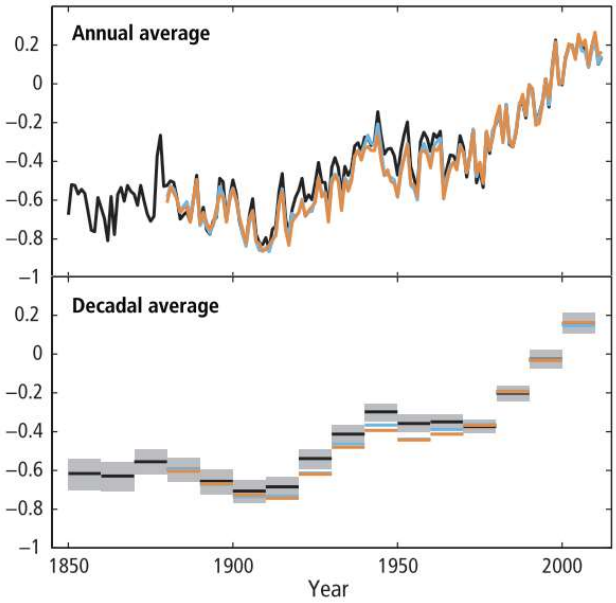


Gráfico 9: Temperatura mundial promedio anual y por década relativo al periodo de 1986-2005 en [ºC]. Fuente: Adaptado de [5].

En los océanos se ha depositado el 90% de la energía acumulada en los últimos 40 años y esto lo ha llevado a tener aumentos importantes en su temperatura promedio. Además, en las últimas décadas, grandes cantidades de hielo condensado en los polos han hecho perder masa a las láminas de hielo de la Antártida y Groenlandia, lo que ha influenciado incrementos en el nivel de altura del océano, el cual, como muestra el Gráfico 10, ha aumentado en 0.2 [m].

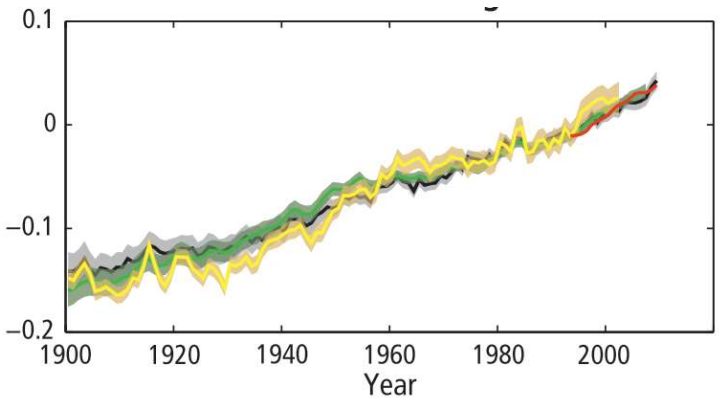


Gráfico 10: Promedio global de nivel del mar relativo al periodo 1986-2005 en [m]. Fuente: Adaptado de [5].

- **Efectos a corto plazo**

Cambios en la calidad y cantidad de los recursos hídricos en zonas de condensación de hielos. Estos también afectan ecosistemas, donde muchas especies cambian conductas, rutas e interacciones entre especies, debido a cambios en el ecosistema.

Zonas secas probablemente verán disminuidas sus precipitaciones anuales, mientras que lugares lluviosos las verán incrementadas.

- **Efectos a largo plazo**

Los glaciares seguirán disminuyendo en masa, mientras que el nivel del océano seguirá aumentando. Esto provocará, entre otras cosas, inundaciones de costas y sectores cercanos a la costa, las cuales afectarán a las poblaciones cercanas.

Crecerá el riesgo sistémico a eventos meteorológicos extremos que destruyan infraestructura existente y dificulte servicios básicos.

Riesgo de perder ecosistemas, biodiversidad y especies, tanto en la tierra como en el océano, junto con los productos derivados de estos.

La salud de las personas se verá afectada, ya que los problemas de salud existentes se verán incrementados a medida que esta situación avance. Esto ocurrirá especialmente en países no desarrollados.

Riesgo de inseguridad hídrica y alimenticia, particularmente en poblaciones pobres. Esto podría provocar conflictos, entre comunidades o países, por estos recursos y donde los sectores rurales serán los más afectados.

El cambio climático también afectará al desarrollo económico y a quienes dependen de él. Los índices de pobreza crecerán. El estancamiento económico y la escasez de recursos tendrán efectos en los desplazamientos migratorios de grandes cantidades de personas.

1.2 Hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y por consecuencia el más ligero y simple. En condiciones normales el hidrógeno es un gas diatómico altamente inflamable, insípido, inodoro e incoloro con la fórmula molecular H_2.

Debido a sus cualidades, usualmente se menciona el hidrógeno como un posible candidato a solucionar los problemas energéticos y ambientales de la actualidad [6].

1.2.1 Características generales

Este combustible es limpio (su combustión tiene como producto agua y energía), versátil (puede adaptarse a las tecnologías ya utilizadas), voluminoso pero denso energéticamente (es, de hecho, uno de los combustibles más energéticos por gramo. Aproximadamente tres veces la densidad energética de la gasolina). Puede ser producido a escala industrial y generarse a partir de diversas fuentes bajas en carbono [6].

El hidrógeno no es una fuente de energía sino más bien un portador de energía y cumple una función similar a la que cumple la electricidad. Es además un portador energético-

químico, lo cual es atractivo porque es acumulable y transportable, al igual que los combustibles fósiles como el gas natural, carbón, etc. Dentro del resto de los combustibles químicos, el hidrógeno es uno de los que alcanza mayores eficiencias al ser utilizado en procesos de combustión tradicionales.

Cuatro quintos de la demanda global de energía corresponden a necesidades de combustible fósil, no de electricidad. Justamente esta es una necesidad que el hidrógeno puede abastecer de una forma baja en emisiones. Algunos ejemplos de estos consumidores finales son: aviación, transporte, producción de acero, manufactura de químicos, calor industrial, calefacción de edificios, etc.

Permite que las energías renovables no convencionales tengan la opción de ser almacenadas en un combustible limpio y transportable, para ser utilizados en momentos de potencia variable o durante alta demanda. Además, una caída reciente en los precios de tecnologías de viento o solares ha mejorado las condiciones para la generación de hidrógeno renovable.

Finalmente, es importante tener algunas consideraciones de seguridad al tratar con este combustible:

- El hidrógeno es una de las moléculas más pequeñas y por lo tanto puede penetrar a través de algunos materiales.
- Tiene una alta velocidad de llama, amplio rango de ignición y bajo requerimiento de energía para esta, haciéndolo altamente inflamable.
- Tiene una llama invisible, incolora e inodora y por lo tanto es difícil detectar fugas.
- No es tóxico.
- Se disipa rápido en el ambiente.

1.2.2 Métodos de obtención

La producción de hidrógeno puede ser dividida, según la forma de energía utilizada, en dos: Por medio de energía eléctrica o por medio de energía térmica.

En esta sección se detallan formas de obtener tanto hidrógeno puro como mezclas de gases donde el hidrógeno es protagonista y a los que, en el caso de querer hidrógeno puro, se les tendría que realizar un proceso de filtración.

- **Clasificación**

La producción de hidrógeno puede ser clasificada de acuerdo a 3 criterios:

- La materia prima utilizada.
- La energía utilizada en el proceso.
- El producto obtenido.

Materia prima:

- Agua
- Combustibles
- Biomasa

Según fuente de energía se tiene:

- Energía eléctrica
- Combustible
- Energía solar concentrada

Según pureza del producto generado:

- Hidrógeno puro
- Gas de síntesis

En la Tabla 1-1 se muestra una distinción práctica adicional que depende la materia prima utilizada en la producción de hidrógeno.

Tabla 1-1: Tipos de hidrógeno según origen. Fuente: confección propia a partir de información en [6].

Color	Descripción
Negro	Obtenido a partir de carbón.
Gris	Obtenido a partir de gas natural.
Café	Obtenido a partir de lignita.
Azul	Obtención a partir de combustibles fósiles con la utilización de un dispositivo CCUS.
Verde	Obtenido a partir de electricidad con fuente renovable.

- **Métodos de Producción de hidrógeno.**

A continuación, se listan los principales métodos de generación de hidrógeno, junto a algunas características y su principio de funcionamiento.

a. Electrólisis

Utiliza como materia prima el agua y como fuente de energía la electricidad. Produce hidrógeno puro (H_2).

Energía eléctrica es utilizada para romper la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno, en un proceso llamado electrólisis. Ocupa un pequeño rol en la generación mundial de hidrógeno (menos del 0.1%), más que nada para suplir necesidades de hidrógeno de alta pureza. En el caso de que esta energía eléctrica utilizada sea producida por medios renovables no convencionales, este hidrógeno podría considerarse como un combustible de baja emisión [6].

Nueve litros de agua se necesitan para producir un kilogramo de hidrógeno, junto con ocho kilogramos de oxígeno como producto secundario. Esta es una inversión importante de agua en comparación a otros métodos de obtención de hidrógeno. Esta

agua debe ser de cierta pureza, ya que utilizar agua de mar se produce daño corrosivo en los equipos, además de generación de cloro.

El proceso de electrólisis tiene sus mayores costos en cuatro aspectos: CAPEX, eficiencia de conversión, electricidad y horas de operación anual. Esta tecnología tiene costos de producción de hidrógeno del orden de los 10 [USD/kgH_2] en condiciones optimistas.

b. Foto-electrólisis

Utiliza como materia prima el agua y como fuente de energía la luz solar. Produce hidrógeno puro (H_2). Consiste en utilizar directamente la luz solar para descomponer agua en oxígeno e hidrógeno [7].

c. Reformación de metano con vapor (SMR)

Utiliza agua y metano como materia prima, mientras que se utiliza el mismo metano como fuente de energía térmica al ser combustionado. Hidrocarburos más pesados (hasta nafta) pueden ser utilizados. Este proceso produce gas de síntesis, el cual en algunos casos estará contaminado con CO_2 dependiendo de la forma en la que se obtiene el calor de proceso.

El proceso consiste en separar el hidrógeno del metano, por medio de altas temperaturas (800-900 [ºC]) y el contacto del metano con el vapor de agua. Al utilizar el mismo metano como fuente de energía térmica además de como materia prima (30-40% del combustible total utilizado), el combustible final generado tendrá una gran parte de CO_2 en su composición. Esta combustión para obtener el calor de proceso puede ocurrir tanto dentro del reactor como fuera del él [8].

En la producción de hidrógeno con gas natural por medio de SMR se pueden reconocer dos fuentes principales de costos: El precio del combustible (entre 45 y 75%) y el CAPEX. El uso de equipos CCUS aumentan el costo del CAPEX y del combustible en aproximadamente 50% y 10% respectivamente. En general, las plantas de SMR con

CCUS logran obtener hidrógeno con un coste entre 1.4 [USD/kgH_2] y 1.5 [USD/kgH_2], siendo una de las tecnologías más baratas.

d. Oxidación parcial

Parecido a la reformación con vapor, pero utiliza aire en vez de agua como materia prima junto al metano. Produce gas de síntesis, el cual en algunos casos estará contaminado con CO_2 dependiendo de la forma en la que se obtiene el calor de proceso. Se puede utilizar la misma materia prima para producir el calor de proceso.

e. Digestión anaeróbica de biomasa

Se utiliza biomasa como materia prima y microorganismos como agentes de digestión. Produce biogás. En este proceso, los microorganismos mencionados digieren el material orgánico produciendo biogás.

f. Método Fotobiológico

Similar a la digestión anaeróbica de biomasa, utiliza microorganismos además de biomasa o agua para producir hidrógeno. Como fuente de energía se utiliza luz solar, la cual es utilizada por estos microorganismos para producir hidrógeno en condiciones anaeróbicas.

g. Gasificación de combustibles

Se utiliza combustible o biomasa como materia prima y energía térmica, ya sea solar concentrada o procedente de combustión, como energía de proceso. Gas de síntesis es el producto obtenido de la gasificación, el cual puede o no estar contaminado con CO_2 dependiendo de cuál es la fuente de energía utilizada.

El proceso de gasificación utiliza energía térmica y aire o vapor de agua a temperaturas superiores a los 1000 [K] para reformar los hidrocarburos de la materia prima en CO y H_2.

Los primeros gasificadores que fueron estudiados tenían un funcionamiento auto-térmico, los cuales utilizaban parte del combustible a gasificar como fuente de

temperatura para llevar a cabo la gasificación del resto, denominados “Gasificadores Auto-térmicos”. Del total de la materia prima carbonosa, los porcentajes de masa utilizados para llevar a cabo el proceso de gasificación en estos reactores varía: desde 5% al 25% para “Hot Gas Efficiency” (El calor latente de los gases producto es aprovechado) y de 25% al 35% para “Cold Gas Efficiency” (en caso contrario). Además, al utilizar aire como agente gasificador y de combustión, los gases productos se ven diluidos en N_2 y los procesos separadores son intensivos energéticamente [9].

Más recientemente se han desarrollado gasificadores que utilizan luz solar concentrada en lugar de combustibles para lograr las temperaturas de proceso, lo cual permite disminuir las concentraciones de CO_2 en el gas de síntesis obtenido. Existen distintas formas de funcionamiento para estos reactores:

- Lecho sólido: Un lecho sólido de materia prima es irradiado directa o indirectamente por luz solar concentrada, la cual lleva a esta materia prima a las temperaturas de proceso necesarias.
- Lecho fluidizado: En este reactor el lecho es fluidizado por un flujo de vapor de agua y luego irradiado por luz solar. Los grandes volúmenes de vapor de agua necesarios para la fluidización desplazan al gas de síntesis, reduciendo la producción y la eficiencia de conversión energética [10].

  La fluidización requiere tamaños de partícula bastante pequeños (<5 [mm]) y pequeñas diferencias entre sus tamaños. Esto complica la gasificación de combustibles heterogéneos y aumenta los costos de tratamiento de materia prima.
- Flujo de vórtice: En este tipo de gasificadores, una mezcla entre agua y combustible pulverizado es expulsado a través de una boquilla hacia la cámara de reacción. En ella, un flujo de vórtice generado por un gas inerte tomará esta mezcla y la transportará a lo largo de la cámara de reacción y hacia la salida del reactor [11]. Los grandes volúmenes de gas inerte necesarios para formar el flujo de vórtice desplazan al gas de síntesis, reduciendo la producción y la eficiencia de conversión energética.

- Flujo atrapado: En este tipo de reactores la mezcla vapor de agua-combustible pulverizado fluye continuamente por tubos de un material altamente conductivo térmicamente y absorbente de radiación, los cuales son irradiados directamente a través de una apertura lateral del equipo que contiene los tubos mencionados. Este modelo de gasificador tiene mejores propiedades de transporte de material a cambio de dificultades tratando con tamaños de partículas, los cuales deben ser bastante pequeños.

Además de los combustibles tradicionales (carbón, petróleo y gas natural) es posible gasificar varios tipos de biomasa. Sin embargo, este tipo de materia prima es complicada, ya que requiere de diversos tratamientos previos al proceso de gasificación, con el fin de evitar la formación de alquitranes o breas dañinos para componentes del gasificador. La gasificación de biomasa tiene como producto una mezcla de CO, CO_2, H_2 y CH_4 [6].

Los costos de inversión (CAPEX) y los costos de materia prima son los más altos de este tipo de tecnologías, siendo aproximadamente el 50% y el 20% de los costos totales respectivamente.

1.3 Realidad energética chilena

Al igual que la mayoría del planeta, actualmente Chile es un país con un crecimiento constante, creciendo un 4% el 2018 y con proyecciones de hacerlo en un 3.4% para el 2019 (previo al estallido social ocurrido a fines de octubre). Tiene además pretensiones de lograr el desarrollo en los próximos años. Esto tendrá como resultado una demanda creciente de energía que se tendrá que suplir [12][13].

Como se puede observar en la Tabla 1-2, la matriz energética chilena está compuesta casi en su totalidad por fuentes no renovables de energía, como el petróleo, el carbón, la biomasa o el gas natural los cuales abarcan el 92.9% de la demanda.

Tabla 1-2: Matriz energética chilena, año 2017. Fuente: Datos obtenidos de [14]

Fuente	Energía [TCal]	Porcentaje del total
Petróleo	179,943	43%
Biomasa	80,026	19.4%
Carbón	78,644	19.1%
Gas Natural	46,949	11.4%
Energía Hídrica	18,340	4.5%
Otras Renovables	7,034	1.7%
Biogás	923	0.2%
Total	**411,859**	**100%**

Además, como muestra la Tabla 1-3, de estos cuatro combustibles base (Petróleo, carbón, biomasa y gas natural) Chile importa la gran mayoría de ellos (74.36%), solo obteniendo la biomasa desde el territorio nacional (100%). De hecho, sin contar la biomasa, Chile importa el 94.06% de los combustibles utilizados. Prácticamente la totalidad (99%) del petróleo total utilizado es importado.

Tabla 1-3: Aporte de importaciones a matriz energética, año 2017. Porcentaje por materia prima y en comparación al presupuesto energético total. Fuente: datos obtenidos de [14].

Materia Prima	Energía [TCal]	%
Petróleo crudo	91,978	51.12%
Petróleo Refinaría	86,196	47.90%
Carbón	70,270	89.35%
Gas Natural	38,941	82.94%
Total	287,385	
% importado del total		69.78%

Otro factor importante a considerar, de forma paralela a la creciente demanda energética y la matriz energética sobrecargada de importaciones que la tendrá que suplir, corresponde al cambio climático severo que se está experimentando en el mundo.

Chile tiene siete de las nueve condiciones que hacen un país vulnerable al cambio climático [15], Debido a esto, es esperable que el país considere esta situación como

un problema de seguridad nacional y se vuelva un líder de la región en los temas relacionados con el cambio climático y el cómo revertirlo.

Como ya fue mencionado, uno de los agentes principales de este calentamiento global corresponde a las emisiones de gases de efecto invernadero, como los que se emiten al utilizar los combustibles fósiles que tan cruciales son para nuestra matriz energética [5].

Los tres sectores que más consumen combustibles para satisfacer sus necesidades energéticas son el transporte (103,101 [TCal] de petróleo), la generación eléctrica (147,700 [TCal] entre los cuatro combustibles tradicionales) y la industria (105,116 [TCal] entre los cuatro combustibles tradicionales).

El hidrógeno se presenta como una forma adecuada para solucionar los problemas de emisiones en estos sectores económicos, sobre todo el sector de transporte, si es que se logran encontrar las tecnologías y las condiciones para hacer de este hidrógeno un gas que no contribuya en las emisiones. Esto se debe a que, como se discutió anteriormente, existen formas de producir hidrógeno tanto con emisiones como sin ellas [6].

Afortunadamente Chile cuenta con significativas fuentes de energías renovables no convencionales en sus costas (energía mareomotriz y eólica), cordillera (energía geotérmica) y zona desértica (energía solar). Estas fuentes de energía y, como se discutirá más adelante, sobre todo la energía solar, pueden proveer del calor de proceso necesario para llevar a cabo la generación limpia y competitiva de hidrógeno.

1.4 Objetivos

En el marco del proyecto FONDAP "Solar Energy Research Center (SERC-Chile)" el presente trabajo tiene por objetivo general el desarrollo de pruebas experimentales a un reactor de lecho poroso inerte diseñado para la gasificación de combustibles sólidos de 5[kWt]. Los objetivos específicos son:

1. Analizar las ventajas de un gasificador solar irradiado directamente vs un reactor solar irradiado indirectamente.
2. Diseñar un reactor solar rotatorio, con especial énfasis en el estudio de la zona de recepción de calor.
3. Implementar la instrumentación para medir perfiles térmicos al interior del reactor solar.
4. Realizar pruebas experimentales en el reactor de lecho poroso inerte utilizando un sistema de aporte de calor desde un quemador radiativo.
5. Evaluar la eficiencia del proceso de transferencia de calor utilizando esferas sólidas y esferas huecas.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Gasificación

Como se explicó anteriormente, la gasificación es un proceso por el cual se transforma una materia prima, la cual puede ser un combustible o biomasa compuesta de hidrocarburos, en un gas de síntesis compuesto de monóxido de carbono e hidrógeno, utilizando vapor de agua o aire junto a una fuente de energía térmica, la cual generalmente corresponde a la combustión de parte de la materia prima a gasificar pero que puede ser intercambiada por luz solar concentrada.

La reacción general simplificada que gobierna el proceso de gasificación está representada en la Ecuación 1, donde x e y corresponden a las fracciones molares elementales de H/C y O/C respectivamente, las cuales cambian para los distintos tipos de combustible. Cabe destacar además que esta ecuación no considera la humedad del combustible [11].

$$C_1H_xO_y + (1-y)H_2O = \big((x/2) + 1 - y\big)H_2 + CO$$

Ecuación 1: Ecuación general de gasificación. Fuente: Adaptado de [11].

La Ecuación 1 resume el proceso en general, pero es oportuno considerar las distintas reacciones intermedias que la componen. Todas las ecuaciones descritas a continuación dependen de la temperatura, presión y la razón carbono/oxígeno. Estas son [16][11]:

$$C_{(s)} + CO_2 = 2CO, \qquad \Delta H_{298K} = 172\ [kJ/mol]$$

Ecuación 2: Reacción de Boudouard. Fuente: Adaptado de [11].

$$C_{(s)} + 2H_2 = CH_4, \qquad \Delta H_{298K} = -75\ [kJ/mol]$$

Ecuación 3: Rotura de metano, hidrogasificación. Fuente: Adaptado de [11].

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2, \qquad \Delta H_{298K} = 206\ [kJ/mol]$$

Ecuación 4: Reformación, metanización. Fuente: Adaptado de [11].

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2, \qquad \Delta H_{298K} = -42\ [kJ/mol]$$

Ecuación 5: Cambio Agua-Gas. Fuente: Adaptado de [11].

Estas reacciones ocurren entre los 700 K y los 1,200 K. Posterior a esta temperatura, el proceso de gasificación llega a su fin, obteniendo como resultado una fase gaseosa consistente de H_2 y CO en proporciones determinadas por (x/2 + 1 - y) (Ecuación 1) el cual varía según el combustible que se está gasificando. La relación H_2/CO determinará la calidad del gas de síntesis y varía entre 1.14 (Hulla) y 1.27 (Carbón Bituminoso) para los valores de combustible en la Tabla 2-1. El Gráfico 11 muestra la variación en la composición del gas de síntesis en el proceso de gasificación, en función de la temperatura, para carbón antracitico. Este Gráfico 11 es bastante similar para los otros tipos de carbón.

Tabla 2-1: Composición química elemental por masa, LVH y razones molares de las especies quimicas H/C y O/C para cuatro tipos de carbón. Fuente: Adaptado de [16].

Tipo de carbón	**hulla**	**Lignita**	**Bituminoso**	**Antracita**
C	58.2	71.4	82.6	92.2
H	5.63	4.79	4.97	3.3
O	34.02	21.87	9.38	3.37
N	1.94	1.34	1.55	0.15
S	0.21	0.6	1.5	0.98
LHV [kJ/kg]	23,500	28,500	34,000	35,700
H/C [mol/mol]	1.16	0.81	0.72	0.43
O/C [mol/mol]	0.44	0.23	0.09	0.03

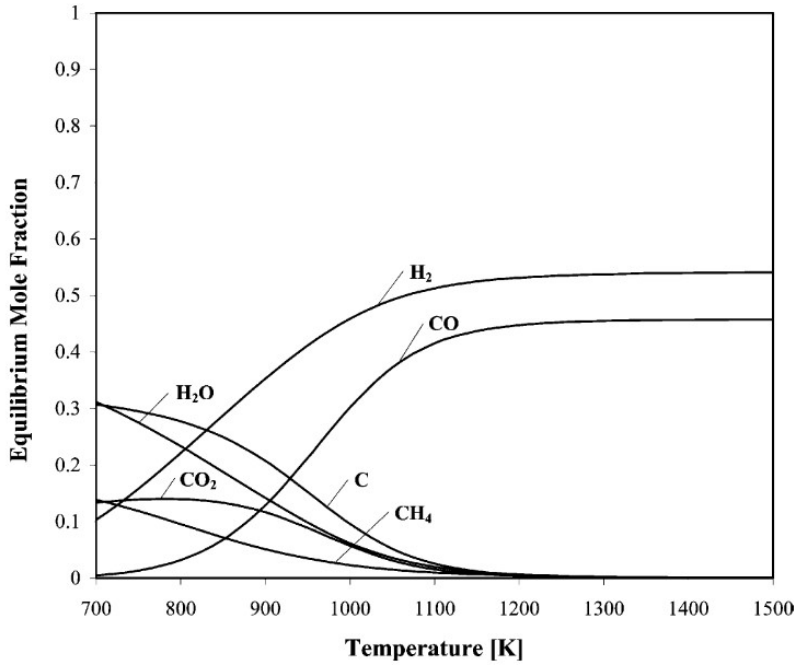


Gráfico 11: Composición molar del sistema de la Ecuación 1 en función de la temperatura, para carbón antracita seco y des-sulfurado. Fuente: Adaptado de [16].

2.2 Gasificador solar de combustibles carbonosos sólidos

En comparación a los gasificadores auto-térmicos mencionados en la sección anterior, los gasificadores solares, como el que se muestra en la Figura 1, utilizan luz solar concentrada como calor de proceso. Esta luz solar es concentrada por medio de heliostatos ubicados en un campo solar [9]. La ventaja de convertir la radiación solar en un combustible químico es la producción de un portador energético almacenable, versátil y transportable, ampliando la cantidad de sectores energéticos que la luz solar podría abastecer de energía [17].

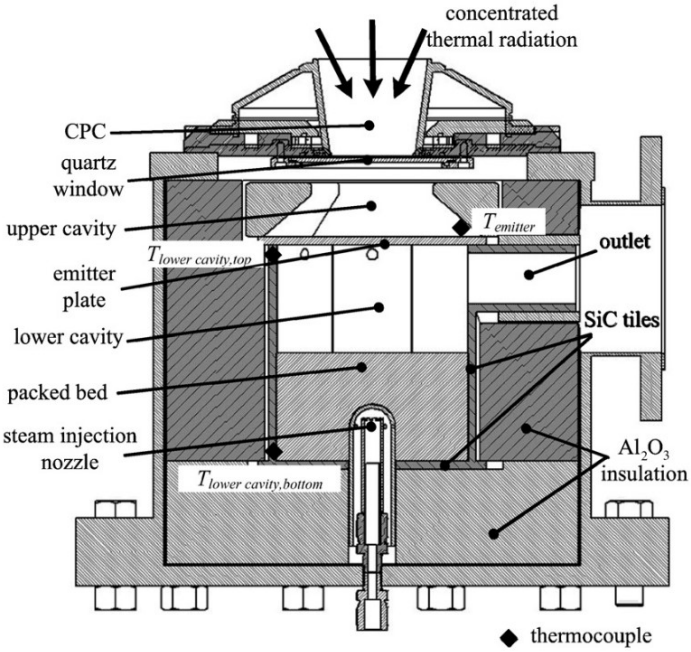


Figura 1: Esquema de un gasificador solar de radiación indirecta, con ventanilla y extracción lateral de productos. Fuente: Adaptado de [18].

Los gasificadores solares poseen las siguientes ventajas en comparación a los gasificadores auto-térmicos [9]:

- Gases producto sin contaminantes derivados de la combustión, como NO_x o CO_2. Este último si está presente, pero en considerablemente menor cantidad.
- Al no utilizar aire en el proceso de combustión, se evita la presencia de N_2 en los gases producto, al igual que el resto de los componentes del aire.
- Mayor eficiencia de conversión energética al gasificar todo el combustible en vez de utilizar parte de el para proporcionar el calor de proceso y llevar a cabo la reacción.
- Se incrementa el valor energético del combustible al almacenar parte de la energía solar utilizada en la reacción endotérmica.

- En términos de aprovechamiento de energía solar, la intermitencia solar deja de ser una problemática, al quedar esa energía almacenada en un combustible fácilmente transportable, limpio y disponible en cantidades definidas por el consumidor.

Uno de los problemas más significativos de los gasificadores solares en comparación a los gasificadores auto-térmicos corresponde a las transiciones térmicas provocadas por la intermitencia de las condiciones solares. Es por esto que es necesario utilizar materiales capaces de soportar shocks térmicos y altas temperaturas. Materiales candidatos para esta tarea pueden ser el SiC y el grafito recubierto de SiC, los cuales pueden trabajar a temperaturas superiores a 1,300 K y han mostrado resistencia al shock térmico.

Otro problema relacionado con la intermitencia solar corresponde a la posible disminución de potencia durante la producción de gas de síntesis. Debido a esto, sería interesante la posibilidad de almacenar energía térmica por otros medios en los momentos en los cuales se alcancen potencias solares superiores a la media, con el propósito de hacer uso de ella durante los ya mencionados periodos de baja radiación.

Un análisis de segunda ley (energía) a un ciclo Brayton-Rankine operado con gas de síntesis generado a partir de gasificación de carbón por medio de tecnología solar indicó que es posible doblar la generación eléctrica por unidad de masa de carbón gasificado y por lo tanto también evitar la mitad de las emisiones de CO_2 generados en el caso de utilizar ese carbón de forma convencional. En la misma línea, ese autor considera que, debido a lo ya señalado, esta tecnología tiene el potencial de ser competitiva económicamente incluso antes de recibir apoyo económico gubernamental [10].

2.2.1 Radiación directa versus radiación indirecta

Una de las preguntas de diseño más importantes en la construcción de este tipo de equipos corresponde a la utilización o no de una pared absorbente-radiante para separar

la apertura y su ventanilla de los gases producidos al interior del reactor. Los argumentos a favor de ambas opciones de diseño se presentan a continuación.

- **Radiación Directa**

En este tipo de reactores, la única barrera entre la luz solar concentrada y el combustible a gasificar es una ventanilla (usualmente de cuarzo). Debido a esto, se logra alcanzar altas temperaturas en el sector del combustible que está directamente en contacto con este flujo solar. Estas altas temperaturas favorecen la transferencia de calor al interior del reactor, pudiendo así lograr mejores velocidades de gasificación ($\sim 1{,}000[K/s]$) [10].

Este contacto directo entre la radiación y el lecho sólido trae consigo una problemática en la ventanilla, ya que es necesario que este componente se mantenga limpio e íntegro en su estructura para tener un buen funcionamiento. Esto se ve alterado debido a que este tipo de procesos térmicos y químicos producen atmósferas y presiones adversas para estos componentes, por lo que es necesario estar activamente limpiándola y enfriándola con un flujo de gas inerte frío. Este flujo de gas inerte produce finalmente un sumidero térmico indeseable. Este problema solo se acrecentara a la hora de escalar este tipo de diseños a tamaños industriales [9].

Estos gases inertes utilizados en la limpieza de la ventanilla traen consigo menores eficiencias de conversión energética, ya que desplazan al gas de síntesis generado en el proceso, haciendo de este gas de síntesis un producto de menor calidad por unidad de masa.

- **Radiación Indirecta**

Este diseño de gasificador solar propone utilizar una pared, cuya principal función será la de separar la atmósfera adversa de la reacción química de la ventana situada en la apertura. De esta manera se evade el problema del sumidero térmico en la ventana a cambio de menores temperaturas máximas en el combustible y por lo tanto menores velocidades de proceso.

Considerando esta pared, podemos separar el diseño de gasificador solar indirecto en cuatro componentes:

- Apertura
- Cavidad Solar
- La pared o “Placa Emisora”
- Cavidad gasificadora

La existencia de la cavidad solar en los reactores de radiación indirecta tiene dos ventajas principales: La separación que existe entre la ventana y el combustible a gasificar permite que la ventana se mantenga limpia con mayor facilidad que en reactores de radiación directa. Además, permite al reactor mantener una inercia térmica que facilita la operación en momentos donde existe intermitencia de luz solar o shock térmico [18][19].

La placa emisora es un componente de vital importancia en este tipo de reactores, ya que cumple la función de recibir la radiación solar para luego transferirla hacia la cavidad gasificadora. Debido a la menor transferencia de calor que estos tipos de reactores posee, el material de esta pared es de suma importancia y debe cumplir con varios criterios:

- Alta temperatura de trabajo ($> 1{,}500K$), ya que esta temperatura definirá la temperatura máxima de trabajo del reactor.
- Inercia a las reacciones químicas que ocurrirán al interior del reactor.
- Alta conducción térmica.
- Alta absortancia.
- Resistencia al shock térmico.

Además, debido a que la transferencia de calor es un problema, es usual que estos reactores tengan mecanismos que favorezcan ese aspecto del funcionamiento. Algunos ejemplos de esto son la utilización de tamaños de partícula determinados, materiales de pared que permitan la transferencia de calor por conducción a través de ellos, los

fluidos de trabajo, como sales fundidas, metales líquidos o gases, o mecanismos que permitan el movimiento del combustible al interior del reactor.

Otro punto a favor a considerar en gasificadores solares irradiados indirectamente corresponde a la posibilidad de tratar con distintos tipos de combustible, pudiendo producir gas de síntesis de alta calidad en todos los casos. En este contexto, esta tecnología puede ser vista como una solución viable para tratar desechos carbonosos o combustibles de menor calidad, con el valor agregado de almacenar energía solar.

2.2.2 Cavidad Solar

La cavidad solar en los reactores solares irradiados indirectamente tiene la función de actuar como receptor solar, emisor térmico uniforme y absorbente de shock térmico. Es por esto que es de vital importancia definir sus variables. En la Figura 2 se puede observar un esquema de esta cavidad con sus partes y flujos involucrados.

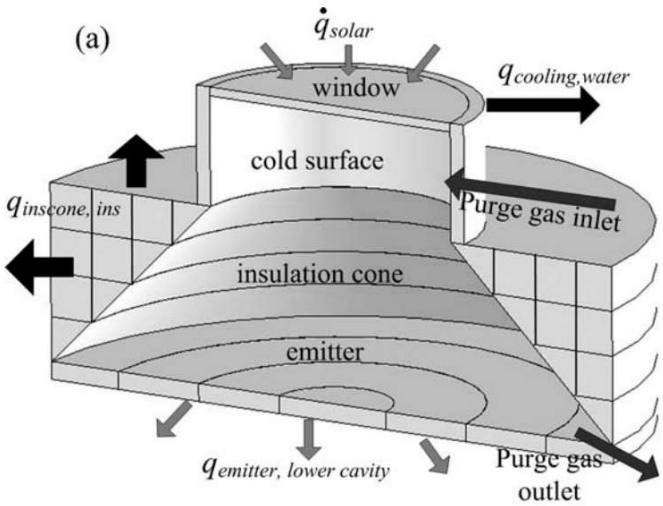


Figura 2: Esquema de transferencia de calor en una cavidad solar de un gasificador solar de radiación indirecta con ventanilla. Fuente: Adaptado de [10].

Respecto del diseño de esta parte del gasificador, es necesario considerar los siguientes aspectos:

- El tamaño de la apertura.
- La presencia o no de un Concentrador Parabólico Compuesto.
- La existencia o no de una ventanilla.
- La forma y material de las bridas que sostendrán la placa emisora.

Respecto de estos temas, la literatura existente indica lo siguiente:

- **Apertura**

El tamaño óptimo de la apertura por la cual ingresará la luz solar concentrada al reactor corresponde a un intercambio entre la cantidad de energía solar que se quiere recepcionar (mientras más grande la apertura, un flujo más grande de energía solar podría ser absorbida por el reactor) y la cantidad de energía que se está dispuesto a liberar como re-radiación (mientras más grande la apertura, mayor cantidad de energía será liberada por re-radiación). Las variables que influenciarán el tamaño ideal de apertura corresponden a la temperatura de trabajo y por ende de la placa emisora ($\sim 1{,}300\ K$) y la distribución del flujo solar en el plano focal [11] [20].

A temperaturas sobre los 1,000 K, la pérdida de energía por re-radiación a través de la apertura conforma gran parte de la pérdida de energía total. Por otra parte, si la apertura es suficientemente pequeña en comparación al tamaño de la cavidad, la cantidad de energía liberada de vuelta al ambiente a través de la apertura se convierte en despreciable, independiente de la absortancia de las paredes internas de la cavidad.

Debido a reflexiones constantes de radiación al interior de la cavidad y entre las paredes de esta, la absortancia total de la cavidad es superior a la absortancia individual de las paredes al interior de la cavidad. Para mejorar esta condición, se recomienda utilizar, en las paredes no destinadas a absorber radiación solar, materiales altamente reflectivos a radiación, sobre todo infrarroja [20].

Idealmente, para una cavidad receptora de radiación perfectamente aislada, es decir, sin pérdidas por conducción o convección, la eficiencia de absorción está dada por la Ecuación 6. Esta suposición implica un sobredimensionamiento de la eficiencia de

absorción (η_{abs}) pero nos entrega un valor máximo al cual aproximarse. El objetivo es entonces maximizar η_{abs}, ya que esto nos entregará el radio óptimo de apertura.

$$\eta_{abs} = \frac{\alpha_{eff} P_{ap} - \epsilon_{eff} \pi {r_{ap}}^2 \sigma {T_{nom}}^4}{P_{in}}$$

Ecuación 6: Eficiencia de absorción de una cavidad solar perfectamente aislada. Fuente: Adaptado de [20].

Asumiendo un equipo isotérmico y perfectamente aislado, con una ventanilla no selectiva, se puede considerar el equipo como un cuerpo negro con $\alpha_{eff} = \epsilon_{eff} = 1$. Luego, es posible considerar el flujo concentrado que entra en el equipo (P_{ap}) como un flujo solar gaussiano de la forma presentada en la Ecuación 7, con los valores más importantes F_{peak}, la máxima densidad energética en el flujo solar, y μ_{solar}, la desviación estándar de esa densidad energética en el flujo.

$$P_{ap} = F_{peak} \cdot e^{\left({-r_{ap}^2}/{2\mu_{solar}^2} \right)}$$

Ecuación 7: Potencia a través de la apertura para un flujo solar de distribución gaussiana. Fuente: Adaptado de [20].

Al maximizar la Ecuación 6 se obtiene que, para un flujo solar y las suposiciones ya descritas, el radio óptimo de trabajo viene dado por la Ecuación 8, la cual depende de la temperatura nominal del equipo, y las condiciones del flujo solar. Como se puede observar en la Ecuación 8, la condición $0 < \sigma T_{nom}^4 < F_{peak}$ debe darse para que la solución sea real.

$$r_{opt} = \left(-2\mu_{solar}^2 \cdot ln\left(\frac{\sigma T_{nom}^4}{F_{peak}} \right) \right)^{1/2}$$

Ecuación 8: Radio óptimo de trabajo para un equipo idealmente aislado y un flujo solar de distribución gaussiana. Fuente: Adaptado de [20].

Finalmente, es concluido en [20] que los factores: T_{opt}, (r_{opt}/μ_{solar}) y η_{abs} dependen únicamente de F_{peak}, por lo que, como se muestra en el Gráfico 12, se puede tener una idea bastante clara de los valores de F_{peak} y μ necesarios para tener un funcionamiento óptimo.

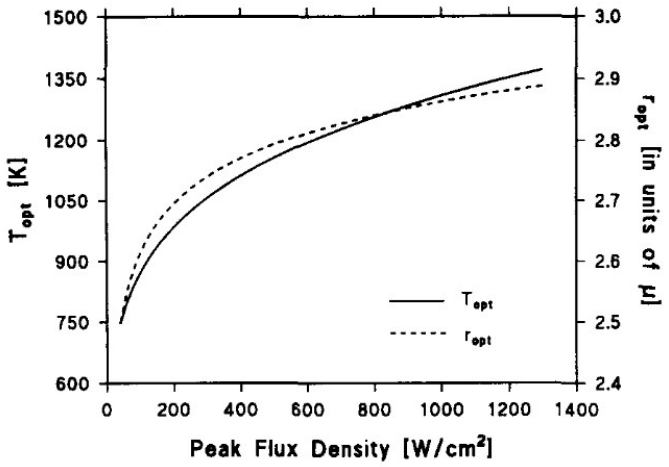


Gráfico 12: Tamaño óptimo de apertura y temperatura óptima de funcionamiento, para un reactor solar ideal, en función de la densidad energética "peak" del flujo solar. El radio de la apertura se encuentra en unidades de la desviación estándar. Fuente: Adaptado de [20].

- **Concentrador Parabólico Compuesto (CPC)**

En directa relación con el punto anterior, la función de un CPC es la de re-concentrar, la radiación ya concentrada por el campo solar, justo a la entrada del reactor. Esto permite que la apertura pueda ser más pequeña sin sacrificar gran parte del flujo solar disponible, logrando así mejores eficiencias [11], [18], [19].

- **Ventanilla**

La presencia o no de una ventanilla en un reactor solar irradiado indirectamente, tiene que ver con dos aspectos importantes a considerar: La eficiencia térmica esperada del reactor, ya que es necesario enfriar esta ventanilla constantemente para evitar su fractura, y con la protección de la placa emisora y los otros componentes al interior de

la cavidad solar, los cuales podrían reaccionar con la atmósfera (el grafito por ejemplo) [21].

Usualmente es cuarzo el material elegido para esta función ya que este posee características positivas en esta aplicación:

- Su alta resistencia mecánica a elevadas temperaturas y gradientes de temperatura.
- Su transmisividad de amplio espectro.
- Su reflectividad a rayos infrarrojos, como los emitidos por los cuerpos a alta temperatura al interior de la cavidad solar.

Respecto de la eficiencia de conversión energética, en [22] se encontró que este valor mantiene similares órdenes de magnitud al comparar reactores con y sin ventanilla.

- **Bridas o anillos para placa emisora**

Estas bridas se encargan de mantener la placa emisora en la posición adecuada dentro del reactor, además de separar, en conjunto con la placa emisora y una empaquetadura, herméticamente las cavidades gasificadora y solar.

Al estar estas partes en contacto directo con la placa emisora, la cual se encuentra a altas temperaturas, y con la atmósfera, en caso de que la cavidad solar no haya sido sellada herméticamente, es necesario considerar la posibilidad de que estos artefactos reaccionen o se oxiden.

2.2.3 Placa emisora

La principal función que cumple este componente en los reactores de este estilo es la de separar los compuestos involucrados en el proceso de gasificación de la ventanilla situada en la apertura, permitiendo así mantenerla limpia y facilitar su enfriamiento. [18]

Se transforma entonces la placa emisora en una pieza crucial en el funcionamiento de este tipo de gasificador, ya que debe absorber la energía solar concentrada que entra por la apertura, conducirla hasta su otra cara y luego emitirla por medio de radiación o conducción al combustible que se encuentra en la cavidad gasificadora. Teniendo esto en cuenta, se identifican las siguientes características, las cuales debe tener el material a utilizar para esta función [21],[19],[9]:

- Alta absortancia y emitancia.
- Resistencia al shock térmico provocado por la intermitencia solar.
- Buena conducción térmica.
- Elevadas temperaturas de trabajo (≤1,500 K).
- Inerte ante las reacciones químicas del proceso.

El material más idóneo para llevar a cabo esta función según [9] corresponde al grafito recubierto con SiC, ya que cumple todas las condiciones listadas.

El área superficial de la placa emisora que da hacia la cavidad solar debe ser lo más pequeña posible sin sacrificar la absorción de la radiación solar, con el fin de evitar la re-radiación por la apertura.

Entre la placa emisora y las bridas que las sostienen deben ir dos empaquetaduras que permitan sellar herméticamente la cavidad gasificadora. Estas empaquetaduras deben poder trabajar a altas temperaturas ($\sim 1{,}700\ K$) e idealmente no ser buenas conductoras térmicas, para así no transferir calor hacia las bridas [22].

2.2.4 Cavidad Gasificadora

En esta cavidad es donde se llevará a cabo el proceso de gasificación del combustible. Como fue mencionado anteriormente, el principal desafío de este sector del reactor corresponde a mejorar la transferencia de calor en su interior y así lograr mejores velocidades de gasificación. Los mecanismos por los cuales se puede lograr esto se detallan a continuación.

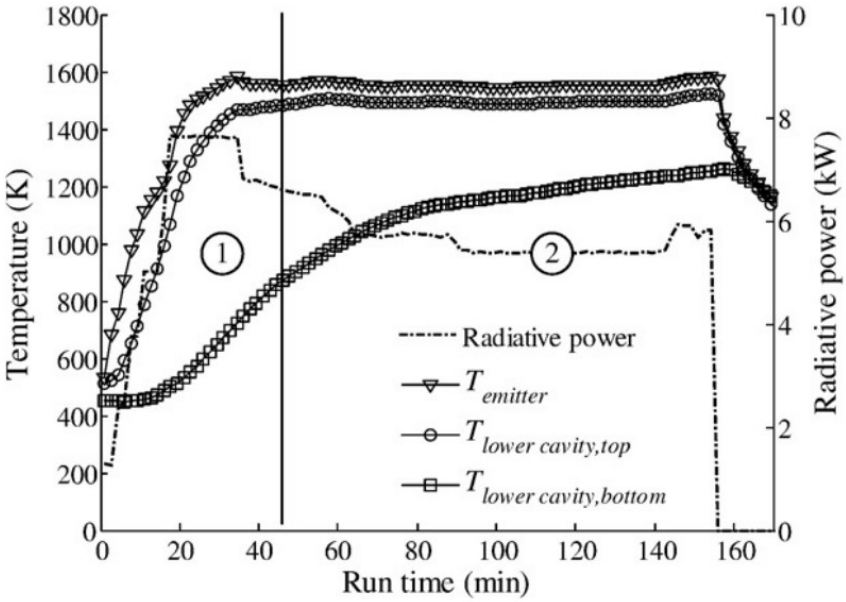


Gráfico 13: Temperaturas dentro de la cavidad solar de la Figura 1 durante la gasificación de carbón sudafricano. Fuente: adaptado de [18].

En primer lugar, es necesario que esa cavidad se encuentre debidamente aislada y así disminuir lo más posible las pérdidas por conducción a través de las paredes laterales. Las cuales, junto a las pérdidas convectivas a través de una apertura, con o sin ventanilla, corresponden a significativas pérdidas de energía en este tipo de gasificadores [21], [20].

Por sobre los 1,300 K el principal mecanismo de transferencia de calor al interior de esta cavidad es la radiación. Por medio de este mecanismo el coeficiente de conductividad térmica efectiva se ve incrementado siete veces. Además, una vez que se alcanzan las temperaturas de reacción en las áreas cercanas a la placa emisora, es menor la cantidad de energía necesaria para mantener estas temperaturas. Esto se debe a la ya mencionada inercia térmica que los reactores de dos cavidades poseen y también a la reacción endotérmica que se está llevando a cabo [9], [18].

Debajo de esta temperatura, el principal mecanismo de transferencia de calor corresponde a la conducción, lo cual no es idóneo. Se sugiere entonces utilizar medios

auxiliares con buena transferencia de calor. Por ejemplo, ha habido estudios que analizan las sales fundidas como medio, obteniendo buenos resultados, incrementando la velocidad de la reacción de pirólisis en un 74% y aumentando la velocidad de gasificación en un orden de magnitud. Además, presenta otros beneficios:

- Mejorar la transferencia de calor.
- Funciona como catalizador, reduciendo la temperatura necesaria para la reacción.
- Permite un menor tiempo para alcanzar un funcionamiento estacionario.
- Mayor estabilidad entre estados transientes.
- Potencial para almacenar energía y operar en periodos de baja radiación.

Otro mecanismo útil para mejorar la transferencia de calor corresponde al de conducción por las paredes hacia el fondo del lecho. Esto se realiza eligiendo un material idóneo para esta cavidad. Según [21], este material debe ser un cerámico que posea una buena resistencia al shock térmico, como el SiC.

En [9] se indica que al generarse el gas de síntesis cerca de la ventanilla y teniendo la extracción de este gas en la parte trasera del reactor, se obliga a este gas pasar por todo el resto del lecho sólido, transfiriendo parte de su calor latente a este, a modo de precalentamiento, lo cual mejora la eficiencia térmica del equipo.

Finalmente, se observa que la velocidad de reacción depende de la profundidad del lecho sólido, y tiene un máximo que podría estar dentro de los límites de operación, por lo que es de importancia encontrar este valor. Esto se debe a que, a grandes profundidades de lecho, la inercia térmica del lecho cobra predominancia por sobre el incremento en masa disponible para la reacción.

2.3 Concentración solar

El primer paso en el proceso de gasificación solar de combustibles carbonosos corresponde a la absorción y conversión de radiación solar en calor, utilizando

reflectores o colectores solares que luego transmiten esta energía hasta el reactor. Esto se logra en primer lugar utilizando espejos programados para seguir la trayectoria solar, llamados “colectores” o “heliostatos”. La Figura 3 muestra los 4 tipos de concentración más utilizados para este tipo de funciones [17].

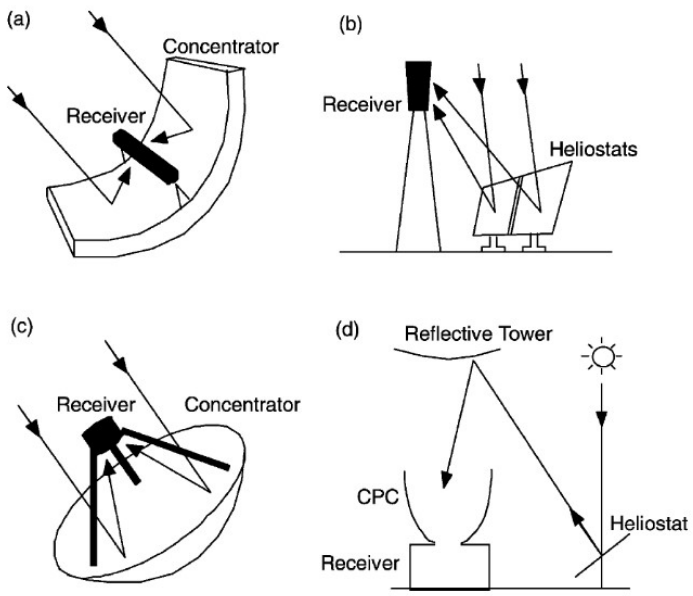


Figura 3: Métodos de concentración solar en gran escala: (a) cilindro parabólico, (b) torre central, (c) disco parabólico y (d) doble concentración. Fuente: Adaptado de [17].

Como se mostró en el Gráfico 11, solo tecnologías que puedan alcanzar 1200 K podrán ser utilizados para llevar a cabo el proceso de gasificación. Debido a esto, los colectores cilindro parabólicos (a) no pueden ser utilizados, ya que alcanzan temperaturas entre los 500 y 700 K. Los otros tres colectores presentados en la Figura 3 son capaces de alcanzar estas temperaturas y tienen las siguientes características:

- **Sistema de torre de poder central**

Este sistema consiste en un campo de heliostatos con seguimiento solar, los cuales concentran la radiación en el receptor ubicado en la cúspide de la torre central. Este tipo de sistemas de concentración son capaces de lograr concentraciones entre 300 y 1,500 [-], y temperaturas hasta 1,600 K.

- **Sistema de disco parabólico**

En estos sistemas se utiliza un disco parabólico de gran tamaño (400 [m^2] en la Universidad Nacional de Australia) para concentrar la radiación en un receptor térmico. Estos sistemas alcanzan concentraciones entre 1,000 y 5,000 [-] y temperaturas sobre los 1,800 K.

- **Sistema de doble concentración solar**

Corresponde a un campo de heliostatos que concentran la radiación solar en una torre reflectiva, la cual refleja la radiación hasta un receptor en el piso, el cual tendrá un sistema propio de concentración solar. Este tipo de sistemas logran concentraciones entre 5,000 y 10,000 [-] y temperaturas por sobre los 1,500 K.

2.4 Medios porosos

Es importante mencionar que existen dos tipos de medios porosos involucrados en este trabajo, los cuales es necesario diferenciar antes de continuar, y así prevenir alguna confusión en el resto de este trabajo.

El primero corresponde a una esponja cerámica destinada a proporcionar radiación térmica a partir del proceso de combustión que ocurre en su interior, simulando de cierta forma un flujo solar concentrado. Esta combustión transfiere energía térmica hacia la esponja, elevando su temperatura hasta niveles que le permitan emitir radiación de manera constante en dirección del reactor diseñado. Este medio poroso será denominado como “quemador poroso” en este trabajo.

El segundo medio poroso utilizado corresponde a un conjunto de esferas de alúmina (sólidas y huecas) ubicadas al interior de la cavidad gasificadora del reactor diseñado. Estas esferas están destinadas a mejorar las condiciones de transferencia de calor al interior de la cavidad mencionada, y así mejorar también las condiciones de gasificación en las futuras utilizaciones de este equipo. Este medio poroso será denominado como “lecho poroso inerte” en este trabajo.

2.4.1 Quemador poroso

El quemador poroso permite mejorar las condiciones de combustión en diversos aspectos. Esto se debe a que la ignición y reacción de mezclas gaseosas ocurre más rápidamente en superficies sólidas. Los factores que controlan el proceso de combustión en quemadores porosos corresponden a la turbulencia, la intensificación de la transferencia de calor y la ramificación de la cadena de reacciones dentro de los poros [23].

La llama producida en la combustión calienta por convección el medio sólido donde se encuentra y este, a su vez, precalienta por medio de conducción y radiación la mezcla de gas aguas arriba del sector de combustión. Este calor recirculado provoca una zona de temperaturas súper adiabáticas que permiten mayores velocidades de reacción. Esto permite, a su vez, que mezclas pobres de aire combustible tengan rangos más amplios de estabilidad.

Se ha reportado la posibilidad de alcanzar una combustión completa en condiciones de exceso de aire de hasta 2.7 y velocidades de llama de 8 a 10 veces más altas que en llamas libres.

El mérito de los quemadores porosos es doble, ya que logran altas potencias de radiación y además son capaces de funcionar con una mezcla pobre (con exceso de aire), lo que finalmente resulta en una disminución del consumo de combustible.

- **Radiación térmica**

La potencia radiativa se calcula utilizando la temperatura promedio superficial y la Ecuación 9. En cuanto a la emisividad de la superficie empleada en el quemador, se utilizó 0.85, obtenido desde [24].

$$P = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4$$

Ecuación 9: Potencia radiativa de una superficie.

2.4.2 Transferencia de calor a través de un lecho poroso inerte

Se tiene, al interior de la cavidad gasificadora, un lecho poroso inerte compuesto de esferas de alúmina, a través del cual no existe un flujo de gases capaz de generar convección forzada. Se debe entonces considerar la radiación entre las esferas y la conducción a través de los contactos entre ellas como fuentes principales de transferencia de calor.

Se opta por combinar ambos procesos en un factor que simbolice el comportamiento de transferencia de calor suponiendo que todo este flujo es transferido por el método de conductividad térmica. A este término se le denomina conductividad térmica efectiva (k_{eff}) del lecho poroso inerte. A continuación, se presenta la forma de calcular dicho término.

- **Porosidad**

Propiedad de los lechos porosos inertes y otros medios porosos. Corresponde a la porción del volumen total no utilizado por el material sólido del lecho poroso inerte. En este caso ese espacio es utilizado por aire, por lo que se puede calcular como se muestra en la Ecuación 10.

$$\varphi = \frac{V_{aire}}{V_T} = \frac{V_T - V_{esf}}{V_T}$$

Ecuación 10: Porosidad de un lecho sólido. Fuente: Confección propia.

En el caso de las esferas huecas, no es considerado el núcleo de aire en el cálculo de la porosidad, ya que esta se encuentra fuera del modelo presentado.

- **Conductividad de una esfera hueca**

Se puede asumir una esfera hueca de radio r_s y espesor de cáscara de t_{esf} con una conductividad de cáscara y de núcleo de k_c y k_n respectivamente, como una esfera sólida del mismo radio (r_s) y con una conductividad de k_s utilizando la relación

mostrada en la Ecuación 11. Esta ecuación no considera los efectos de la radiación a través del núcleo interior de este tipo de esfera. [25]

$$k_s = k_c \cdot \frac{3 + \left(\frac{k_n}{k_c} - 1\right) \cdot (1 + 2\nu)}{3 + \left(\frac{k_n}{k_c} - 1\right) \cdot (1 - \nu)} \; ; \nu = \left(1 + \frac{t_{esf}}{r_s}\right)^{-3}$$

Ecuación 11: Equivalencia entre la conductividad de una esfera hueca y una esfera sólida. Fuente: Adaptado de [25].

- **Conductividad efectiva del lecho poroso inerte**

Una vez determinada la conductividad del material sólido del lecho poroso inerte, se procede a calcular la conductividad efectiva del lecho por medio de considerar el término relacionado con la conductividad y el relacionado con la radiación, como se muestra en la Ecuación 12.

$$k_{eff} = k_{cond} + k_{rad}$$

Ecuación 12: Conductividad efectiva del lecho poroso inerte. Fuente: adaptado de [26].

La porción de la conductividad efectiva que tendrá que ver con la conductividad misma tendrá que ver con la porosidad del lecho y con la cantidad de calor que pueda ser transferido a través de los contactos entre esferas de alúmina. Este último es considerado como el 0.5% de la conductividad del material mismo. La Ecuación 13 presenta su cálculo [27]:

$$k_{cond} = (1 - \varphi) \cdot k_s \cdot 0.005$$

Ecuación 13: Conductividad de un lecho sólido. Fuente: Adaptado de [26].

La porción de la conductividad efectiva que tendrá que ver con la radiación de los cuerpos sólidos al interior del lecho poroso inerte tendrá que ver con la temperatura del cuerpo y la radiación que eso supone, además de nuevamente depender de la porosidad del lecho, como se muestra en la Ecuación 14.[26]

$$k_{rad} = \frac{32 \cdot \sigma \cdot d_{esf} \cdot \varphi \cdot T_{esf}^3}{9 \cdot (1 - \varphi)}$$

Ecuación 14: Porción radiativa de la conductividad efectiva del lecho. Fuente: Adaptado de [26].

Como ya fue mencionado, esta ecuación no considera los efectos de la radiación a través del núcleo de las esferas huecas. Este método de transferencia de calor no es considerado ya que no existe un modelo que lo abarque.

- **Difusividad Térmica**

La difusividad térmica, presentada en la Ecuación 15, representa la razón entre el calor conducido a través del material en cuestión y el calor almacenado en él, por lo que representará finalmente que tan rápido se propaga el calor a través del material.

$$a[m^2/s] = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

Ecuación 15: Difusividad térmica de un material. fuente:[28].

Otro valor de interés, que además es derivado de este concepto, corresponde a la difusividad térmica lineal, la cual permite conocer la difusividad térmica por unidad de área transversal del medio en cuestión. Este concepto se presenta en la Ecuación 16.

$$B[s^{-1}] = \frac{a}{A} = \frac{k}{\rho \cdot A \cdot c_p}$$

Ecuación 16: Difusividad térmica lineal. Fuente: confección propia.

- **Conductividad y calor especifico de los materiales involucrados**

Para calcular la conductividad y el calor especifico de los distintos materiales utilizados en el cálculo (alúmina, aire y acero 1020) en función de la temperatura, y para presión atmosférica en el caso del aire, se utilizaron los datos encontrados en [24], con los que se confeccionaron curvas de segundo y tercer grado de la forma mostrada en la

Ecuación 17. Los parámetros utilizados en esta ecuación, para que esta se asemeje al comportamiento real, se presentan en las tablas de esta sección.

El calor específico del aire no es calculado, ya que, como se discutirá más adelante, su densidad es despreciable en comparación a los otros materiales y por lo tanto su difusividad térmica no es considerada.

$$E_{material}(T[K]) = A \cdot T^3 + B \cdot T^2 + C \cdot T + D$$

Ecuación 17: Polinomio de tercer grado utilizado para aproximar las propiedades (E: conductividad K o calor especifico c_p) de los materiales en función de su temperatura. Fuente: confección propia.

Tabla 2-2: Parámetros de la Ecuación 17 para la conductividad de la alúmina. Fuente: datos obtenidos de [24].

Nombre	Valor
A	$0[W/mK^4]$
B	$7.414 \cdot 10^{-5}[W/mK^3]$
C	$-0.132[W/mK^2]$
D	$68.1[W/mK]$
r^2	0.99538

Tabla 2-3: Parámetros de la Ecuación 17 para la conductividad del aire. Fuente: datos obtenidos de [24].

Nombre	Valor
A	$0[W/mK^4]$
B	$-1.798 \cdot 10^{-8}[W/mK^3]$
C	$8.1611 \cdot 10^{-5}[W/mK^2]$
D	$0.00355[W/mK]$
r^2	0.9999

Tabla 2-4: Parámetros de la Ecuación 17 para la conductividad del acero 1020. Fuente: datos obtenidos de [24].

Nombre	Valor
A	$0[W/mK^4]$
B	$-4.471 \cdot 10^{-5}[W/mK^3]$
C	$0.0362[W/mK^2]$
D	$33.58[W/mK]$
r^2	0.9874

Tabla 2-5: Parámetros de la Ecuación 17 para el calor especifico de la alúmina. Fuente: datos obtenidos de [24].

Nombre	Valor
A	$0[J/kgK^4]$
B	$-1.1938 \cdot 10^{-6}[J/kgK^3]$
C	$0.305[J/kgK^2]$
D	$921.51[J/kgK]$
r^2	1

Tabla 2-6: Parámetros de la Ecuación 17 para el calor especifico del acero 1020. Estos datos pueden ser utilizados hasta los 1000 K, ya que a temperaturas superiores la curva no es representativa. Fuente: datos obtenidos de [24].

Nombre	Valor
A	$1.399 \cdot 10^{-5}[J/kgK^4]$
B	$-0.0263[J/kgK^3]$
C	$16.26[J/kgK^2]$
D	$-2657.67[J/kgK]$
r^2	0.8526

- **Potencia conducida a través de un sólido**

Al utilizar la conductividad efectiva de un lecho poroso inerte, heterogéneo en su forma de llenado, se simplifica el cálculo y el análisis de la potencia térmica transferida a través de su estructura, ya que se podrá utilizar la ecuación simple de transferencia de calor por conducción, la cual se presenta en la Ecuación 18.

$$P_{cond} = \frac{k_{eff} \cdot A \cdot (T_i - T_{i+1})}{L}$$

Ecuación 18: Potencia conducida por un volumen ocupado por un lecho poroso inerte. Para este caso, el área superficial es de A=0.0129[m^2] y L corresponde a la distancia entre los termopares de cada sector. Fuente: Confección propia.

Esta ecuación considera que las temperaturas se mantienen constantes, al igual que la conductividad efectiva y el resto de los parámetros involucrados. En resumen, solo podrá ser utilizada en situaciones estacionarias y no transientes, por lo que se utilizará para calcular la potencia conducida solo en la última hora de funcionamiento de cada prueba, donde el perfil de temperaturas alcanza condiciones cuasi estacionarias.

2.5 Variables de análisis

- **Eficiencia del quemador**

Se define como la porción de la energía liberada por el proceso de combustión que ocurre al interior del quemador poroso, que es emitida en forma de radiación por la superficie superior de este quemador poroso. Se presenta en la Ecuación 19.

$$\eta_{comb}[-] = \frac{P_{rad}}{P_{comb}}$$

Ecuación 19: Eficiencia del quemador. Fuente: Confección propia.

- **Eficiencia de absorción radiativa**

Se define como la porción de la potencia total entregada, vía radiación desde la superficie del quemador poroso, que termina al interior de la cavidad gasificadora,

disponible para convertirse en calor de proceso y se presenta en la Ecuación 20. Dependerá principalmente de las condiciones de absorción solar que posea la placa emisora del gasificador y de la aislación de la cavidad gasificadora. Se considera para su cálculo una situación estacionaria de temperaturas, por lo que solo representara el calor conducido a través del material medido, y no la energía almacenada en forma de calor latente.

$$\eta_{rad}[-] = \frac{P_{cond,esf}}{P_{rad}}$$

Ecuación 20: Eficiencia de absorción radiativa. Porción de la energía radiativa que es transferida a través del lecho poroso inerte. Fuente: confección propia.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación, se detallan las características de diseño del gasificador solar, además de especificar el resto de los equipos utilizados para llevar a cabo las pruebas de este trabajo de título, como el quemador poroso, el soporte para el gasificador, el compresor, etc. También se detallarán los elementos involucrados en la medición de dichas pruebas, como los controladores de flujo, los termopares y el pirómetro.

Es oportuno destacar que el diseño experimental de las pruebas realizadas en este trabajo tiene grandes similitudes al trabajo realizado por otro alumno de la universidad ([29]), por lo que se podrán utilizar los resultados obtenidos por dicho diseño experimental para validar los resultados obtenidos por este trabajo. Ambas pruebas consisten en utilizar un quemador poroso para transferir calor por medio de radiación a una cavidad cilíndrica aislada térmicamente, cuyo volumen interior es llenado de esferas de alúmina, y a la cual se medirán temperaturas internas a intervalos definidos de altura, utilizando termopares conectados a un "data logger".

3.1 Gasificador solar

En esta sección se detallan el diseño del reactor, sus partes principales y las decisiones de diseño involucradas. Los planos de construcción de este reactor se encuentran en el Anexo B: Planos de construcción.

Se separará esta sección en dos partes: la cavidad solar, la cual tiene la función de absorber la radiación solar y transmitir su energía a la siguiente cavidad, y la cavidad gasificadora, en la cual ocurrirán las reacciones involucradas en el proceso de gasificación.

3.1.1 Cavidad Solar

La radiación solar entrará por este componente al gasificador. Las claves de su buen funcionamiento tienen que ver con la cantidad de energía captada que es irradiada nuevamente al ambiente. Los componentes claves para lograr los objetivos son la apertura, la placa emisora y las paredes internas de la cavidad.

La estructura principal está compuesta de una brida, una cañería y una tubería, como se presenta en la Tabla 3-1. Estas tres partes están situadas concéntricamente entre ellas. La tubería tiene además una ranura que permitirá situarse en contacto con la cavidad gasificadora sin interferir con los termopares que irán situados ahí.

Tabla 3-1: Componentes y características de la cavidad solar. Fuente: creación propia.

Parte	Designación	Otras dimensiones
Brida	ASME B16.5 flange blind – Class 150 51	-
Cañería	ASME B36.10M – 5in – Schedule 40	74[mm] de largo
Tubería	Acero 1020	Ø142.3[mm] interno Ø157.5 [mm] externo 131.6[mm] de largo

- **Apertura**

Al carecer de información acerca de las concentraciones y potencias solares con las que se podía trabajar, se decidió darle dimensiones adecuadas según la información académica disponible [20].

Desde el Gráfico 12, y considerando una temperatura ideal de trabajo de 1,350 K, se tiene que la densidad energética "peak" del flujo radiativo gaussiano y el radio óptimo de funcionamiento son aproximadamente $F_{peak} = 1{,}180[W/cm^2]$ y $r_{opt} = 2.88\ \mu_{solar}$, respectivamente.

Se optó entonces por utilizar $r_{ap} = 2.5[cm]$. Para este radio, la eficiencia máxima de funcionamiento se logrará cuando la desviación estándar del flujo solar concentrado sea de $\mu_{solar} = 0.868[cm]$, el cual es inferior al logrado en [20] y pareció ser un buen punto de partida para una situación de trabajo desconocida, ya que, al momento de tomar la decisión, aún se pretendía utilizar luz solar concentrada para realizar las

primeras pruebas, lo que finalmente no ocurrió. De igual forma, al ser la desviación estándar utilizada ($\mu_{solar} = 0.868[cm]$) una que probablemente será menor que la lograda en el sistema de concentración que se construirá, solo se deberá incrementar este radio para lograr nuevamente las condiciones ideales de eficiencia energética.

La brida, por consecuencia, tiene una apertura de Ø50 [mm] en la cara exterior, la cual se va ensanchando hasta alcanzar los Ø56 [mm] en la cara interior.

Nuevamente, al no tener información respecto del flujo solar al que estará sometido durante las condiciones de trabajo finales, se desestima la utilización de un CPC, pero la brida podría ser modificada en el caso de ser necesario para instalar uno en ella. De igual forma, aunque se haya desestimado la utilización de una ventanilla de cuarzo, puede modificarse la brida para incorporarlo en caso de encontrarlo necesario por parte de las personas que trabajarán con el reactor a futuro.

- **Placa emisora**

Respecto de la placa emisora, se utilizó una placa de acero A36 para las pruebas de laboratorio. Se tomó esta decisión ya que las pruebas a las que se refiere este trabajo de título no tienen contemplado alcanzar temperaturas muy elevadas y solo tendrán como objetivo caracterizar la transferencia de calor al interior del reactor bajo condiciones de trabajo específicas.

Una vez que el resto de circunstancias necesarias para probar a cabalidad este modelo de reactor (campo solar, armazón giratorio, etc) se encuentren disponibles, se propone la utilización de una placa emisora de grafito recubierto de SiC. Se propone este material ya que posee las condiciones solares y térmicas deseadas, además de no reaccionar con los compuestos tanto del proceso de gasificación como con los compuestos presentes en el ambiente.

Esta placa emisora se encuentra sostenida por dos bridas o anillos en base al mismo material de la placa emisora, A36. Este par de bridas no tienen el mismo tamaño. La intención detrás de esto es la de disminuir el área de la placa emisora que da hacia la

apertura y así disminuir las pérdidas de energía por re-radiación, como se comenta en la sección del marco teórico en relación con la placa emisora.

- **Paredes**

La principal función de las paredes internas de la cavidad solar corresponde a impedir la pérdida de energía térmica desde dentro de esta cavidad. Esto se logra por medio de dos métodos: en primer lugar, se propone la utilización de un material aislante que permita disminuir la conducción hacia las paredes externas de la cavidad. Por otro lado, las superficies interiores deberán tener características especulares, que logren absorber la menor cantidad posible de radiación incidente en ellas.

3.1.2 Cavidad Gasificadora

Dentro de esta cavidad se llevarán a cabo las reacciones involucradas en el proceso de gasificación. Las claves para su buen funcionamiento tienen que ver con la inercia química a las reacciones que ocurren dentro del reactor. Esta cavidad está compuesta por cuatro partes principales, las cuales se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Componentes y características de la cavidad gasificadora. Fuente: fabricación propia.

Parte	Designación	Otras dimensiones
Brida	B16.5 Slip-On Class 150	5[in]
Cañería	ASME B36.10M 5[in] Schedule 40	381[mm]
Brida placa emisora	Plano: “Anillo 2”	
Tapa trasera	Plano: “Tapa trasera”	

La cañería tiene seis orificios de 8 [mm] con seis tuercas M8 soldadas concéntricamente a ellas. Estos orificios servirán para situar los termopares que medirán las temperaturas al interior del reactor.

La tapa trasera tiene un agujero roscado NPT, donde se situará la junta rotativa doble que introducirá el flujo de vapor de agua y extraerá el gas de síntesis generado. La tapa fue fabricada utilizando acero A36.

Como se ha planteado anteriormente, al no poder utilizarse este reactor para pruebas de gasificación en este momento (debido a que el campo solar no está terminado), no será necesario utilizar otros componentes al interior del reactor. Sin embargo, en futuras pruebas de gasificación, la cañería tendrá en su interior un manto cerámico (Ø62 [mm] interno, Ø76 [mm] externo) envuelto de lana aislante. El primero tiene la función de facilitar la transferencia de calor por conducción hacia el fondo del lecho sólido, mientras que la lana aislante tiene la función de reducir las pérdidas por conducción hacia la cañería.

El cilindro cerámico se encontrará bajo presión en contacto a una aislación trasera y a la placa emisora, sellando así la cavidad gasificadora.

3.2 Fuente de energía térmica

El gasificador solar diseñado en este trabajo de título está pensado para trabajar utilizando energía solar concentrada (5 [kW] específicamente) como fuente de energía térmica para llevar a cabo el proceso de gasificación. Los equipos destinados a realizar esa concentración solar estarán situados en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Sede José Miguel carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María. Ya que estos equipos no están disponibles al momento de requerirlos para la confección de este trabajo, se tuvieron que tomar medidas alternativas para obtener la energía térmica necesaria.

En primer lugar, se propuso limitar el alcance de este trabajo de título a diseñar y probar térmicamente (sin gasificar, ya que esto necesitaría de más energía) el reactor.

Luego, se consideró entonces utilizar un quemador poroso para realizar la entrega de temperatura por medio de radiación, lo que de alguna forma entrega información que podrá ser de utilidad. Se propuso este tipo de quemador ya que fue parte de un trabajo de título del departamento [30] y el equipamiento estaba disponible en el laboratorio donde se llevaron a cabo las pruebas, además de entregar energía radiativa, de modo que se puede hacer un paralelo a la utilización de energía solar concentrada.

Este quemador limitará la temperatura máxima que se podrá alcanzar, ya que tiene una potencia máxima inferior a la que sería posible alcanzar utilizando energía solar concentrada. Sin embargo, de igual forma se deberían alcanzar temperaturas que permitan analizar el mecanismo de transferencia de calor al interior del reactor.

3.2.1 Quemador poroso

Como se puede observar en la Figura 4, el quemador utilizado está compuesto de cuatro componentes principales: la esponja cerámica que compone el medio poroso como tal, la trampa de llama, la aislación lateral y el cabezal de combustión. Los cuales se detallan a continuación.

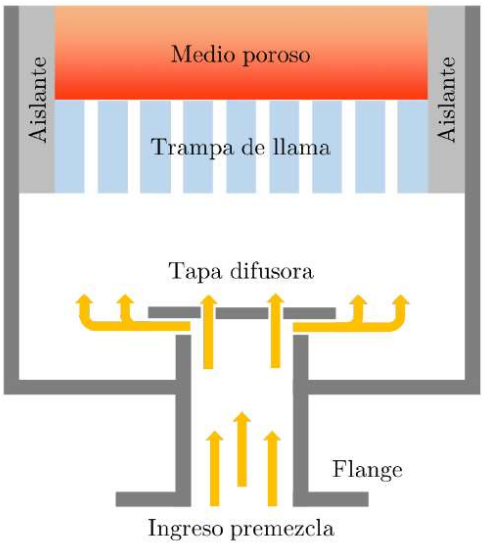


Figura 4: Esquema del quemador poroso. La esponja cerámica se denomina en esta figura como "Medio poroso". Fuente: Adaptado de [30]

- **Esponja cerámica**

Las características de este componente fueron obtenidas desde el trabajo de título del alumno que lo diseñó y se encuentran detallados en la Tabla 3-3. Cabe mencionar que, del diámetro total de la esponja cerámica, solo 60 [mm] de diámetro estaban al

descubierto y en condiciones de entregar energía, ya que los bordes están cubiertos por el aislante lateral.

A pesar de verse en buenas condiciones, no era posible asegurar la integridad física de la esponja cerámica a un nivel tal que se pudiera asegurar un funcionamiento con una mezcla demasiado pobre de aire-combustible, por lo que, si bien se utilizó una mezcla pobre, está siempre estuvo en la vecindad del $\lambda = 1.24$, como se puede ver en el Anexo A: Potencia de combustión y flujos de aire y combustible.

Tabla 3-3: Características de la esponja cerámica. Fuente: Adaptado de [30]

Material	Si-SiC
Geometría	Disco
Diámetro	70 mm
Porosidad	20 ppi
Espesor	22 mm
FR máximo	2,500 kW/m2
Potencia admisible	9.6 kW

Figura 5: esponja cerámica utilizada. Fuente: Adaptado de [30]

- **Trampa de llama**

Corresponde a una pastilla de material aislante con múltiples orificios pasantes en su cara plana. Este componente es muy importante ya que prevendrá que la llama retroceda hasta el lugar donde se genera la mezcla, obligándola en cambio a permanecer

en la esponja ceramica. En la Tabla 3-4 se presenta la información general del material utilizado.

Tabla 3-4: Características de la trampa de llama. Fuente: Adaptado de [30]

Fabricante	Duotherm-Stark
Composición	75% Al2O3, 25%SiO2
Geometría	Disco
Diámetro	70 mm
Diámetro perforación	1 mm
Espesor	25 mm
Separación perforación	5 mm
Conductividad térmica	0.16 W/mK (a 1100ºC)
Temperatura de servicio	1,750 ºC
Densidad	400 kg/m3

Figura 6: Trampa de llama. Fuente: Adaptado de [30]

- **Aislación lateral**

Este componente cumple la función de proteger el cabezal de las altas temperaturas que existirán en la esponja cerámica. Con este fin, la aislación cubrirá tanto la esponja cerámica como la trampa de llama. Está compuesto por tres capas de papel aislante, y sus características se encuentran listadas en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Características del papel aislante. Fuente: Adaptado de [30]

Material	Si-Mg
Temperatura de fusión	>1,500°C

Temperatura de servicio	1,175°C
Espesor	3 mm
Densidad	160 kg/m3

- **Cabezal de combustión**

Corresponde al armazón en que el resto de los componentes descansarán. Un esquema del cabezal se puede ver en la Figura 4, junto a los otros componentes del quemador poroso. Una de sus características es la existencia de una tapa difusora, la cual permitirá una mejor distribución de la mezcla de combustión en toda el área superficial de la esponja cerámica.

Tiene unos orificios roscados sin motivo aparente, los cuales se asume fueron utilizados para posicionar los termopares utilizados en el trabajo de título antes mencionado. Estos agujeros se taparon con pernos para evitar fuga de gases a través de ellos.

3.3 Otros componentes

Además del gasificador y el quemador poroso, fue necesario adaptar otros componentes auxiliares que permitieron el correcto funcionamiento del gasificador y del quemador poroso en el contexto de las pruebas realizadas. Estos componentes corresponden a un soporte, compresor y tubo de escape, cuyas funciones y características se detallan a continuación.

3.3.1 Soporte

En un principio se pretendía utilizar un armazón que permitiera que el gasificador girara inclinado mientras recibía luz solar concentrada. Debido a que no se pudieron realizar las pruebas utilizando luz solar concentrada, como se explicó en secciones anteriores, y ya que las pruebas que se realicen en estas condiciones serán menos demandantes en términos energéticos, se optó por utilizar un soporte vertical bastante más simple, el cual se detalla a continuación.

Para sostener el reactor en la posición vertical y elevada que se necesita, se utilizará un armazón ya existente en el Laboratorio de Termofluidos, el que se muestra en la Figura 7, aplicándole tan solo unas pequeñas modificaciones que nos permitirán fijar el reactor. La función previa que tenía este soporte era el de fijar a una altura ajustable un recipiente de plástico destinado para almacenar líquidos.

Figura 7: Soporte utilizado, junto al resto de los equipos. Fuente: fabricación propia.

3.3.2 Compresor

Para proporcionar el aire necesario para llevar a cabo la combustión dentro del quemador poroso, se utilizó un compresor que se encontraba disponible en el laboratorio, cuyas características son presentadas en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: Datos del compresor. Fabricación propia.

Presión máxima	10[bar]
Flujo máximo	265[L/min]

Revoluciones por minuto	2,850[rpm]
Potencia	1.5[kW]

3.3.3 Tubo de escape

Esta parte, la cual se puede observar en la Figura 8, se construyó en base a una tubería de acero y un pequeño perfil, los cuales se encontraban en el laboratorio. Su función principal es la de encausar los gases producto de la combustión en una dirección distinta a la de los termopares, ya que estos poseen componentes de plástico que experimentarán deformación permanente en las condiciones de temperatura esperadas.

Figura 8: Tubo de escape. Fuente: Confección propia.

En una primera instancia se pretendía utilizar un techo de borosilicato sobre este tubo, el cual solo permitiría el paso de la radiación infrarroja generada por el quemador poroso y no de los gases calientes producto de la combustión, los cuales tenderán a fluir en esa dirección. Lamentablemente, este componente de borosilicato se terminó deformando debido a las altas temperaturas que este alcanzó, por lo que se terminó por empotrar este tubo directamente al reactor, como muestra la Figura 9, lo cual cumplió el objetivo inicial.

Figura 9: tubo de escape empotrado al reactor. Fuente: Confección propia.

3.4 Equipamiento de control y medición

En términos de control, es de importancia poder fijar valores fijos de flujo tanto de aire como de combustible, ya que de esa forma se podrá calcular con mayor confianza los valores de potencia térmica suministrada en las pruebas. Para esto se utilizarán dos controladores de flujo másico (CFM).

En términos de medición, será de importancia poder medir las temperaturas tanto al interior del reactor como en la superficie del quemador poroso. Para lo primero se utilizarán seis termopares tipo S, y para lo segundo un pirómetro proporcional. Ambos luego entregan su información en tiempo real a un "data logger", el cual toma esta información y la entrega a un computador en un lenguaje legible.

3.4.1 Controladores de flujo másico (CFM)

Es de interés el poder controlar la potencia con la que el quemador poroso trabaja y es por esto que se emplearán dos CFM en la línea, uno para la línea de gas y otro para la línea de aire, los cuales permitirán suministrar flujos exactos de estos dos fluidos. En las Tabla 3-7 y Tabla 3-8 se detallan las características de cada uno.

Estos CFM operan separando una pequeña parte del flujo que ingresa al equipo y luego este le proporciona un flujo de calor específico, el cual es luego detectado en forma de temperatura en dos puntos a lo largo del tubo por el que viaja. Estas lecturas permiten conocer en tiempo real el flujo del fluido de trabajo.

Tabla 3-7: Características del CFM utilizado para gas natural. Fuente: fabricación propia.

Marca	AALBORG
# Modelo	GFC37
Gas de trabajo	CO_2
Rango de flujo de trabajo	0-10[L/min]

Tabla 3-8: Características del CFM utilizado para aire. Fuente: fabricación propia.

Marca	AALBORG
# Modelo	GFC37
Gas de trabajo	Aire
Rango de flujo de trabajo	0-50[L/min]

Es claro que el CFM de CO_2 no esta calibrado para funcionar con metano. Para poder utilizar este gas con este CFM, el fabricante entrega factores que permiten comparar la lectura entregada por el controlador (calibrada en este caso para CO_2) en su correspondiente valor en términos del gas a utilizar (en este caso metano).

Se realizaron comparaciones de flujo entre varios CFM (digital y de bola) con el fin de asegurar un funcionamiento preciso y eficaz. Esto se realizó colocando los CFM en línea y midiendo ambas lecturas. Finalmente se decidió utilizar los presentados.

3.4.2 Termopares y "Data Logger"

Seis termopares tipo S (Pt10%Rh/Pt) fueron utilizados para medir las temperaturas al interior y a lo largo de la cavidad gasificadora del reactor. Este tipo de termopares trabaja utilizando el efecto "seebeck", donde dos metales de distinta composición generan una diferencia de voltaje al ser sometidos a una fuente de calor y a un sumidero térmico. Esta diferencia de voltaje depende de la correspondiente diferencia de

temperatura y puede luego ser medida con el fin de conocer la temperatura de la fuente de calor.

Para realizar la medición, se situaron los seis termopares en los orificios presentados en la Figura 10, donde el primer termopar se encuentra a 7[mm] de la cara interior de la placa emisora. La punta de los termopares está situada a algunos milímetros de distancia con la pared interior de la cañería (la cual también es mostrada en la figura). La posición de esta punta es asegurada, sin posibilidad de contacto con la cañería, por medio de las varillas de cerámica que separan el material del termopar y dicha cañería. La distancia desde la punta de los termopares al eje central del reactor es cercana a los 30[mm] aproximadamente. Estos termopares estarán conectados, además, a cables compensados para termopares tipo S, los cuales permitirán extender la señal desde los termopares hasta el "data logger".

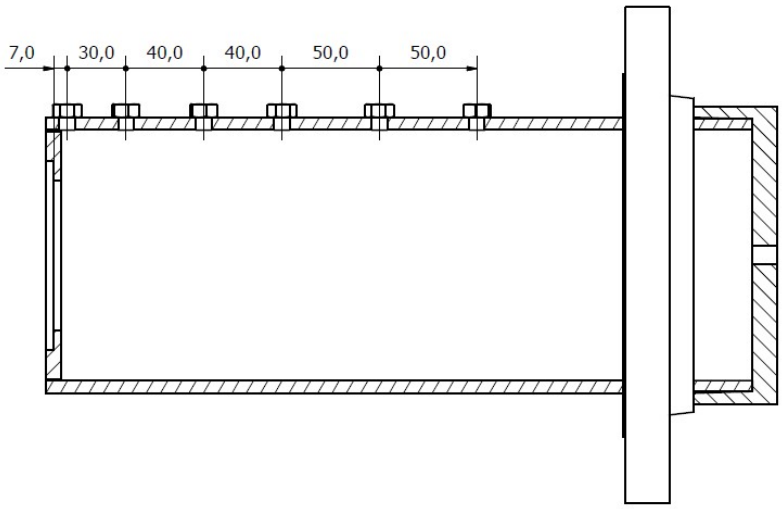


Figura 10: Ubicación de los termopares en el reactor. Fuente: fabricación propia.

Para analizar las diferencias de voltaje que los temopares generan se utilizará un colector de datos, o "data logger". Los pormenores del equipo se listan en la Tabla 3-9. Cabe mencionar que la conexión del "data logger" al computador es vía USB y que,

además, tiene la opción de conectarse a una fuente de poder en el caso que el computador no sea capaz de entregarle la energía necesaria.

Tabla 3-9: Pormenores del recolector de datos. Fuente: fabricación propia.

Marca	OMEGA
Modelo	OM-DAQ-USB-2401
Programa	DAQ Central
Número de entradas	8

3.4.3 Pirómetro

Este instrumento de medición cumple la función de determinar la temperatura de una superficie sin tener contacto directo con él, lo cual permite que la temperatura del artefacto de medición no altere la temperatura del objeto medido por medio de conducción. A continuación, se explica el principio de funcionamiento y en particular su funcionamiento en este contexto, además de presentar sus pormenores en la Tabla 3-10.

Un pirómetro de un color básicamente utiliza, en base a la ley de Planck, un receptor capaz de detectar la intensidad de una longitud de onda específica irradiada por el objeto que se quiere medir, y de esta forma definir su temperatura. Una dificultad de esto corresponde a que la intensidad de esa longitud de onda tendrá que ver con la emisividad del objeto medido, y por lo tanto no es suficiente un solo "color" para poder medir un objeto sin conocer sus condiciones de emisividad.

Ante esto los pirómetros proporcionales, también llamados de "dos colores", entregan una solución. Estos funcionan básicamente, como su nombre lo dice, utilizando dos pirómetros de "un color" que trabajan en conjunto en su interior. Esto se traduce en que ambos receptores se encuentran en la misma posición, uno sobre el otro en una especie de sándwich [31].

Estos dos receptores detectan radiación a distintas longitudes de onda, de las cuales se mide la potencia y luego se les compara entre sí, para poder determinar el valor de

temperatura del objeto que se está midiendo. Este tipo de pirómetros podrá medir cualquier objeto mientras su emisividad se mantenga constante para toda longitud de onda emitida. Si esta condición se cumple, no importará la emisividad del objeto.

Este tipo de equipamiento es entonces de utilidad a la hora de medir la temperatura alcanzada por el quemador poroso durante su funcionamiento en las pruebas realizadas, ya que de esta manera tendremos un valor más exacto de la potencia a la cual este trabaja y el flujo energético que entrega.

Esta información será de utilidad en dos áreas. Primero, al comparar la potencia de trabajo del quemador poroso con las temperaturas al interior del reactor y poder definir una eficiencia al respecto. También será de utilidad al relacionarlo con los flujos másicos del combustible y aire entregados, para definir si la potencia teórica es la que se obtiene del quemador poroso en la práctica.

Tabla 3-10: Pormenores del pirómetro utilizado. Fuente: Fabricación propia.

Fabricante	Impac
Modelo	Infratherm ISQ 5
Rango de temperatura	700-1,800ºC
Especificación	MB 18: Optics
Distancia optima (valor de "a")	800 [mm]

El rango de medición de este pirómetro es de 700-1,800 [ºC] y entrega la información en forma de corriente con un rango de 4-20 [mA]. Esta forma de entregar la información presenta un problema ya que el "data logger" que se utilizará solo es capaz de medir voltajes. Es por esto que se conectó el pirómetro a una resistencia de 250 [ohm] al 0,1% y de esta forma se obtiene un rango en voltaje de 1-5 [V] legible para el "data logger".

La línea visual con que este equipo realiza la medición tendrá impuesto un ángulo obtuso en relación al quemador poroso, transformando la forma circunferencial de esta línea visual de medición en una elipse, cuyas dimensiones es necesario considerar para

poder validar la medición realizada. El cálculo involucrado se presenta en el Anexo C: Área visible del pirómetro proporcional.

3.5 Pruebas

3.5.1 Banco de pruebas

Todos los componentes ya descritos son parte del banco de pruebas, el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 11. Una conexión de gas natural existente en laboratorio fue utilizada como fuente de combustible. Las presiones alcanzadas por esta línea son bajas, por lo que es necesario que la presión de aire también lo sea para lograr que ambos flujos puedan mezclarse en la "T" previo al quemador poroso.

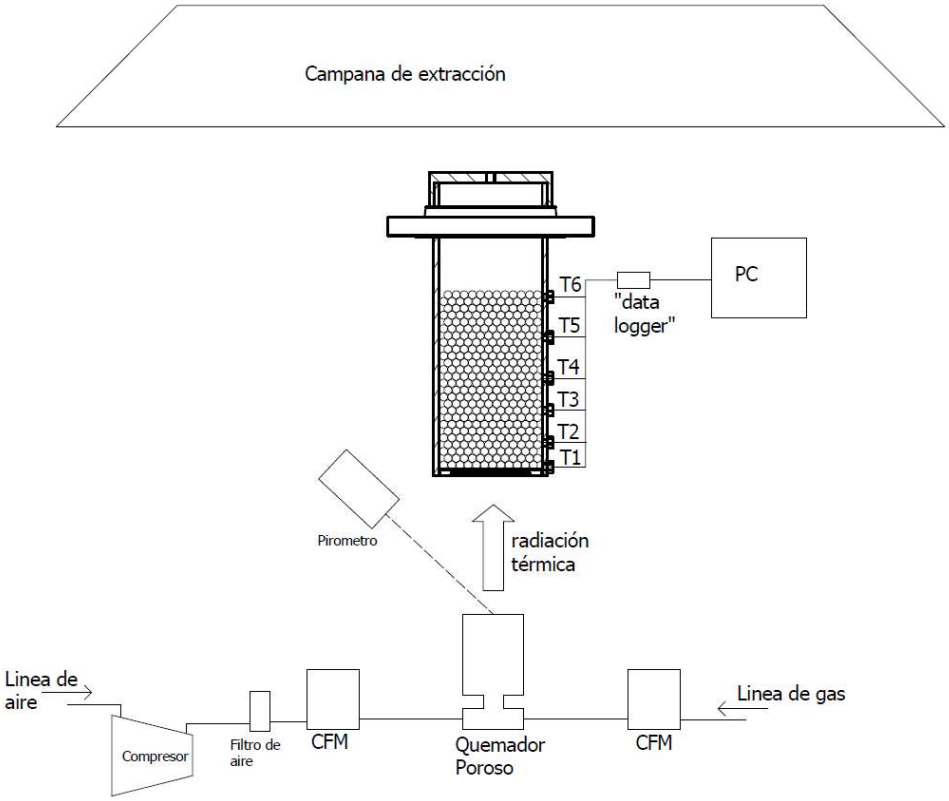


Figura 11: Esquema de la instalación para las pruebas. Fuente: Fabricación propia.

Además se encuentran en la Figura 11 la campana extractora de gases en la parte superior, el gasificador con sus respectivos termopares, el quemador poroso y el pirómetro que mide su temperatura superficial, además de las líneas de aire y gas natural, con sus respectivas válvulas y controladores de flujo másico (CFM).

3.5.2 Esferas de alúmina

Las esferas de alúmina utilizadas para generar el lecho poroso inerte al interior de la cavidad gasificadora son de dos tipos: esferas compactas "sólidas" y esferas huecas. A continuación, se detallan algunas de sus características, las cuales serán de utilidad en los cálculos posteriores.

- **Esferas compactas "sólidas"**

Corresponden a esferas de alúmina de tamaño uniforme (5.6 [mm] de diámetro). Estas esferas generan en la cavidad gasificadora un lecho poroso inerte de porosidad 0.4.

- **Esferas huecas**

Corresponden a esferas de entre 4 [mm] y 6 [mm] de diámetro externo conformadas por una cáscara de alúmina que envuelve un núcleo de aire en su interior. Para simplificar el cálculo, se utiliza 5 [mm] como el diámetro externo de todas las esferas y se estima que el espesor de la cáscara de alúmina es de 0.175 [mm].

CAPÍTULO 4

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tiene que ver directamente, como su nombre lo dice, con los procedimientos realizados durante la realización de las pruebas contempladas en este trabajo de título. Estos procedimientos involucran los procedimientos de seguridad, de operación, de toma de datos y los parámetros con los que se llevaron a cabo las pruebas.

4.1 Procedimiento de seguridad

4.1.1 Elementos de seguridad

Los elementos listados a continuación deben encontrarse en el lugar de la prueba. En el caso de la vestimenta de seguridad, esta deberá ser utilizada por todos los individuos presentes en dicha prueba.

1. Extintor.
2. Zapatos de seguridad.
3. Overol.
4. Lentes de seguridad.
5. Guantes de seguridad.
6. Válvulas de cierre para aire comprimido y gas.

4.1.2 Detección de fugas

El procedimiento descrito a continuación deberá ser realizado previo a cada una de las pruebas.

1. Despejar vías de acceso.

2. Conectar los controladores de flujo másico (CFM desde ahora) a sus fuentes de poder y esperar 15 minutos.
3. Encender la campana de extracción.
4. Una vez transcurridos los 15 minutos, se inspeccionará cada uno de los CFM para asegurar que se encuentren en la posición de cerrado. Cerrarlos en caso contrario.
5. Inspeccionar todas las conexiones del sistema y corregir las que no se encuentren en estado óptimo.
6. Abrir la válvula de gas natural e inspeccionar cada una de las conexiones en busca de fugas. Esto se realizará utilizando un detector de gas y lavasa. En caso de encontrar puntos problemáticos, detener la prueba y corregir hasta tener total confianza que ya no está ocurriendo.
7. Abrir el CFM hasta alcanzar un flujo que permita encender el quemador.
8. Con el quemador encendido, revisar el resto de la línea (entre el CFM y el quemador) con el detector de gas y lavasa.

4.2 Operación

4.2.1 Puesta en marcha

Una vez realizado el procedimiento de detección de fugas, se podrá proceder a realizar el procedimiento de puesta en marcha, el cual se describe a continuación:

1. Encender el compresor hasta alcanzar las presiones deseadas.
2. Encender campana de extracción.
3. Abrir la válvula de gas.
4. Dar el paso del CFM de gas hasta alcanzar un flujo que permita el encendido.
5. Encender el quemador.
6. Esperar unos minutos hasta lograr la incandescencia del quemador poroso. Esto se evidenciará por el color rojizo que este comienza a tomar.
7. Dar el paso del CFM de aire hasta localizar la ignición dentro del quemador poroso.

8. Paulatinamente alcanzar los flujos deseados de gas y aire.

4.2.2 Fin de prueba

Una vez concluida la primera parte de la prueba (curva ascendente de temperatura), se procede a apagar el quemador como se describe a continuación:

1. Disminuir paulatinamente el paso de gas y aire utilizando los CFMs.
2. Cerrar paulatinamente la válvula de paso de gas.
3. Una vez que se apague el quemador, cerrar el paso del CFM de gas.
4. Cerrar el paso del CFM de aire.
5. Apagar el compresor.
6. Desconectar de la fuente de poder todos los artefactos involucrados en la operación del quemador (compresor y CFMs).

Se debe paulatinamente disminuir el flujo de ambos fluidos en el punto 1 ya que, una vez que se cierre el paso de gas, el flujo de aire por si solo podría ocasionar el enfriamiento brusco del quemador poroso, lo que podría desembocar en rupturas por choque térmico.

4.3 Toma de datos

4.3.1 Termopares y data logger

En caso de ya encontrarse instalados los termopares, omitir pasos 1 y 2.

1. Conectar los extremos de cada termopar a una regleta de conexión eléctrica teniendo cuidado de identificar el extremo “H” y el extremo “L”.
2. Instalar cada termopar en los orificios destinados para esto en el reactor.
3. Conectar los extremos de los cables compensados tipo B en las regletas de conexión eléctrica descritas en el punto 1. Al igual que en el punto 1, procurar que los extremos “H” y “L” se conecten con su par.
4. Conectar el otro extremo del cable compensado al “data logger”.

5. Encender el computador que recolectará los datos.
6. Conectar el “data logger” al computador vía USB.
7. Abrir la aplicación “DAQ Central” y configurar las opciones de recolección de datos. (No olvidar el guardado del archivo a generar)
8. Comenzar la recolección de datos.

4.3.2 Pirómetro y temperatura del quemador poroso

1. Situar el pirómetro a aproximadamente 850 [mm] del quemador poroso en la horizontal.
2. Conectar el cable de fuente de poder y recolección de datos al pirómetro.
3. Apuntar el pirómetro al quemador poroso utilizando la mira del primero.
4. Conectar fuente de poder.
5. Conectar terminales al “data logger”. Cuidado de identificar el extremo “H” y el extremo “L”.
6. Configurar el programa “DAQ Central”.
7. Comenzar la prueba.

4.4 Pruebas

A continuación, se detallan las 6 pruebas que se realizaron. Las pruebas 1 y 2 sirvieron para probar el funcionamiento y la disposición de los equipos involucrados. Las pruebas 3, 4 y 5 tuvieron la misma masa interna (esferas sólidas) pero diferentes potencias, mientras que la prueba 6 tuvo la misma potencia que la prueba 3 pero diferente masa interna (esferas huecas). El cálculo involucrado en las potencias y en las razones de aire y combustible para las diferentes pruebas se encuentran en el Anexo A: Potencia de combustión y flujos de aire y combustible.

Se estima un error experimental del 10% considerando el banco de pruebas, sus componentes y los métodos de medición.

4.4.1 Prueba 1

Para la primera prueba no hubo masa interna, ya que se pretendía solo lograr la puesta en marcha. La potencia utilizada fue de $1.635\ [kW]$ (LHV), utilizando $2.916\ [L/min]$ de gas natural y $30\ [L/min]$ de aire, con una razón aire-combustible de 1.07 [-]. El quemador poroso estaba a una distancia de $55\ [mm]$ de la placa emisora.

4.4.2 Prueba 2

Para esta prueba se utilizó una masa interna compuesta de esferas de alúmina de $5.6\ [mm]$ de diámetro, las cuales llenaron el interior del reactor hasta el cuarto termopar, justo debajo de donde la unión soldada se encontraba. Se trabajó con una potencia de $2.227\ [kW]$ (LHV), utilizando $3.975\ [L/min]$ de gas natural y $50\ [L/min]$ de aire, con una razón aire-combustible de 1.31 [-]. El quemador poroso estaba a una distancia de $60\ [mm]$ de la placa emisora.

4.4.3 Prueba 3

Para esta prueba se terminó de llenar el interior del reactor de esferas de alúmina de $5.6[mm]$ de diámetro, las cuales llenaron el interior del reactor hasta $10\ [mm]$ sobre el sexto termopar, esto resulta en una masa de esferas de alúmina de 5.79 [kg] en un volumen de $2.88 \cdot 10^{-3}\ [m^3]$. La porosidad calculada de estas condiciones, y la utilizada para el resto de las pruebas, es de $\varphi = 0.4[-]$.

Se trabajó con una potencia de $2.344\ [kW]$ (LHV), utilizando $4.18\ [L/min]$ de gas natural y $50\ [L/min]$ de aire, con una razón aire combustible de 1.248 [-]. El quemador poroso estaba a una distancia de $30\ [mm]$ de la placa emisora.

La configuración lograda en esta prueba, en relación al tubo de escape, cumplió el objetivo buscado, por lo que se utilizó la misma configuración en el resto de las pruebas.

4.4.4 Prueba 4

El llenado del interior del reactor y la distancia desde el quemador poroso a la placa emisora se mantuvieron de la prueba anterior. Se trabajó con una potencia de $2.198\ [kW]$ (LHV), utilizando $3.92\ [L/min]$ de gas natural y $46.3\ [L/min]$ de aire, con una razón aire combustible de 1.23 [-].

4.4.5 Prueba 5

El llenado del interior del reactor y la distancia desde el quemador poroso a la placa emisora se mantuvieron de la prueba anterior. Se trabajó con una potencia de $1.635\ [kW]$ (LHV), utilizando $2.916\ [L/min]$ de gas natural y $34.8\ [L/min]$ de aire, con una razón aire combustible de 1.24 [-].

4.4.6 Prueba 6

Para esta prueba se cambió el contenido de la mitad del reactor y se reemplazó con esferas huecas de alúmina de diámetros entre $4-6\ [mm]$. Estas llenaron desde el primer termopar hasta $10\ [mm]$ sobre el tercer termopar, lo cual resulta en 0.73 [kg] de esferas huecas en un volumen de $1.07 \cdot 10^{-3}\ [m^3]$. El resto del reactor permaneció llenado con esferas de alúmina compactas "sólidas" de $5.6\ [mm]$ de diámetro, lo cual resulta en 3.64 [kg] de esferas sólidas en un volumen de $1.81 \cdot 10^{-3}\ [m^3]$.

La porosidad del sector que tiene esferas de alúmina huecas se considerará igual a la de las esferas sólidas. Esto se debe principalmente a su similar diámetro externo y a que el espacio utilizado por el núcleo de la partícula ya es considerado a la hora de calcular la conductividad efectiva de dicha partícula y por lo tanto sería considerar el núcleo dos veces. Cabe destacar nuevamente, que este núcleo de aire no es considerado, por el modelo utilizado, en el cálculo de transferencia de calor por medio de radiación.

Cabe destacar además que existe un porcentaje menor de estas esferas huecas que posee imperfecciones en su estructura. Estas imperfecciones consisten en agujeros de

distintos tamaños, los cuales les quitarían a estas esferas la propiedad de hermeticidad de su contenido interno.

Se trabajó con una potencia de $2.344\ [kW]$ (LHV), utilizando $4.18\ [L/min]$ de gas natural y $50\ [L/min]$ de aire, con una razón aire-combustible de 1.248 [-], todos estos valores son iguales a los utilizados en la prueba 3. El quemador poroso estaba a una distancia de $30\ [mm]$ de la placa emisora.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

5.1 Pruebas

Las pruebas 1 y 2 fueron finalmente preliminares en su funcionamiento, en el sentido que sirvieron para probar los distintos componentes involucrados en las mediciones y otras funciones dentro del banco de pruebas, encontrando además algunas situaciones problemáticas que debieron ser resueltas, de tal forma que el conjunto tuviera un funcionamiento óptimo en las pruebas posteriores. Se presentan de igual forma los resultados de la prueba 2, en forma de gráficos de temperatura, en el Anexo D: Perfil de temperaturas de la prueba 2. La prueba 1 no tuvo una toma de datos continúa puesto que existieron problemas a la hora de realizar estas mediciones, por lo que no tiene un anexo en particular.

Durante la prueba 1, algunos componentes plásticos de la conexión entre los termopares y el "data logger" comenzaron a derretirse debido a la temperatura de los gases de combustión que salen del quemador poroso. Se decide probar una tapa transparente de borosilicato, la cual permita que los gases calientes salgan por el costado contrario al de los termopares. Se decide además utilizar un filtro a la salida del compresor con el fin de proteger los filtros del CFM.

Durante la prueba 2, la tapa de borosilicato cumplió su objetivo, ya que protegió los termopares de manera satisfactoria. Lamentablemente, esta tapa comenzó a deformarse, debido a las altas temperaturas de los gases, en el punto más cercano al

quemador poroso. Se decidió entonces retirar esta tapa, para luego empotrar al reactor el tubo de acero que sostenía la tapa de borosilicato, y cumplir de esta manera el mismo objetivo.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas 3, 4, 5 y 6, donde se midieron las temperaturas y se calcularon valores de interés, como difusividad térmica y transferencia de calor.

Como se comentó en el capítulo 4, las pruebas 3 y 6 tienen distintas composiciones de bolas de alúmina dentro de la cavidad gasificadora, pero una igual potencia de combustión en el quemador, mientras que las pruebas 3, 4 y 5 tienen igual composición de bolas de alúmina dentro de la cavidad gasificadora, pero distinta potencia de combustión.

En los gráficos Gráfico 16, Gráfico 17, Gráfico 18 y Gráfico 19 se puede observar las temperaturas obtenidas en la pruebas 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

La difusividad térmica de las pruebas 3, 4 y 5 son muy similares, por lo que solo se presenta la curva de la prueba 3, en el Gráfico 20, para poder compararla a las esferas de alúmina huecas de la prueba 6, cuyo Gráfico 21 también es presentado.

En los gráficos Gráfico 22, Gráfico 23, Gráfico 24 y Gráfico 25 se presenta la temperatura superficial del quemador poroso que fue destinado a transferir energía térmica por medio de radiación y dentro del cual tuvo lugar la combustión del gas natural utilizado. Además, se presenta una tabla con los valores de potencia irradiada por este quemador.

La potencia conducida por los distintos sectores en situaciones estacionarias de temperatura durante las pruebas realizadas se puede observar en las tablas de la sección 5.1.4.

En el Anexo E: Composición de los gases de escape saliendo desde el quemador se presenta la composición de los gases de escape que salen del quemador poroso durante

las pruebas 3, 4 y 5, considerando dos gases (CO y C_xH_y) además de la temperatura. Esta información se presenta en caso de que sea útil para futuros trabajos.

5.1.1 Temperaturas

Como se comentó en el capítulo 3, los resultados de Ruiz G. podrán ser utilizados para validar este trabajo de título, gracias a las similitudes entre ambos diseños experimentales. Sin embargo, es oportuno mencionar en primer lugar las diferencias entre ambos trabajos, para luego enfocarse en dichas similitudes.

Este trabajo de título se enfoca en el diseño, acá en Chile, tanto del reactor como del banco de pruebas necesario para llevar a cabo mediciones de transferencia de calor a través de un lecho poroso inerte irradiado indirectamente por medio de un quemador poroso. Luego, se busca analizar los resultados con el fin de obtener conclusiones útiles para los posteriores usos de este reactor. En el diseño experimental del banco de pruebas se tuvieron que implementar componentes como el soporte, el quemador poroso, un compresor, controladores de flujo másico, un pirómetro y un sistema de termopares y "data logger" para registrar la información obtenida. Además, la existencia de la temperatura superficial del quemador poroso permitió establecer eficiencias tanto en el quemador como en la cavidad gasificadora.

El trabajo de Ruiz G., el cual se realizó en Alemania, se enfocó en analizar numéricamente los resultados de una prueba muy similar a la del presente trabajo de título, prueba cuyo diseño experimental, tanto del banco de pruebas como del reactor utilizado, ya estaba previamente realizado en aquel país. El objetivo de su trabajo consistía en validar un modelo numérico que pudiera predecir las condiciones de transferencia de calor en un lecho poroso inerte calentado por medio de radiación indirecta.

Es entonces en la intersección de ambos trabajos, es decir, en la prueba en sí, cuyos diseños experimentales son similares, donde se podrá utilizar el trabajo de Ruiz G. para

validar los resultados obtenidos por el diseño experimental desarrollado en este trabajo de título.

Las diferencias entre ambos diseños son pocas: el diámetro de las esferas compactas utilizadas (no se utilizaron esferas huecas en el trabajo de Ruiz G.), el tamaño de la cavidad gasificadora (ambos son cilindros), el espesor de la aislación utilizada para dicha cavidad, la potencia de combustión utilizada en el quemador y el quemador mismo, a pesar de utilizar el mismo principio de funcionamiento, y por último, la posición de los termopares, los cuales se encontraban en el eje de la cavidad gasificadora cilíndrica en el trabajo de Ruiz G.

Debido a todo lo anterior, los resultados de ambos trabajos deberían ser similares en su forma, pero no en su valor. En el Gráfico 14, se presentan los resultados obtenidos durante la prueba realizada en el trabajo de Ruiz G., los cuales deberían ser similares a los obtenidos por las pruebas 3, 4 y 5 en este trabajo de título. [29]

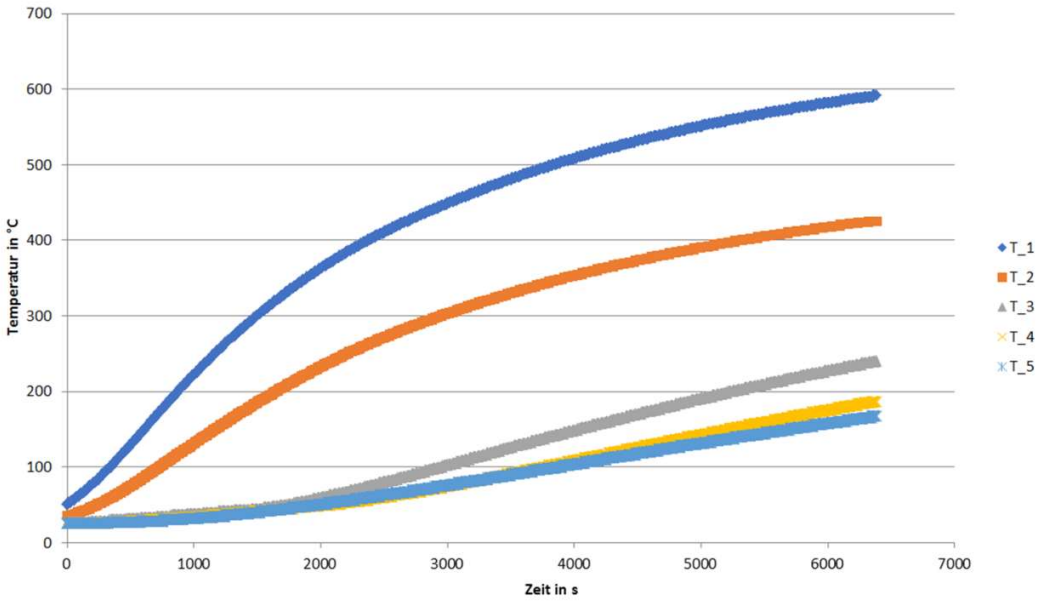


Gráfico 14: Resultados obtenidos en el trabajo realizado por Ruíz G. en [29]. *Fuente: adaptado de* [29].

Los Gráfico 15, Gráfico 16, Gráfico 17, Gráfico 18 y Gráfico 19 presentan respectivamente las temperaturas medidas durante:

- La prueba 3, ajustada a los tiempos medidos en el Gráfico 14
- La prueba 3 en su totalidad
- Las pruebas 4, 5 y 6

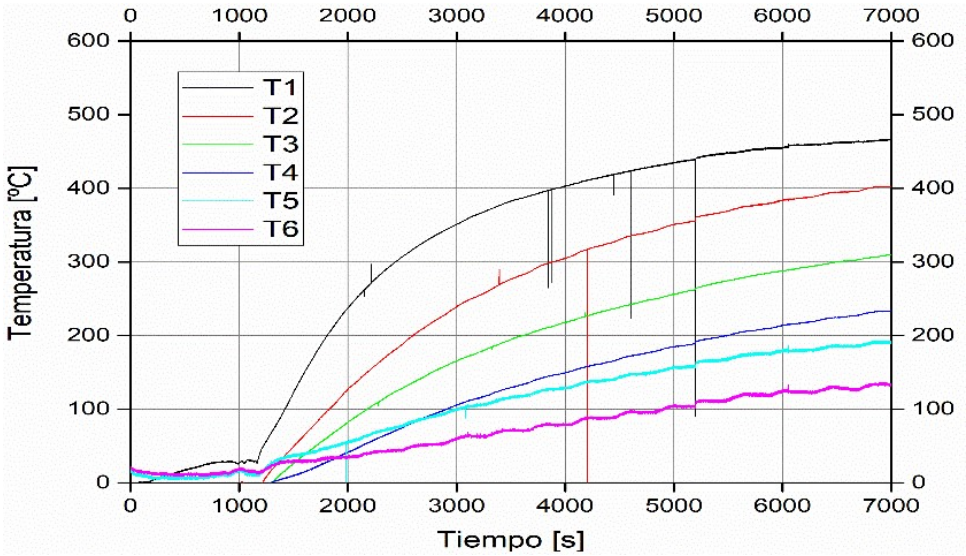


Gráfico 15: Temperaturas medidas por los termopares durante la prueba 3, en los tiempos medidos por el trabajo realizado por Ruiz G. en. Fuente: confección propia.

Las temperaturas medidas durante las pruebas 3, 4, 5 y 6 aumentan continuamente durante la primera hora de funcionamiento, a medida que el quemador le entrega energía térmica por medio de radiación, proveniente de la combustión que ocurre en su interior, a la placa emisora. Esta placa, a su vez, entrega esa energía térmica por medio de conducción y radiación térmica hacia el lecho poroso inerte al interior de la cavidad gasificadora, que por consecuencia, aumenta su energía interna en forma de calor sensible. Esto ocurre hasta alcanzar un estado estacionario de temperatura, luego de aproximadamente 3 horas de funcionamiento, donde la potencia que entra en el reactor es casi de igual magnitud que la que escapa de él, por medio de los mismos mecanismos

de transferencia de calor ya mencionados, a los cuales se les suma el mecanismo de convección natural a través de las paredes y la tapa superior de la cavidad gasificadora.

La gran similitud entre los resultados obtenidos por este trabajo y el realizado por Ruiz G., evidenciado por los Gráfico 14 y Gráfico 15, permiten afirmar que el diseño experimental empleado por este trabajo es capaz de obtener resultados válidos y útiles en el análisis, de este tipo de reactores, en los tópicos de transferencia de calor y eficiencia de absorción radiativa.

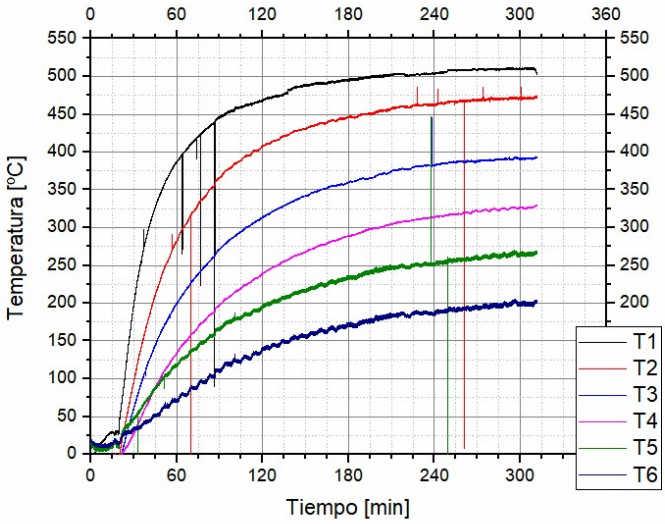


Gráfico 16: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 3. Fuente: Creación propia.

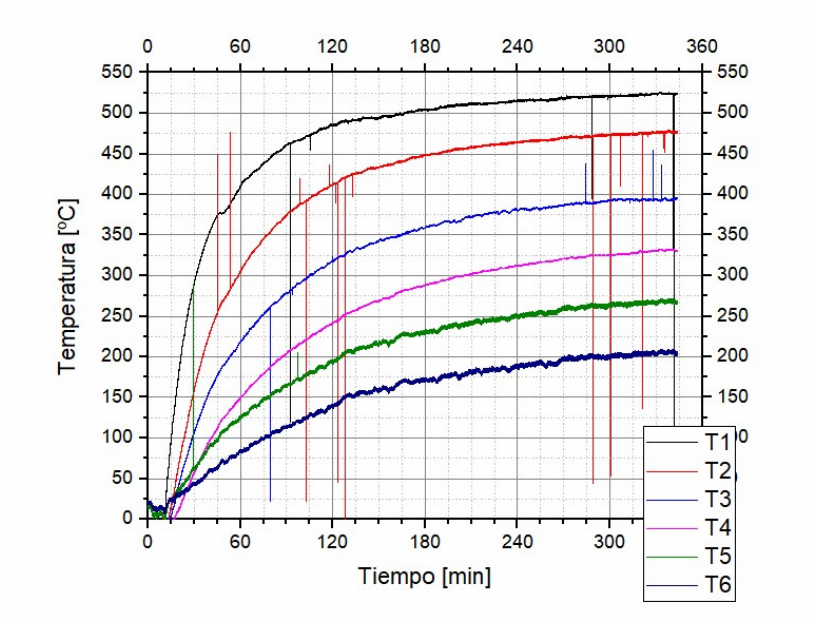


Gráfico 17: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 4. Fuente: Creación propia.

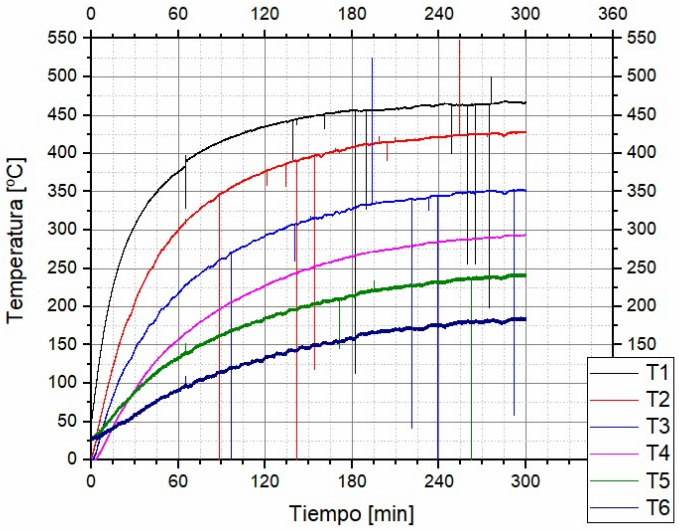


Gráfico 18: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 5. Fuente: Creación propia.

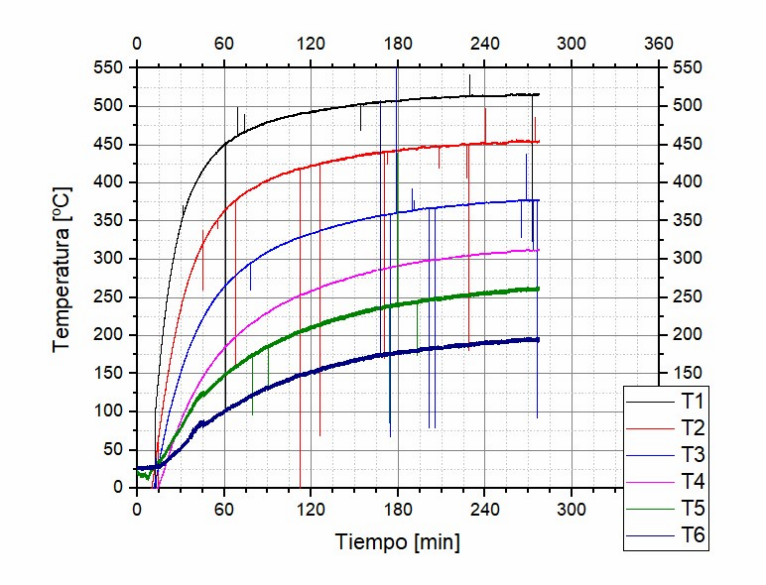


Gráfico 19: Temperatura [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 6. Fuente: Creación propia.

5.1.2 Difusividad térmica

Utilizando las ecuaciones de la sección 2.4.2, se calcularon las difusividades térmicas de cada segmento entre dos termopares (los sectores: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6). Estas difusividades térmicas son calculadas para cada paso de tiempo a la temperatura promedio de cada sector, los cuales tienen un espesor de entre 30 [mm] y 50 [mm].

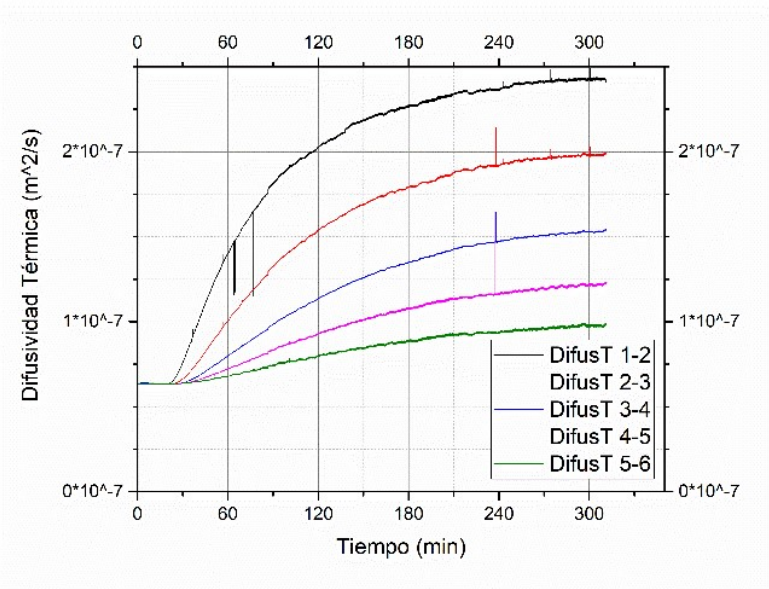


Gráfico 20: Difusividad térmica de la prueba 3. Fuente: confección propia.

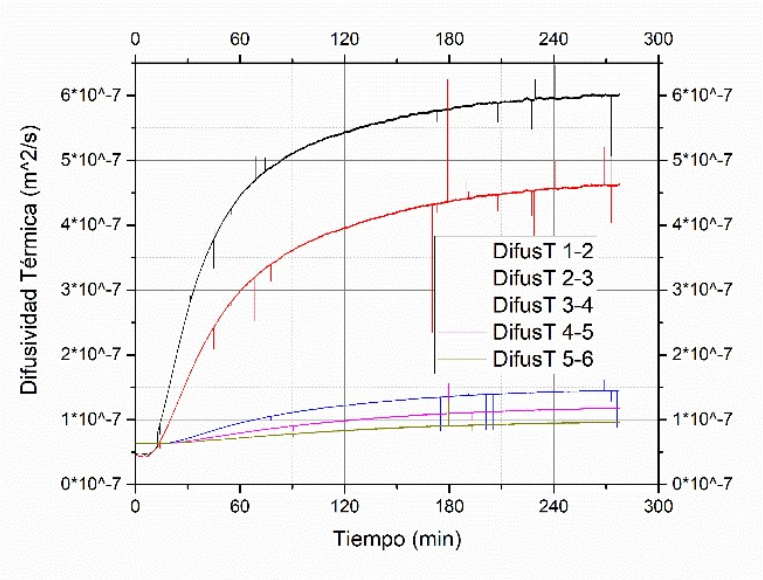


Gráfico 21: Difusividad térmica de la prueba 6. Fuente: confección propia.

5.1.3 Temperatura superficial del quemador poroso

En esta sección se presentan los gráficos correspondientes a las temperaturas superficiales del quemador poroso durante las pruebas realizadas.

También se presentan las potencias utilizadas en el cálculo de las eficiencias consideradas por este trabajo. Estas potencias corresponden a las alcanzadas por el quemador durante los periodos de temperatura estacionaria al interior de la cavidad gasificadora, ya que estos son los únicos periodos de tiempo donde es posible realizar un análisis de potencia.

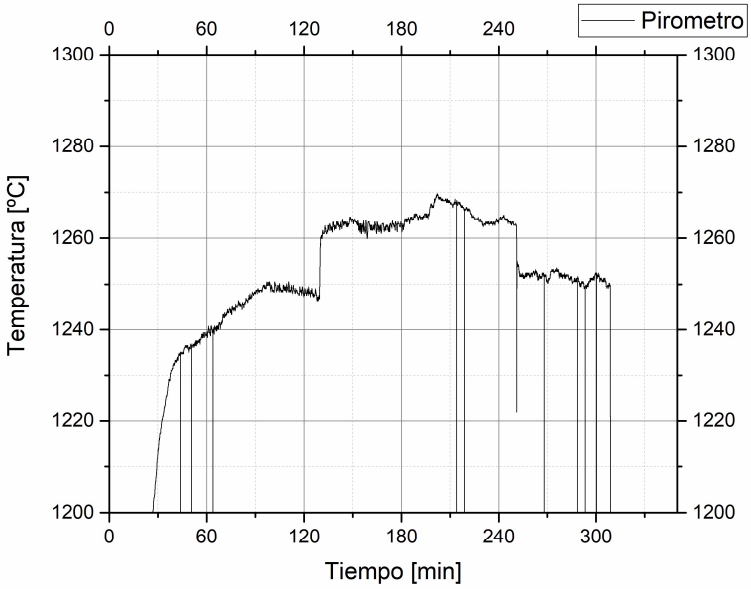


Gráfico 22: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 3. Fuente: Creación propia.

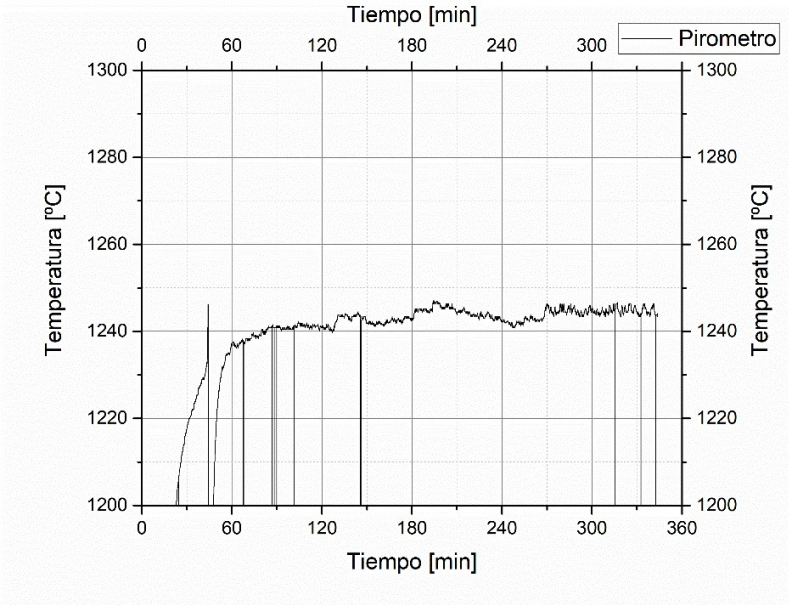


Gráfico 23: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 4. Fuente: Creación propia.

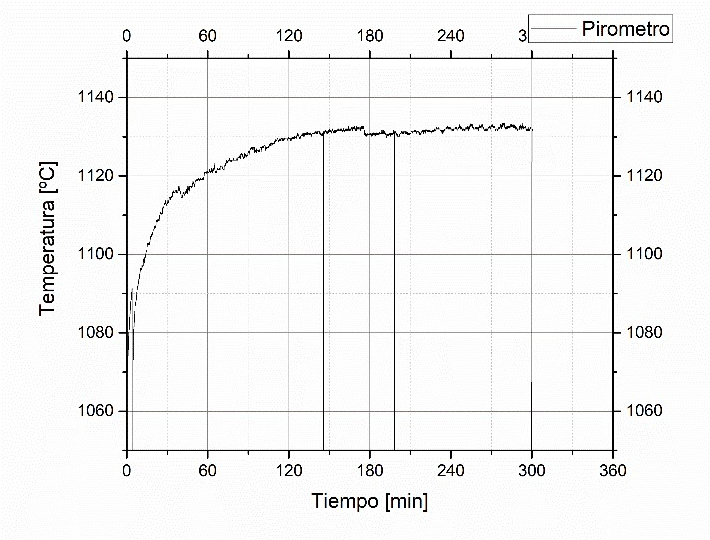


Gráfico 24: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 5. Fuente: Creación propia.

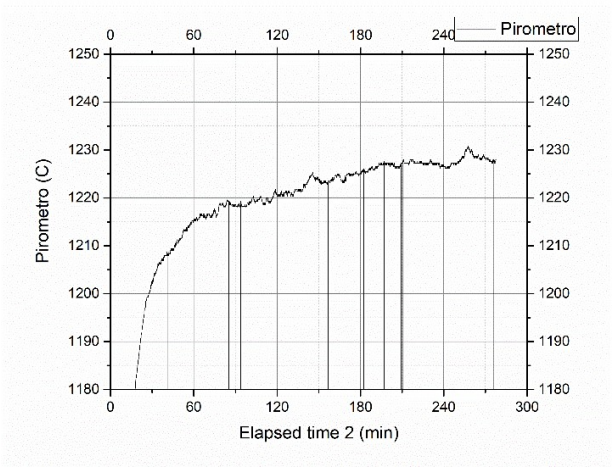


Gráfico 25: Temperatura de quemador radiativo [ºC] vs Tiempo [min] durante la prueba 6. Fuente: Creación propia.

Tabla 5-1: Potencia radiativa utilizada para los cálculos de eficiencia posteriores. Fuente: confección propia.

Prueba	Espacio de tiempo [min]	Temperatura utilizada [K]	Potencia radiativa [W]
P3	240-300	1523.8	734.6
P4	300-345	1519.1	725.6
P5	240-300	1405.8	532.1
P6	210-270	1499.7	689.2

5.1.4 Potencia conducida y eficiencia de absorción radiativa

Al utilizar la Ecuación 18 para calcular la potencia conducida por cada sector, es necesario, como ya se mencionó en el capítulo 2, considerar un espacio de tiempo donde las temperaturas se mantengan constantes. Es por esto que se utilizan temperaturas encontradas en la última hora de funcionamiento de cada prueba, donde esta condición se cumple.

La eficiencia de absorción radiativa corresponde entonces a la porción de la energía emitida por el quemador en forma de radiación, que es conducida al interior de la cavidad gasificadora por el lecho poroso inerte, compuesto por esferas de alúmina. Se presenta en la Ecuación 20, capítulo 2.

Los resultados se presentan en las tablas de esta sección.

Tabla 5-2: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 240 y 300 min. Potencia radiativa incidente = 734.6[W]. Fuente: confección propia.

P3	Conductividad [w/mK]	Potencia conducida [W]	Eficiencia de absorción radiativa
1-2	0.519	8.79	1.2%
2-3	0.415	10.78	1.47%
3-4	0.312	6.68	0.91%
4-5	0.242	3.97	0.54%
5-6	0.19	3.24	0.44%

Tabla 5-3: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 300 y 345 min. Potencia radiativa incidente = 725.6[W]. Fuente: confección propia.

P4	Conductividad [w/mK]	Potencia conducida [W]	Eficiencia de absorción radiativa
1-2	0.541	11.24	1.55%
2-3	0.424	11.40	1.57%
3-4	0.290	5.81	0.8%
4-5	0.252	3.96	0.55%
5-6	0.198	3.32	0.46%

Tabla 5-4: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 240 y 300 min. Potencia radiativa incidente = 532.1[W]. Fuente: confección propia.

P5	Conductividad [w/mK]	Potencia conducida [W]	Eficiencia de absorción radiativa
1-2	0.441	7.46	1.4%
2-3	0.354	8.61	1.62%
3-4	0.272	5.30	1.0%
4-5	0.219	2.89	0.54%
5-6	0.179	2.73	0.51%

Tabla 5-5: Potencia conducida a través del lecho poroso inerte una vez alcanzado el estado estacionario, entre los 210 y 270 min. Potencia radiativa incidente = 689.2[W]. Fuente: confección propia.

P6	Conductividad [w/mK]	Potencia conducida [W]	Eficiencia de absorción radiativa
1-2	0.433	11.47	1.66%
2-3	0.325	8.23	1.19%
3-4	0.295	6.38	0.93%
4-5	0.234	3.08	0.447%
5-6	0.189	3.09	0.448%

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se analizarán los datos de temperatura al interior del reactor, además de la difusividad térmica y potencia en el sector temporal estacionario de las pruebas, de modo que se pueda obtener información de importancia en relación con futuras utilizaciones de este equipo y las esferas de alúmina.

Es importante reiterar que en la prueba 6, los tres primeros termopares (esto es, los dos primeros sectores: 1-2 y 2-3), están compuestos de esferas huecas mientras que el resto de los sectores de esta prueba, además del resto de las pruebas y sectores de estas, están compuestos de esferas compactas.

Se encuentra que las esferas huecas presentan velocidades de calentamiento superiores a las esferas compactas, lo cual tendría que ver con la diferencia de masa entre ambos tipos, entre otros factores como la conductividad efectiva de cada tipo de esfera, lo cual se evidencia en los valores de difusividad térmica.

Finalmente, se consideran las eficiencias energéticas logradas a nivel del quemador poroso y a nivel de la cavidad gasificadora.

6.1.1 Temperatura, velocidad de calentamiento y Difusividad térmica

- **Temperatura y velocidad de calentamiento**

En comparación a las esferas compactas de la prueba 3, las esferas de alúmina huecas utilizadas en la prueba 6 alcanzaron, en menor tiempo, temperaturas cercanas a las estacionarias, como se puede observar en el Gráfico 26. Se estima que esto podría deberse a la diferencia de densidad aparente que existe entre ambos tipos de lecho, o a la diferencia de conductividad efectiva lograda por cada tipo. Ambos valores tendrán

injerencia en la difusividad térmica de los dos tipos de esfera, cuyo valor ilustrara esta diferencia en la velocidad de calentamiento.

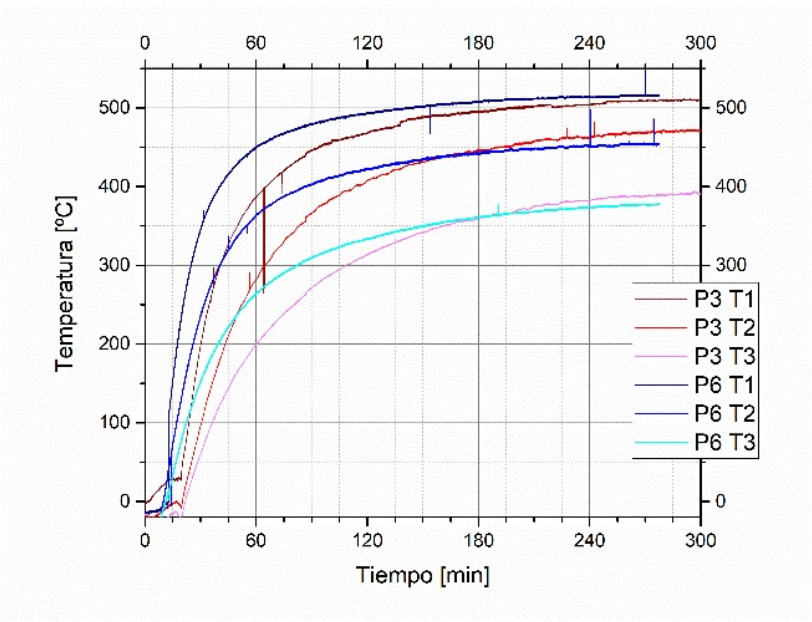


Gráfico 26: Comparación de las temperaturas alcanzadas por los primeros tres termopares en las pruebas 3 (P3, T1,2 y 3) y 6 (P3, T1,2 y 3). Fuente: confección propia.

Esta diferencia de velocidad puede ser evidenciada al calcular una pendiente simple de la forma $\Delta T/\Delta t$ en la primera hora del Gráfico 26. Los resultados se encuentran presentados en la Tabla 6-1 y muestran en general que las esferas huecas lograron velocidades 14% superiores aproximadamente.

Al considerar la posibilidad de que la diferencia de masa sea la característica responsable de esa diferencia de velocidad de calentamiento, se analiza la diferencia de densidad aparente entre ambos tipos de esfera. La densidad aparente de las esferas huecas corresponde solo al 34% de la densidad aparente de las esferas compactas. Esto implicaría que, de ser esta diferencia de masa la única responsable de la diferencia de velocidad de calentamiento, esta última debería ser cerca de tres veces más alta en las esferas huecas en comparación con las compactas, y no el 14% encontrado. Se analizará entonces a continuación la conductividad de las esferas, ya que ese valor podrá tener

injerencia en la difusividad térmica del lecho y por lo tanto en la diferencia de velocidad de calentamiento.

Tabla 6-1: Velocidad de calentamiento de los tres primeros termopares durante la primera hora de funcionamiento para las pruebas 3 y 6, además de la diferencia relativa entre ellas. Fuente: confección propia.

	Termopar 1	**Termopar 2**	**Termopar 3**
Prueba 3	$0.184\ [K/s]$	$0.158\ [K/s]$	$0.136\ [K/s]$
Prueba 6	$0.205\ [K/s]$	$0.183\ [K/s]$	$0.156\ [K/s]$
Diferencia relativa (P3+P6)/P3	11.41%	15.82%	14.71%

- **Conductividad efectiva y difusividad térmica**

El primer paso en este análisis corresponde a comparar las magnitudes alcanzadas por las conductividades efectivas en las esferas de las pruebas 3 y 6. Esta conductividad efectiva, la cual será calculada en los primeros tres sectores (contemplados entre los primeros cuatro termopares: 1-2, 2-3 y 3-4), para las pruebas 3 y 6, se presentan en el Gráfico 27. La conductividad efectiva de las esferas compactas es superior a la presentada por las esferas huecas en el mismo sector, durante la mayoría del tiempo de medición.

La conductividad de las esferas huecas solo es superior en valor durante la primera hora de funcionamiento, lo que se estima tendría que ver con el momento efectivo en el cual se comenzó a entregar calor de forma constante desde el quemador en cada prueba, que, como se puede observar en el Gráfico 28, tuvo una diferencia de aproximadamente 10 minutos entre las pruebas 3 y 6.

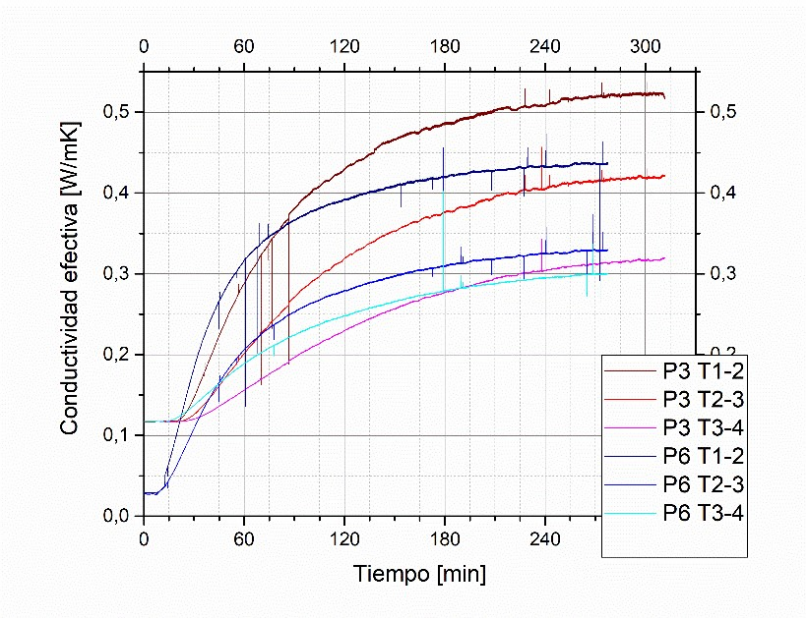


Gráfico 27: Comparación de las conductividades efectivas de las esferas de alúmina en las pruebas 3 y 6, calculadas para las zonas medidas por los tres primeros termopares en cada una. Fuente: confección propia.

Como se desconoce la porosidad del lecho sólido compuesto de esferas huecas, se utilizó el mismo de las esferas compactas. Se estima que deberían ser bastante similares teniendo en cuenta el similar diámetro externo de ambas esferas y además porque el diámetro del recipiente es órdenes de magnitud más grande que el diámetro de las esferas.

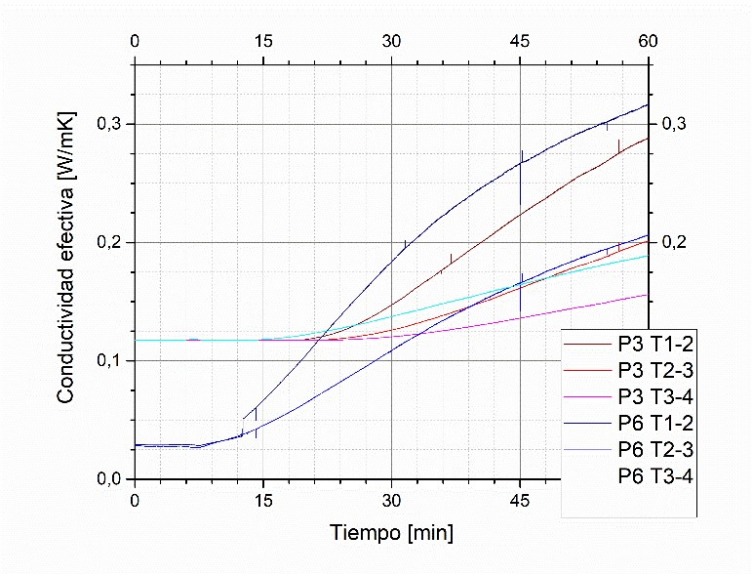


Gráfico 28: primera hora en el desarrollo de las conductividades efectivas del lecho. Se puede notar como la prueba 6 comienza su actividad térmica aproximadamente 10 minutos antes que la prueba 3. Fuente: confección propia.

Cabe destacar además que el núcleo de aire de las esferas huecas no es considerado en el cálculo de la porosidad. Esto se debe a que este espacio ya es considerado al calcular la conductividad tradicional de la esfera (pero no la radiación a través de ella, método de transferencia de calor no incluido en el modelo utilizado), por medio de la Ecuación 11Ecuación 11, presentada en el capítulo 2.

De igual forma que al analizar la temperatura y la velocidad de calentamiento, se calcula la pendiente simple de este cambio al valor de la conductividad efectiva. Cuyos datos se presentan en la Tabla 6-2, y muestran que las pendientes en las pruebas 3 y 6, para los sectores de interés, son muy similares, existiendo una diferencia relativa de solo ~20.9%. Debido a esto, se estima que la mayor conductividad de las esferas huecas durante la primera hora de funcionamiento tiene, además del tiempo de ventaja en su inicio, una mayor razón de cambio en ese rango de tiempo.

Tabla 6-2: Pendiente de la conductividad en el primer disco de medición para las pruebas 3 y 6. La diferencia relativa de las pendientes es del 20.9%. Fuente: confección propia.

	t_1 [min]	k_1 [W/mK]	t_2 [min]	k_2 [W/mK]	$\Delta k / \Delta t$
P3	17	0.11782	60	0.28813	**0.003961**
P6	0.875	0.02803	60	0.31685	**0.004885**

Esta mayor velocidad de calentamiento y de aumento en la conductividad efectiva tendrá su causa en la diferencia de difusividad térmica de cada lecho, lo cual es evidenciado en el Gráfico 29. La menor densidad aparente del lecho de esferas huecas permitirá que la energía térmica proveniente desde la placa emisora pueda moverse más rápidamente a través de él, y permitirá que las esferas puedan aumentar en un menor tiempo sus temperaturas.

Cabe destacar que el aire no fue considerado en el cálculo de la difusividad térmica del lecho, ya que su valor de densidad es demasiado bajo como para que tenga algún efecto en la transferencia de calor y por lo tanto no tendrá injerencia en el valor de la difusividad térmica del total.

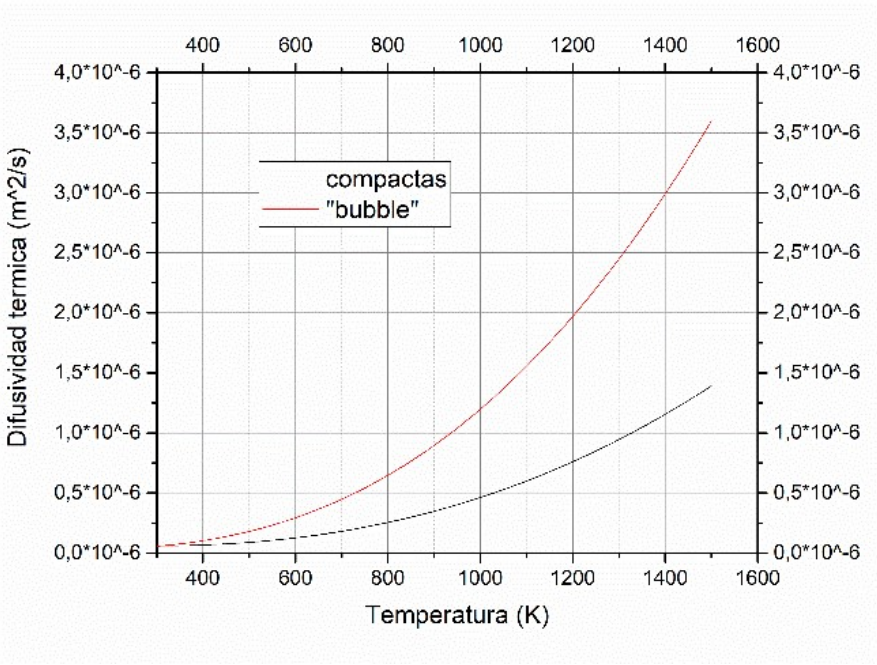


Gráfico 29: Difusividades térmicas de los lechos de esferas compactas y huecas en función de su temperatura. Fuente: confección propia.

Esta creciente diferencia en la difusividad térmica de ambos tipos de lecho implicará que, no solo se propagará más rápidamente el calor a través del lecho de esferas huecas, sino que lo hará cada vez más rápido en comparación al lecho de esferas compactas.

Se entiende entonces que es la difusividad térmica la que ocasionará las diferencias en las velocidades de calentamiento de cada lecho de esferas, y no solamente la diferencia de densidad aparente o la conductividad efectiva de este.

Otro análisis útil al considerar la conductividad efectiva de este tipo de lechos corresponde a considerar que tan importantes serán las componentes radiativa y conductiva tradicional en el valor de esta conductividad efectiva, lo cual se presenta en la Tabla 6-3. Se desestima la presencia de un componente importante de carácter convectivo en el proceso de transferencia de calor, debido a que no existen flujos importantes al interior de la cavidad gasificadora, además del presente en el proceso de

convección natural, el cual se estima no es significativo en comparación a los otros dos métodos.

Tabla 6-3: Composición de la conductividad efectiva del lecho poroso inerte para esferas de alúmina huecas y compactas a tres temperaturas de interés (673K, 973K y 1,500K). Fuente: confección propia.

Conductividad efectiva	**Porción conductiva [W/mK] (%)**	**Porción radiativa [W/mK] (%)**
Tipo: huecas **Temperatura: 673K**	0.00436 (1.42%)	0.30299 (98.58%)
Tipo: compactas **T: 673K**	0.003233 (0.94%)	0.33927 (99.06%)
Tipo: huecas **T: 973K**	0.00342 (0.37%)	0.91564 (99.63%)
Tipo: compactas **T: 973K**	0.02480 (2.36%)	1.02526 (97.64%)
Tipo: huecas **T: 1500K**	0.01235 (0.37%)	3.3548 (99.63%)
Tipo: compactas **T: 1500K**	0.09295 (2.41%)	3.7564 (97.59%)

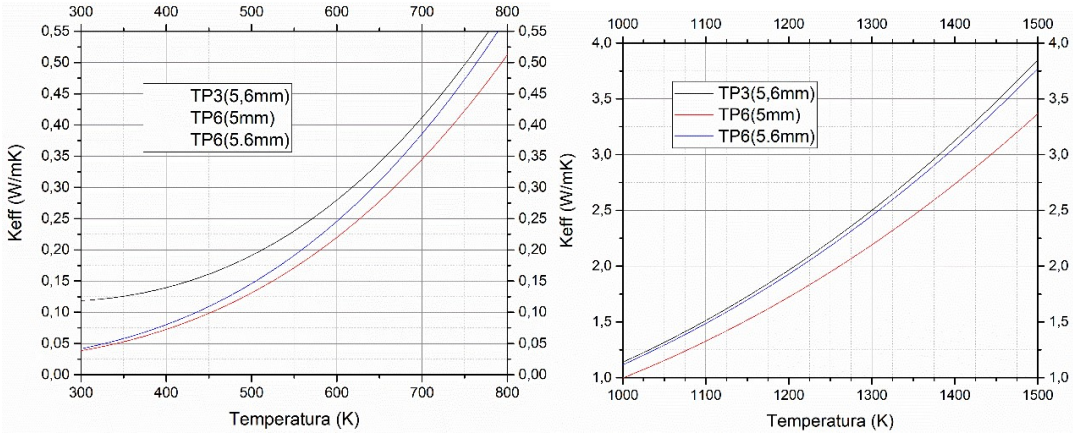


Gráfico 30: Conductividad efectiva de lechos de esferas compactas de 5.6 [mm] y esferas huecas de 5 y 5.6 [mm] en función de la temperatura del lecho, entre 300 K y 800 K, y entre 1000 K y 1500 K. La curva TP6 (5.6mm) muestra el caso hipotético donde se utilizan esferas huecas del mismo diámetro de las compactas. Fuente: confección propia.

Es evidente que el proceso principal por el cual este tipo de lechos traspasa la energía térmica a través de su estructura, es el de radiación, componiendo sobre el 97% del total en prácticamente todo el espectro de temperatura considerado, como se puede observar además en el Gráfico 31. La porción radiativa de esta conductividad efectiva dependerá, además de la temperatura, de la porosidad del lecho, y en menor medida, del diámetro individual de las esferas que componen el lecho, como se puede observar al considerar las variables de las ecuaciones presentadas en la sección 2.4.2.

Ya que la porción conductiva es despreciable y debido a que se estimó el mismo valor de porosidad en ambos casos, se podrá analizar el diámetro de esfera como principal variable de estudio, ya que será finalmente la única que diferenciará los valores de conductividad efectiva entre ambos procesos. Esta relación es además directamente proporcional, por lo que, a mayor diámetro de esfera, mayor será la porción radiativa de la conductividad efectiva del lecho.

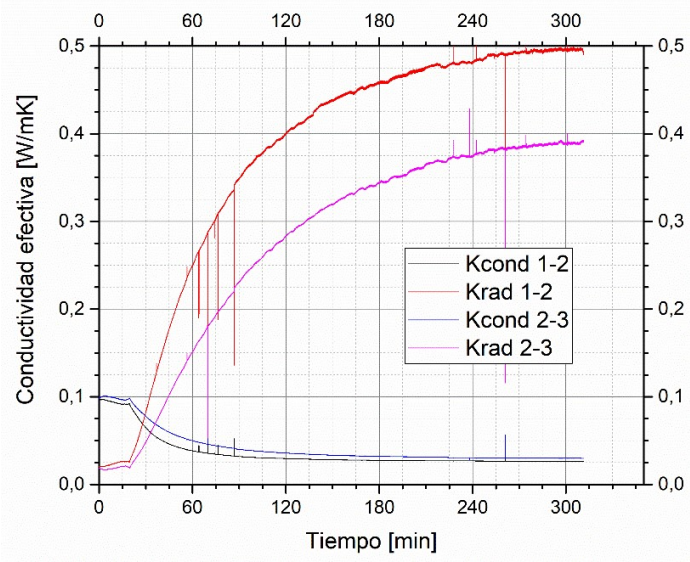


Gráfico 31: Composición de la conductividad efectiva de los dos primeros discos medidos en la prueba 3. Fuente: confección propia.

El rango de temperaturas alcanzado en este trabajo de título no supera los $\sim 500°C$ ($\sim 800K$) por lo que los resultados obtenidos se podrán analizar en ese rango

de temperatura. Sin embargo, será de utilidad poder estimar el comportamiento del lecho a las temperaturas para las cuales fue diseñado (cercanas a los 1500 K). En el Gráfico 30, se presenta la conductividad efectiva teórica de esferas compactas (P3) y huecas (P6) para los rangos de temperatura de interés.

Como se muestra en el Gráfico 30, las conductividades efectivas de ambos lechos tienen valores distintos a bajas temperaturas, como era esperado, ya que en este rango de temperatura, es la conductividad tradicional, y no la radiación, el proceso de transferencia de calor que tiene el protagonismo en el valor de la conductividad efectiva, por lo que la ausencia de masa en el sector central de las esferas huecas, y por ende, la diferencia de masa entre los tipos de esfera tendrá una injerencia mayor sobre la conductividad efectiva del lecho. A temperaturas superiores, y a medida que la radiación comienza a tomar importancia, esta distancia disminuye, hasta alcanzar un mínimo a temperaturas cercanas a los 555 K.

A temperaturas superiores a 600 K (después de la primera hora de funcionamiento), el componente radiativo comienza a tomar un fuerte protagonismo, junto con el efecto que tiene en su valor el diámetro de las esferas. La diferencia de diámetro entre los dos tipos de esfera vuelve a posicionar las curvas de conductividad efectiva en trayectorias divergentes, lo cual se mantiene en el resto de las temperaturas consideradas. Se estima que, al mantener el diámetro entre los tipos de esfera, es decir, que las esferas huecas tengan el mismo diámetro externo que las compactas, esta diferencia de conductividad efectiva no será tan importante, permitiendo mantener ambas curvas relativamente cercanas, como se muestra en el Gráfico 30, donde se considera la posibilidad de este tipo de lecho. Esto permitirá mantener las condiciones radiativas del lecho compacto, al mismo tiempo que se conserva la alta difusividad térmica de las esferas huecas.

6.1.2 Eficiencia térmica

Se propone analizar 2 eficiencias, una relacionada con el aprovechamiento del combustible utilizado y su conversión en energía radiativa emitida por el quemador, denominada “eficiencia del quemador”, y otra relacionada con el aprovechamiento de

esta potencia radiativa por parte del gasificador cuando este se encuentra en un estado estacionario de temperatura, transformando esta energía calor útil al interior del equipo, denominada "absorción radiativa".

- **Eficiencia del quemador**

Se define la eficiencia del quemador como la porción de energía que el quemador es capaz de transformar en radiación útil, a partir de una potencia teórica lograda por la combustión de una mezcla especifica de aire combustible al interior de dicho quemador. Se presenta en la Ecuación 19, en el capítulo 2.

En la Tabla 6-4 se presentan las potencias de combustión, las cuales se calcularon utilizando el valor energético inferior del combustible (LHV o "Low Heating Value") y una razón aire-combustible presentada para cada prueba en el capítulo 4.

Tabla 6-4: Potencia radiativa y rendimiento del quemador poroso. Fuente: Confección propia.

	Temperatura superficial [K]	**Potencia combustión LVH [kW]**	**Potencia radiativa [kW]**	**Eficiencia del quemador [-]**	**Potencia radiativa especifica [kW/m^2] D=60[mm]**
Prueba 3	1523.8	2.344	0.7346	0.3134	259.8
Prueba 4	1519.1	2.198	0.7256	0.3301	256.6
Prueba 5	1405.8	1.635	0.5321	0.3254	188.2
Prueba 6	1499.7	2.344	0.6892	0.294	243.8

Finalmente se calcula la potencia radiativa específica, la cual será de utilidad cuando se trabaje con concentraciones solares, cuyas potencias se presentarán en estas unidades.

- **Eficiencia de absorción radiativa**

Dos aspectos requieren análisis en relación a esta eficiencia, como se puede observar en las tablas de la sección 5.1.4: la baja eficiencia de absorción radiativa (<2%) y el aumento de la potencia conducida desde el sector 1-2 al 2-3 para las pruebas 3, 4 y 5.

Para la eficiencia de absorción radiativa entre el quemador y la cavidad gasificadora, dos situaciones podrían tener responsabilidad, en proporciones distintas, en este resultado.

En primer lugar, se estima que las bajas eficiencias se deben principalmente a la ausencia de una placa emisora idónea para el propósito de transferir la mayor cantidad de energía hacia el interior de la cavidad gasificadora (grafito recubierto de SiC), mientras que la placa de acero utilizada no puede competir en ese aspecto.

Otra posibilidad es que gran parte de la energía capturada por la cavidad gasificadora se esté moviendo, al interior de esta cavidad, a través de la cañería que conforma la cavidad. Al no tener las temperaturas exactas de este componente, es imposible tener exactitud al respecto, pero si se consideran las temperaturas medidas de las esferas como si fueran las temperaturas de la cañería, aproximadamente 20% de la energía proveniente del quemador se estaría transfiriendo por él.

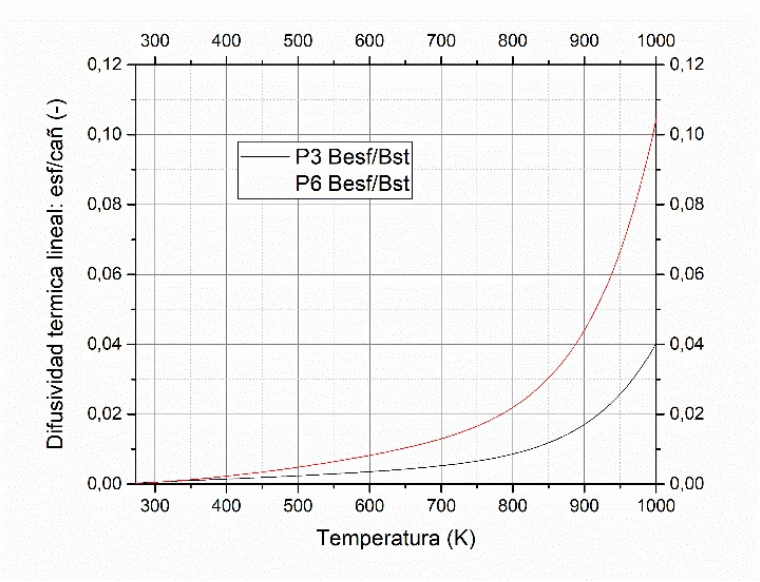


Gráfico 32: Razón entre la difusividad térmica lineal del lecho de esferas y la cañería, para las pruebas 3 y 6. Se considera el área transversal de cada componente. Fuente: confección propia.

Por otra parte, que el sector 2-3 este conduciendo más energía que el sector 1-2 podría tener dos razones.

De forma similar a la primera situación, se estima que gran parte de la energía que recibe el primer sector, por medio de la placa emisora, se mueve a través de la cavidad al ser conducida por las paredes de la cañería y no por las esferas en sí. De esta forma, el sector 2-3 recibe, además de la energía proveniente del sector 1-2, una cantidad no menor de energía desde la cañería y por lo tanto tendrá mayor potencia de conducción efectiva. El resto de los sectores no se vería afectado ya que la cañería podría no haber desarrollado temperaturas necesarias a esas alturas, para generar esta diferencia, mientras que en la prueba 6 la mayor difusividad térmica de las esferas huecas podría no haber permitido que este efecto se notara.

Más aun, debido a que la medición de la temperatura es tan cercana a la pared de la cañería, esta posibilidad se ve acrecentada. Esto se puede observar en el Gráfico 32.

La otra posibilidad es que esta diferencia de potencia conducida tenga que ver con el error experimental que deriva desde los instrumentos de medición y el banco de pruebas, el cual es estimado cercano al 10%.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó, construyó e implementó un reactor de lecho poroso inerte para la gasificación de combustibles sólidos de 5 [kWt], que permitió evaluar experimentalmente los perfiles térmicos y la eficiencia del proceso con el uso de un lecho poroso inerte compuesto por esferas compactas sólidas y esferas huecas de alúmina. Para simular de cierta manera el aporte de energía solar al reactor, se utilizó un quemador poroso.

Dentro de las principales conclusiones se encuentran:

- Las esferas compactas sólidas tienen una mayor inercia térmica que las esferas huecas, lo cual afecta las velocidades de gasificación y la cantidad de energía necesaria para llevar al reactor a temperatura de proceso.
- La menor inercia térmica de las esferas huecas permitirá utilizarlas donde se requiera alcanzar rápidamente temperaturas elevadas, como por ejemplo, el sector donde el combustible está en contacto directo con la placa emisora.
- La alta inercia térmica de las esferas compactas podrá ser de utilidad cuando exista intermitencia solar que no permita controlar la potencia solar entrante, ya que será capaz de mantener la temperatura de proceso por más tiempo.
- La conductividad efectiva de este tipo de lechos porosos inertes depende altamente de la radiación entre esferas y del diámetro de las esferas, mientras que no depende de sus condiciones conductivas tradicionales. Esto implica que es posible sustituir las esferas compactas por esferas huecas sin sacrificar condiciones térmicas cruciales para el funcionamiento de este tipo de

gasificadores, siempre y cuando el diámetro externo se mantenga cercano en valor.

- No se pudieron alcanzar conclusiones importantes respecto de las diferencias en las velocidades de calentamiento de cada tipo de esfera, ya que ni la masa, ni la conductividad efectiva por sí sola, ni la difusividad térmica, logran explicar este fenómeno a cabalidad. Además, la medición de temperaturas tan cercana a la cañería que contenía las esferas, podría haber tenido alguna injerencia en las mediciones, puesto que la cañería probablemente fue un componente involucrado en la transferencia de calor.
- La cantidad de energía que fue posible utilizar a partir de la radiación emitida por la superficie superior de quemador fue bastante baja, lo cual fue atribuido principalmente a las condiciones de la placa emisora de acero utilizada, por lo que se requiere sustituirla por un material con mejores condiciones de absorción de radiación y así mejorar estas eficiencias. Además, un problema similar al del párrafo anterior, respecto de la cercanía entre la cañería y los termopares, podría haber tenido injerencia en este aspecto también.

7.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones a considerar cuando este equipo vuelva a ser utilizado, ya sea en las condiciones actuales o en las solares esperadas a futuro.

- **Esferas de alúmina**

Como se comentó en las conclusiones, las distintas propiedades de las esferas de alúmina, ya sean tipo compactas o tipo huecas, pueden ser de utilidad al considerar distintos problemas, como la velocidad de calentamiento o la inercia térmica frente a intermitencia solar o cambio de carga.

Se recomienda utilizar esferas huecas en los sectores cercanos a la placa emisora, para lograr alcanzar, haciendo uso de su alta difusividad térmica, las temperaturas de proceso en el menor tiempo posible.

Por otro lado, se recomienda la utilización de esferas compactas en los sectores posteriores del gasificador, siempre y cuando se pueda pronosticar una alta intermitencia solar durante las horas de operación. Otra posibilidad para el uso de este tipo de esferas corresponde al caso en el que se logre realizar cambios de carga en un tiempo acotado y de forma eficiente, que les permita a este tipo de esferas mantener su energía interna entre cambios de carga, para poder luego entregar parte de esa energía al combustible de la nueva carga, a modo de precalentamiento.

Paralelamente, se recomienda considerar la radiación al interior de las esferas huecas en los futuros análisis donde este tipo de esferas estén involucradas, ya que se estima que podría tener importancia en los valores de transferencia de calor de este tipo de lechos porosos inertes.

- **"Data Logger"**

Se recomienda cambiar o reparar el "data logger", el cual nunca pudo funcionar de manera adecuada. El problema principal tiene que ver con que las mediciones de temperatura comenzaban en valores inferiores a 0ºC, lo cual no tiene sentido. Se probaron diferentes formas de solucionar el problema, y se pudo descartar que este tuviera que ver con los termopares o los cables compensados, ya que al utilizar otro "data logger" este problema desaparecía.

- **Cavidad solar**

Se debería recubrir esta cavidad con un material aislante y que sea capaz de no empeorar, y si es posible mejorar, las condiciones ópticas y solares de esta cavidad, permitiendo por ejemplo que la radiación emitida por los componentes al interior de este sector sea reflejada en dirección de la placa emisora.

Las bridas que sostienen la placa emisora están en contacto con la atmósfera y reciben radiación solar concentrada, condiciones idóneas para provocar la oxidación de este componente. Se recomienda utilizar un material que sea capaz de resistir estas condiciones de trabajo sin oxidarse o comprometer sus propiedades.

- **Cavidad gasificadora**

La placa emisora será sometida a impactos relacionados con el giro del reactor y el movimiento del combustible en su interior producto de esto, por lo que es necesario comprobar que una placa de grafito recubierto de SiC será capaz de soportar estos impactos sin fracturarse, considerando además que si esta placa es "rayada" por el combustible, exponiendo el interior de grafito a las condiciones existentes en la cavidad gasificadora, es muy probable que esta placa comience a gasificarse al igual que el combustible destinado para este propósito.

A pesar de que las presiones alcanzadas al interior de la cavidad gasificadora no deberían diferir mucho de la presión atmosférica, es de interés comprobar que este sea el caso y evitar así algún tipo de inconveniente relacionado. Es por esto que se recomienda hacer esta medición cuando se pruebe el reactor en las condiciones de trabajo para las cueles fue diseñado.

- **Ubicación de los termopares**

Con el fin de caracterizar las diferencias en transferencia de calor entre los tipos de esferas de alúmina empleadas en este trabajo, se recomienda comparar estos resultados con unos de similares características, pero con termopares situados en el eje de la cavidad gasificadora, con el fin de eliminar las paredes de la cavidad como un factor determinante de las mediciones.

- **Placa emisora**

Se recomienda utilizar una placa emisora ad-hoc para la función que cumple en este reactor, ya que de este componente dependerá gran parte de la eficiencia de absorción radiativa del gasificador diseñado en este trabajo. Las características de esta placa están detalladas en el capítulo 3.

CAPÍTULO 8

8. REFERENCIAS

[1] British Petroleum, “Energy Outlook,” 2019.

[2] E. Dogan, B. Turkekul, “CO 2 emissions , real output , energy consumption , trade , urbanization and financial development : testing the EKC hypothesis for the USA,” Environ. Sci. Pollut. Res. 23 (2016) 1203–1213.

[3] British Petroleum, “Statistical Review of World Energy,” (2019).

[4] V. Ramaswamy, C. Leovy, H. Rodhe, K. Shine, W.-C. Wang, D. Wuebbles, Chapter 7: “Radiative Forcing of Climate,” 1991.

[5] IPCC, “Climate Change 2014 Synthesis Report,” 2014.

[6] IEA, “The Future of Hydrogen,” 2019.

[7] F. Yilmaz, M.T. Balta, R. Selbaş, “A review of solar based hydrogen production methods,” Renew. Sustain. Energy Rev. 56 (2016) 171–178.

[8] C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas, N. Moussiopoulos, Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes, 29 (2004) 1443–1450.

[9] M. Puig-arnavat, E.A. Tora, J.C. Bruno, A. Coronas, “State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock,” Sol. ENERGY. 97 (2013) 67–84.

[10] N. Piatkowski, A. Steinfeld, “Solar gasification of carbonaceous waste feedstocks in a packed-bed reactor-dynamic modeling and experimental validation,” Rom. J. Morphol. Embryol. 56 (2011) 1495–1502.

[11] N. Piatkowski, C. Wieckert, A.W. Weimer, A. Steinfeld, “Solar-driven gasification of carbonaceous feedstock-a review,” Energy Environ. Sci. 4 (2011) 73–82.

[12] MinEnergia, “Energía 2050-Politica Energetica de Chile,” 2016.

[13] Fondo monetario internacional, “Article IV Consultation for Chile,” 2018.

[14] Comisión Nacional de Energia, “Balance nacional de energía,” (2017). http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/.

[15] MMA, “Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022,” 2017.

[16] P. v. Zedtwitz, A. Steinfeld, “The solar thermal gasification of coal - Energy conversion efficiency and CO2 mitigation potential,” Energy. 28 (2003) 441–456.

[17] T. Kodama, “High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels,” Prog. Energy Combust. Sci. 29 (2003) 567–597.

[18] N. Piatkowski, C. Wieckert, A. Steinfeld, “Experimental investigation of a packed-bed solar reactor for the steam-gasification of carbonaceous feedstocks,” Fuel Process. Technol. 90 (2009) 360–366.

[19] T. Osinga, U. Frommherz, A. Steinfeld, C. Wieckert, “Experimental investigation of the solar carbothermic reduction of ZnO using a two-cavity solar reactor,” ISEC 2003. (2003).

[20] A. Steinfeld, M. Schubnell, “Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver,” Sol. Energy. 50 (1993) 19–25.

[21] C. Wieckert, A. Meier, A. Steinfeld, “On Indirectly irradiated solar receiver-reactors for high-temperature thermochemical processes,” SED 2002. (2002).

[22] C. Wieckert, N. Tzouganatos, A. Steinfeld, C. Wieckert, N. Tzouganatos, A.

Steinfeld, “Development of a 5 kW th Windowless Packed-Bed Reactor for High-Temperature Solar Thermochemical Processing,” (2017).

[23] M.M. Kamal, A. Mohamad, “Combustion in porous media,” (2006).

[24] Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho, P.G. Klemens, “Thermophysical properties of matter,” 1971.

[25] Z. Jia, Z. Wang, D. Hwang, L. Wang, “Prediction of the Effective Thermal Conductivity of Hollow Sphere Foams,” ACS Appl. Energy Mater. 1 (2018) 1146–1157.

[26] V. Bubnovich, M. Toledo, “Analytical modelling of filtration combustion in inert porous media,” Appl. Therm. Eng. 27 (2007) 1144–1149.

[27] L.A. Kennedy, J.P. Bingue, A. V Saveliev, A.A. Fridman, S.I. Foutko, “Chemical structures of methane-air filtration combustion waves for fuel-lean and fuel-rich conditions,” Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 1431–1438.

[28] Y.A. Cengel, Heat and Mass Transfer, fundamentals & applications, 2015.

[29] G. Ruiz, N. Ripoll, N. Fedorova, A. Zbogar-rasic, V. Jovicic, A. Delgado, M. Toledo, International Journal of Heat and Mass Transfer Experimental and numerical analysis of the heat transfer in a packed bed exposed to the high thermal radiation flux, Int. J. Heat Mass Transf. 136 (2019) 383–392. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.009.

[30] E.L. Saavedra, “Implementación de quemador radiativo en un deshidratador solar de fruta,” 2018.

[31] LumaSense Tecchnologies, “ISQ 5-LO IMPAC-Pyrometer Operation Manual,” (2009).

[32] Aalborg, “Operating manual: GFC mass flow controller,” (2018).

[33] Y.A. Cengel, M.A. Boles, “Termodinamica 6ºED,” n.d.

[34] LumaSense Tecchnologies, “IMPAC Infrared Thermometers: ISQ5,” (2010).

ANEXOS

8.1 Anexo A: Potencia de combustión y flujos de aire y combustible

Nota: Todos los valores de densidad están calculados bajo condiciones de "Normal temperature and pressure" (NTP), lo cual significa 20[ºC] y presión atmosférica.

El controlador de flujo másico (CFM) utilizado para aire estaba calibrado para este fluido y por lo tanto los valores indicados por el equipo pueden ser utilizados directamente. En el caso del gas natural, el CFM estaba calibrado para CO_2 por lo que los valores indicados deben ser ajustados por la Ecuación 21: relación de volumen en CFM..

$$K = \frac{\dot{V}_{GN}}{\dot{V}_{CO_2}} = \frac{K_{CH_4}}{K_{CO_2}} \qquad K_{CH_4} = 0.7175\ ;\ K_{CO_2} = 0.7382$$

Ecuación 21: relación de volumen en CFM. Fuente: Adaptado de [32]

Al calcular potencia de la combustión realizada en el quemador poroso utilizando las Ecuación 23 y Ecuación 24, se debe, en primer lugar, calcular la masa de combustible que ingresa al quemador, como muestra la Ecuación 22.

$$\dot{m}_{comb}[kg/min] = \frac{\dot{V}_{comb}[NL/min] \cdot \rho[kg/Nm^3]}{1{,}000[NL/Nm^3]} \qquad \rho = 0.7326[kg/Nm^3]$$

Ecuación 22: Masa de combustible. Fuente: Confección propia.

$$P[kW] = \frac{\dot{m}_{comb}[kg/min] \cdot X[kJ/kg]}{60[s/min]}$$

Ecuación 23: Potencia del quemador. Fuente: Confección propia.

$$X\epsilon\{LHV, HHV\};\ LHV = 45.92 \cdot 10^3[kJ/kg]; HHV = 50.84 \cdot 10^3[kJ/kg]$$

Ecuación 24: LHV y HHV del gas natural, calculado a partir de la fracción másica de los gases que lo componen. Fuente: Datos obtenidos de [33].

Para calcular la razón aire-combustible se debe primero calcular el flujo molar de aire, como muestran las Ecuación 25 y Ecuación 26.

$$\dot{N}_a[kmol/min] = \frac{\rho_a[kg/Nm^3] \cdot \dot{V}_a[NL/min]}{\overline{M}_a[kg/kmol] \cdot 1{,}000[NL/Nm^3]}$$

$$\rho_a = 1.204[kg/Nm^3];\ \overline{M}_a = 28.966[kg/kmol]$$

Ecuación 25: Flujo molar de aire. Fuente: Confección propia.

$$\lambda = \frac{\dot{N}_a[kmol/min]}{N_{a,e}[kmol/kg_{comb}] \cdot \dot{m}_{comb}[kg/min]};\ N_{a,e} = 0.5437[kmol/kg_{comb}]$$

Ecuación 26: Razón aire combustible. Fuente: Confección propia.

Finalmente tenemos, para las distintas pruebas, los datos presentados en las tablas Tabla 0-1 y Tabla 0-2.

Tabla 0-1: Potencia y flujos de aire y combustible para las pruebas realizadas. Fuente: Creación propia.

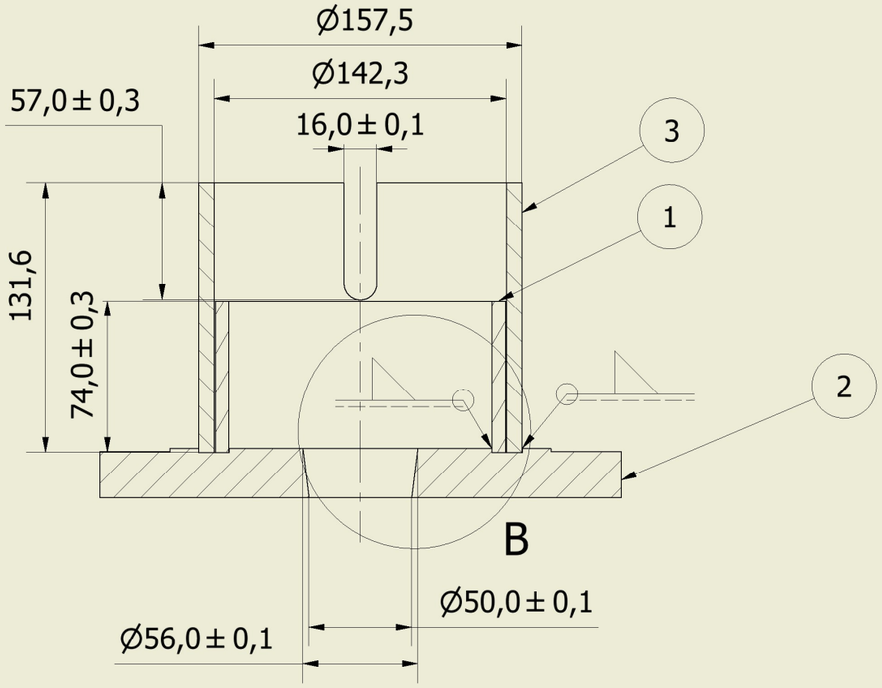
Pruebas	**Volumen de aire** $[NL/min]$	**Volumen de comb (CFM)** $[NL/min]$	**Volumen de comb** $[NL/min]$	**Masa de comb** $[kg/min]$	**Potencia** $[kW]$
1	30	3	2.916	0.00214	1.635 (LHV) 1.810 (HHV)
2	50	4.09	3.975	0.00291	2.227 (LHV) 2.466 (HHV)
3 y 6	50	4.3	4.18	0.00306	2.344 (LHV) 2.595 (HHV)
4	46.3	4.03	3.92	0.00287	2.198 (LHV) 2.433 (HHV)
5	34.8	3	2.916	0.00214	1.635 (LHV) 1.810 (HHV)

Tabla 0-2: Razón aire-combustible para las pruebas realizadas. Fuente: Creación propia.

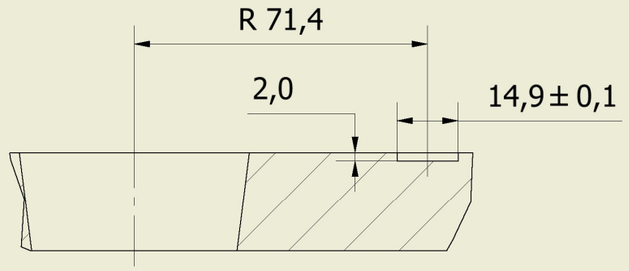
Pruebas	**Masa de combustible** $[kg/min]$	**Flujo Molar** $\left[\frac{kmol}{min}\right]$	**Razón a-combustible**
1	0.00214	0.001247	1.07
2	0.00291	0.002078	1.31
3 y 6	0.00306	0.00208	1.248
4	0.00287	0.001925	1.23
5	0.00214	0.00155	1.24

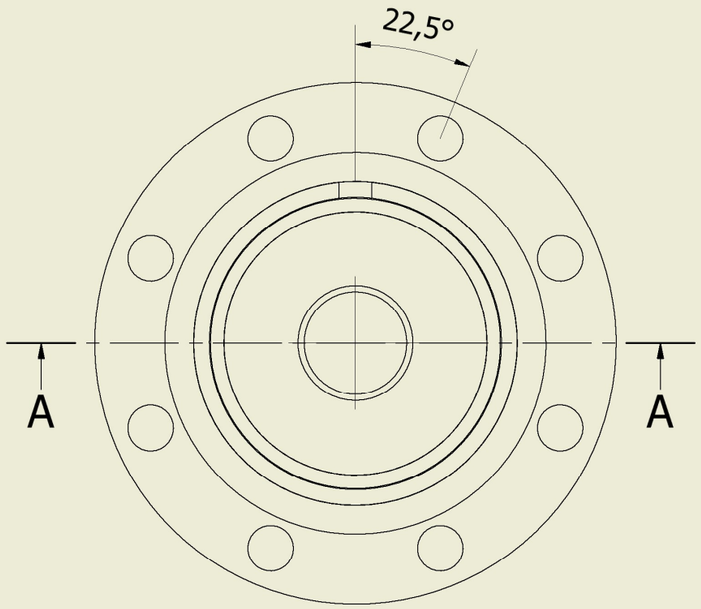
8.2 Anexo B: Planos de construcción

A-A (1 : 3)



B (2 : 3)

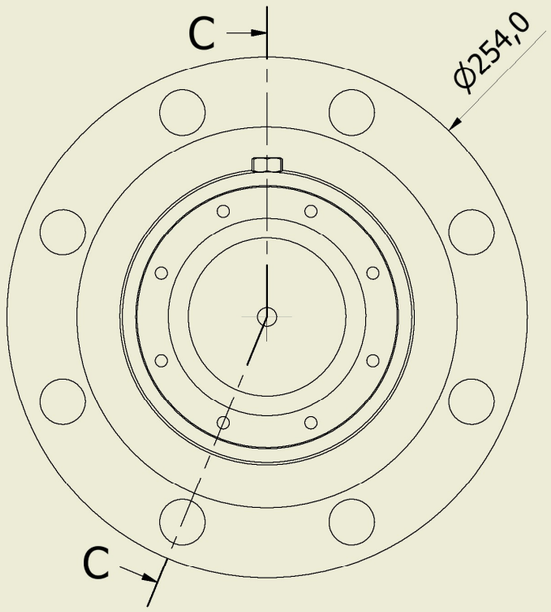




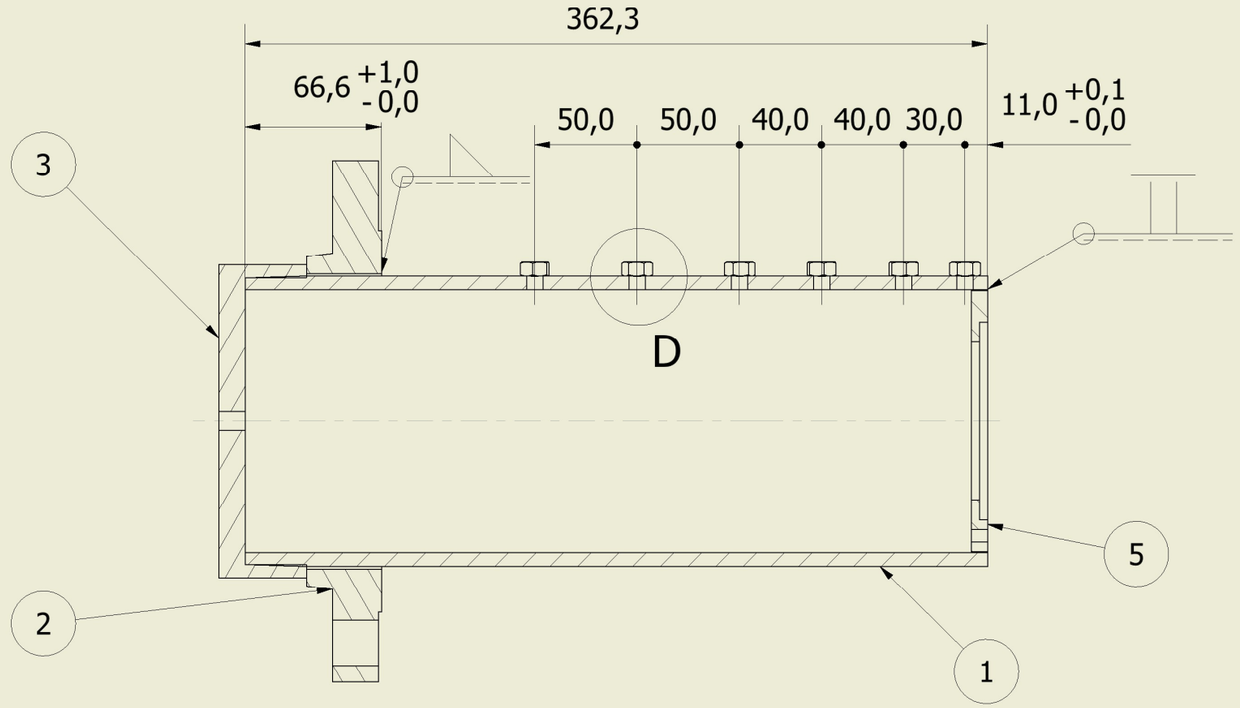
Notas:
-Todas las dimensiones en milimetros

PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	74,000 mm	ASME B36.10M Pipe 5 - Schedule 40
2	1	ASME B16.5 Flange Blind - Class 150 51
3	131,600 mm	Tuberia 1

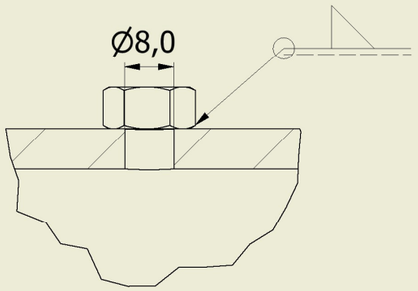
Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Cavidad Solar		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja A3	Escala 1 : 3 / Hoja: 1

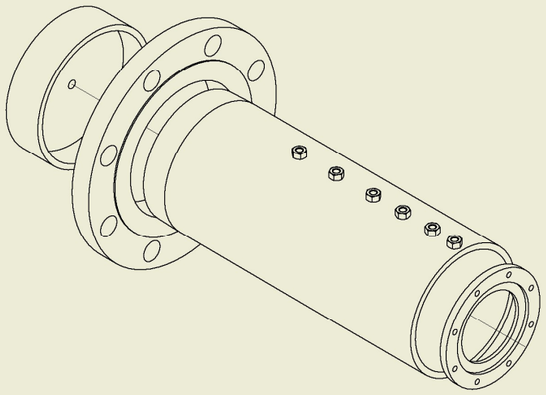


C-C (1 : 3)



D (1 : 1)



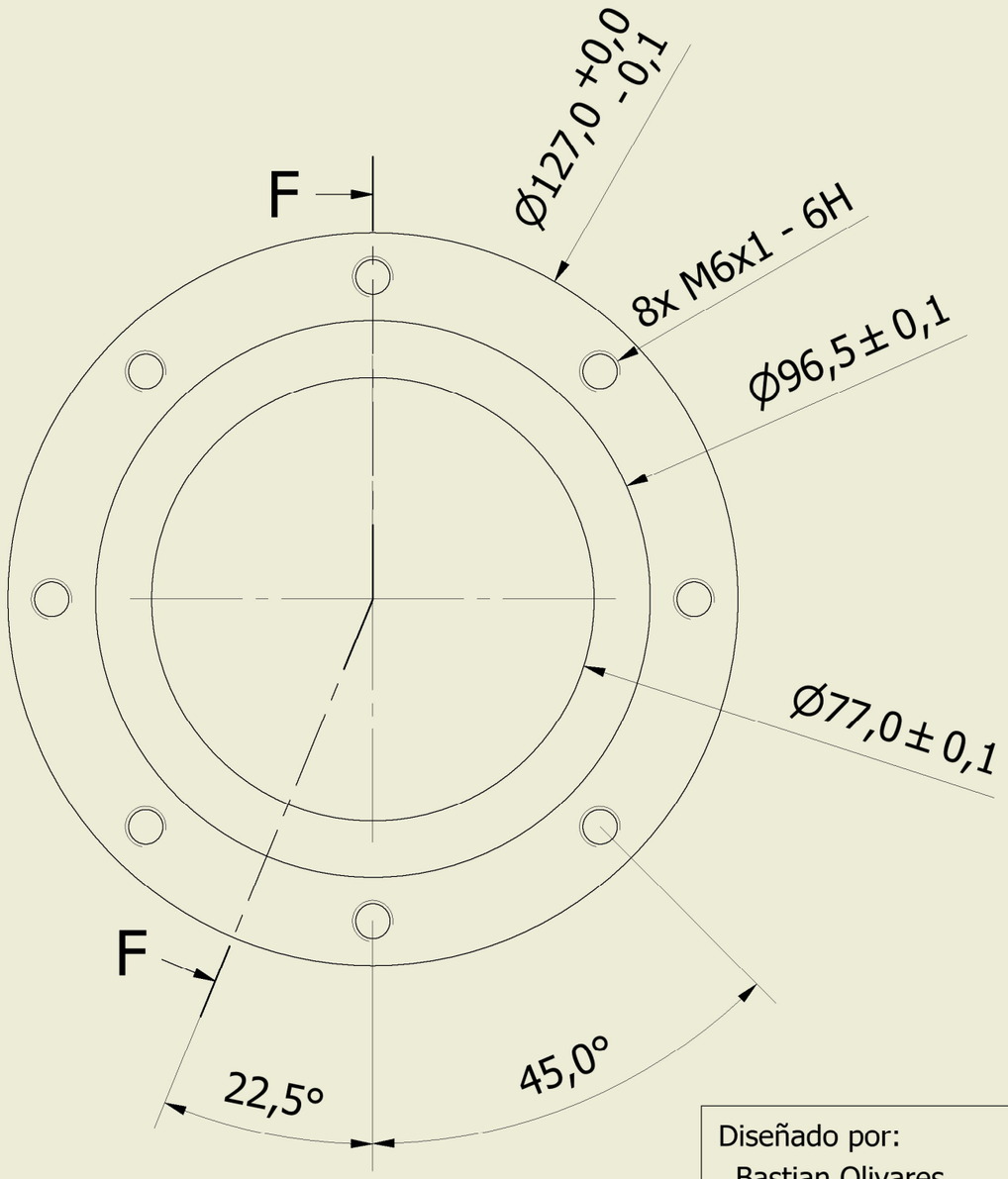


Notas:
-Todas las dimensiones en milimetros

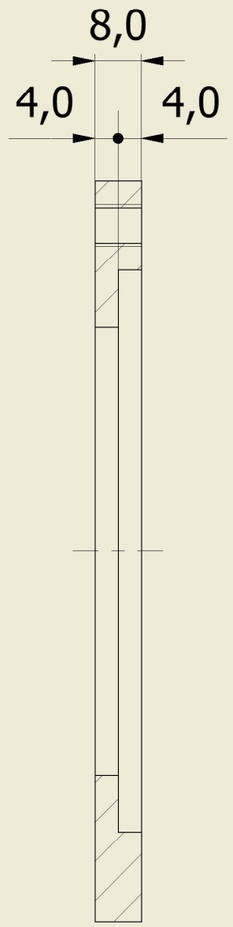
PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER
1	381,000 mm	ASME B36.10M Pipe with Threaded Ends 5 - Schedule 40 - 15
2	1	ASME B16.5 Flange Slip-On Welding - Class 150 5
3	1	Tapa Trasera
4	6	AS 1112 - M8 Type 8
5	1	Anillo 2

Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Cavidad Gasificadora		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja: A3	Escala: 1 : 3	Hoja: 2

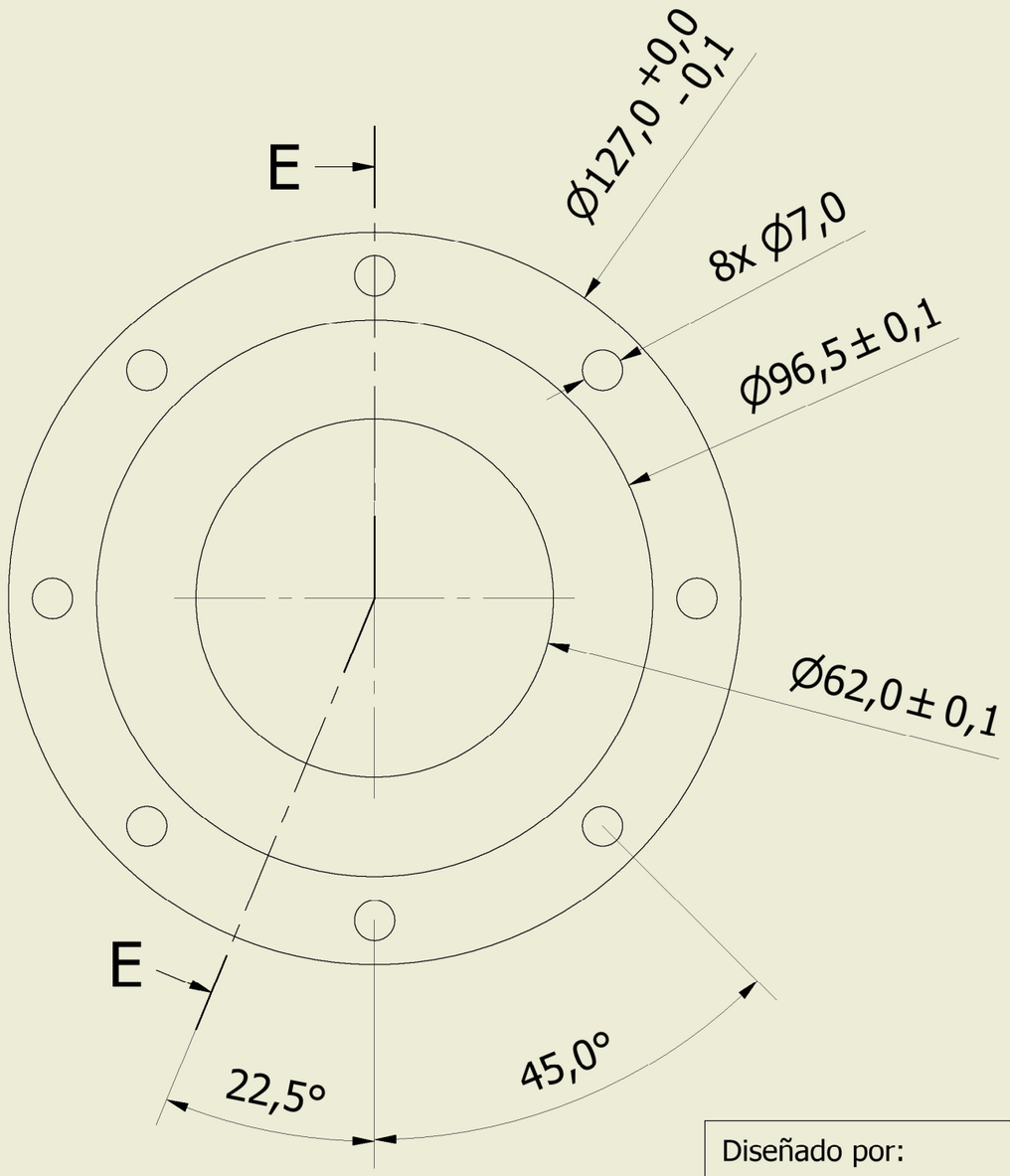


F-F (2:3)

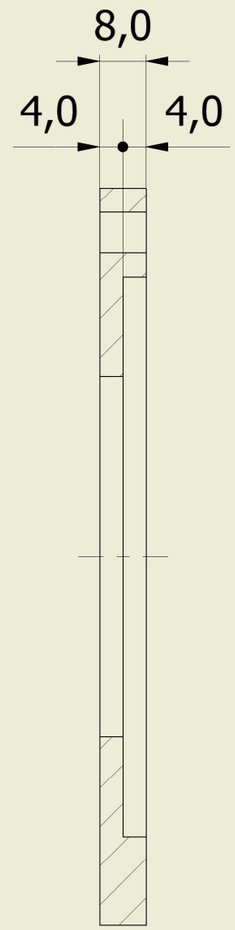


Notas:
-Todas las dimensiones en milimetros

Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Anillo 2		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja: A4	Escala: 2:3 / Hoja: 3

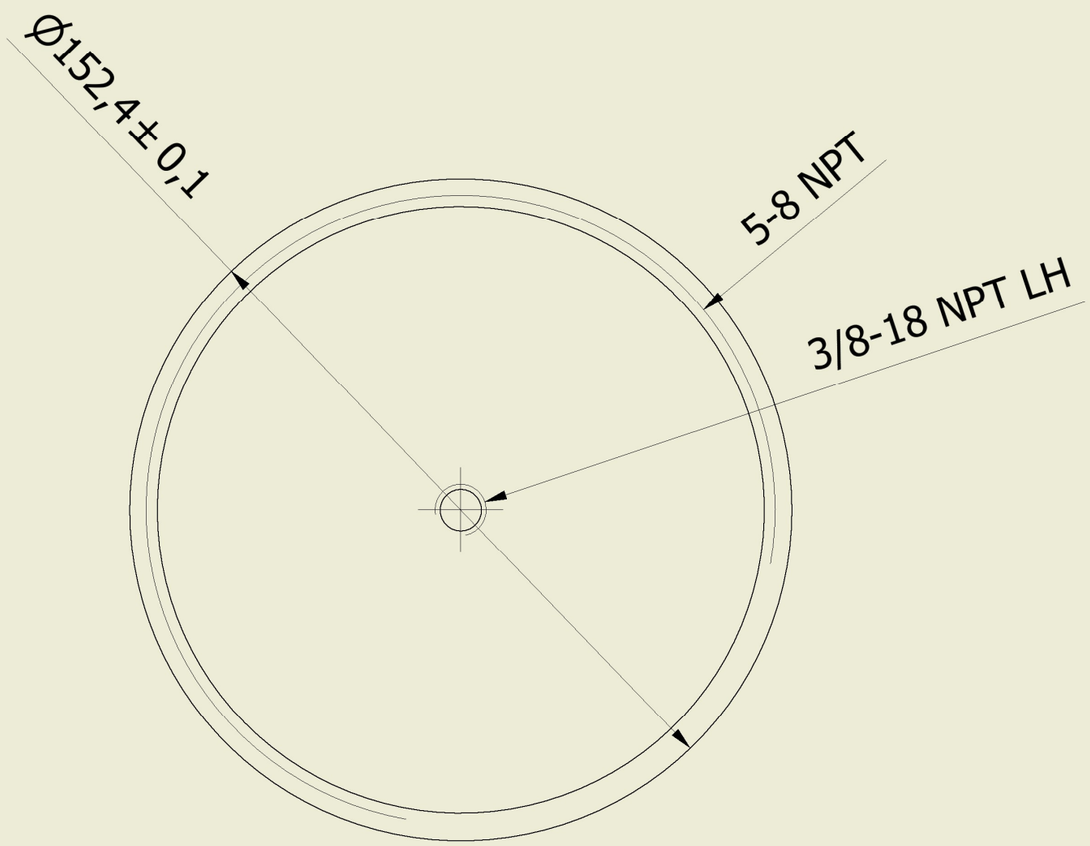


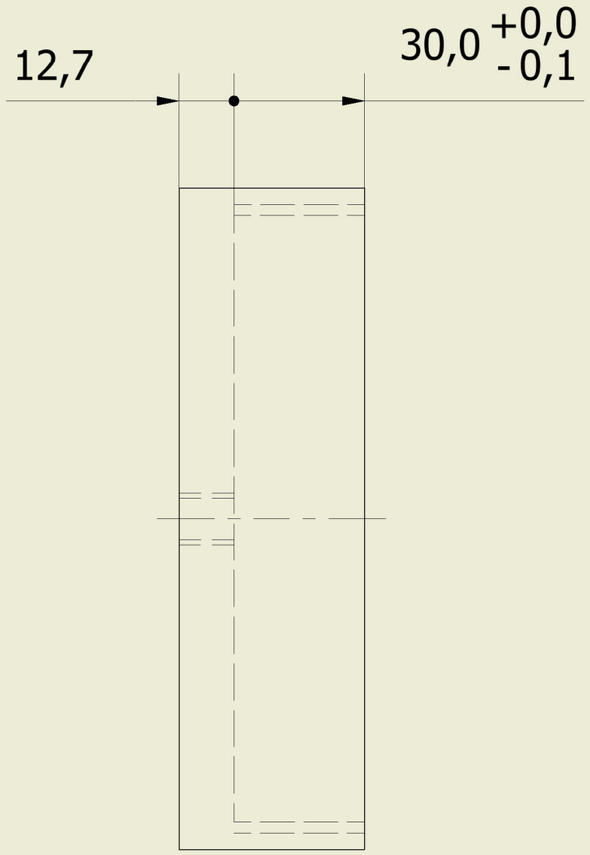
E-E (2 : 3)



Notas:
-Todas las dimensiones en milimetros

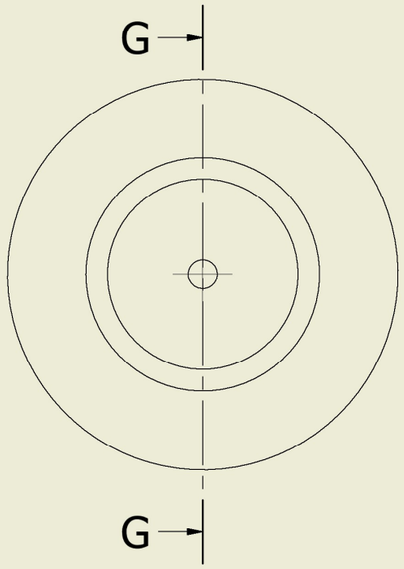
Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Anillo 1		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja: A4	Escala: 2 : 3 / Hoja: 4



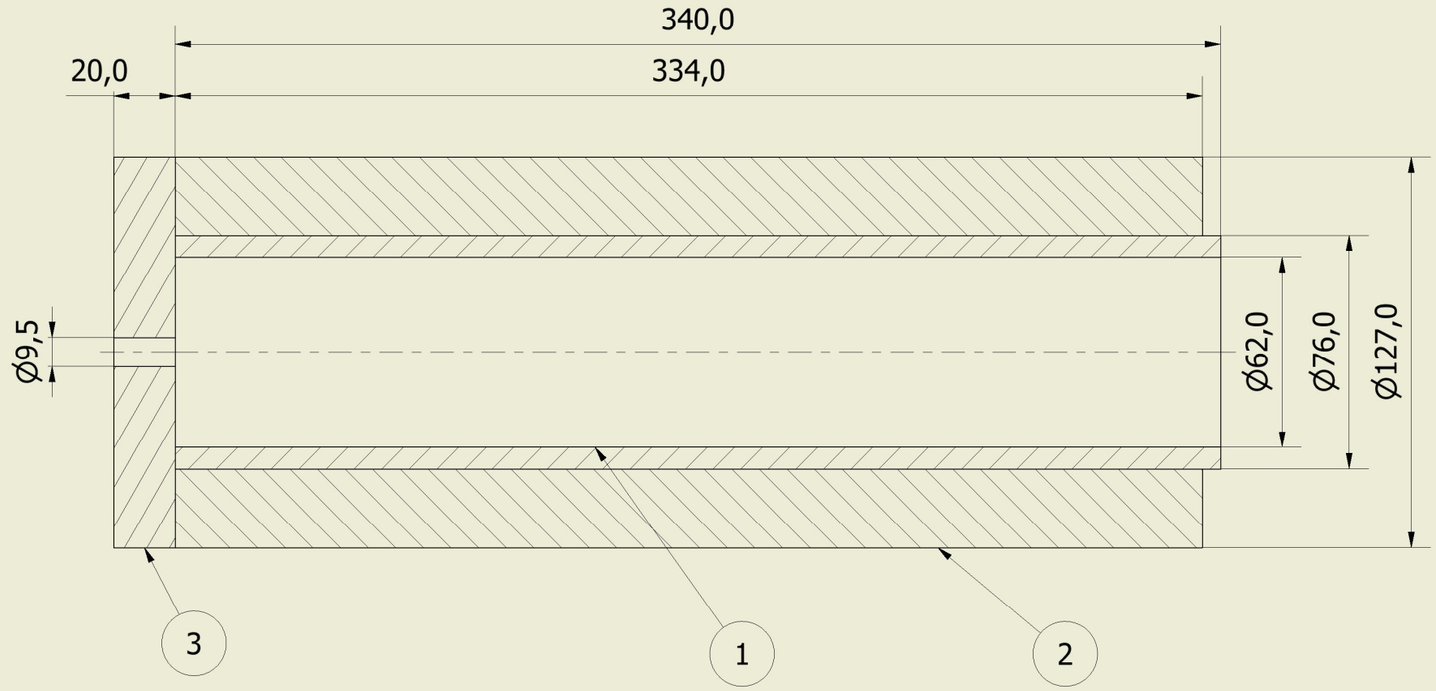


Notas:
-Todas las dimensiones en milimetros

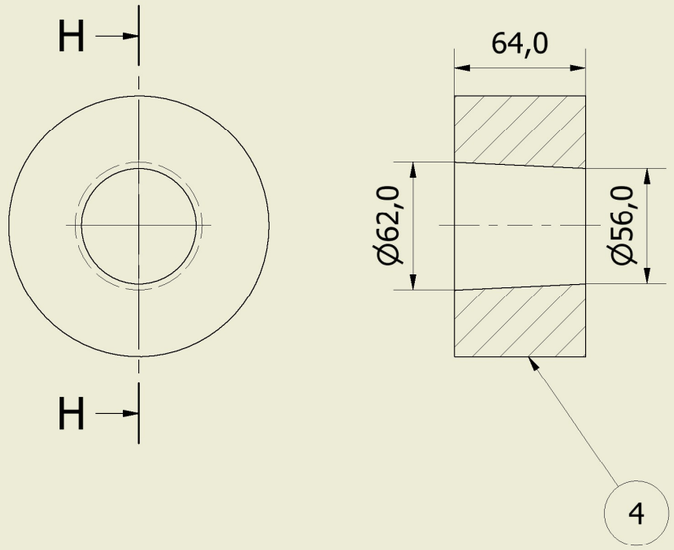
Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Tapa Trasera		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja: A4	Escala: 1 : 2	Hoja: 5



G-G (1 : 2)



H-H (1 : 3)



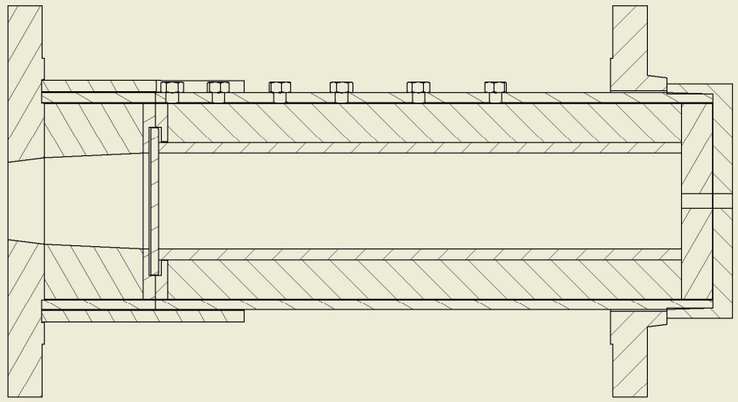
Notas:
-Todas las dimensiones en milimetros

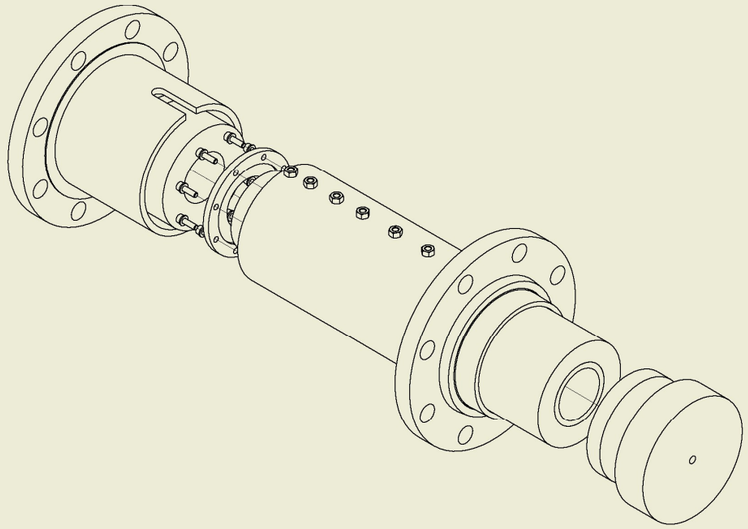
PARTS LIST

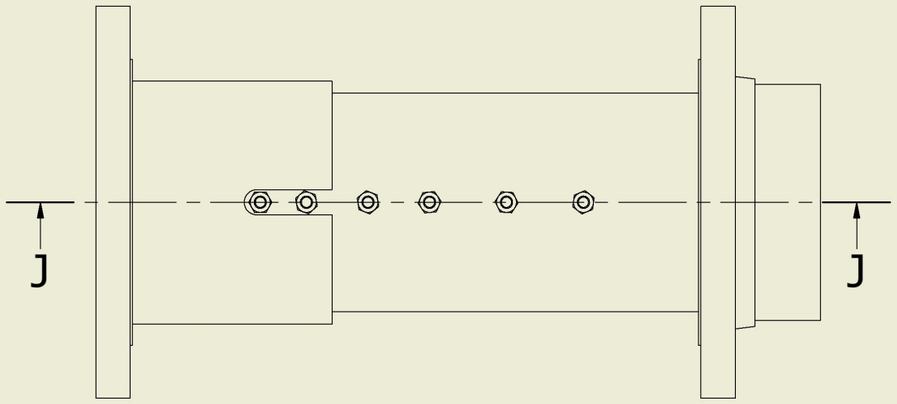
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Manto Ceramico
2	1	Manto de Aislación
3	1	Aislación Trasera
4	1	Aislación Frontal

Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Aislación Interna		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja A3	Escala 1 : 2 / Hoja: 6

J-J (1 : 4)







PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Aislación Interna
2	1	Anillo 1
3	1	Cavidad Gasificadora
4	1	Cavidad Solar
5	8	ISO 7089 - 6
6	8	ISO 4762 - M6 x 20
7	1	placa_emisora

Diseñado por: Bastian Olivares	Revisado por: Nicolas Ripoll	Fecha: 22/01/2019	
Titulo: Gasificador Completo		Proyecto: Gasificador Solar	
		Tamaño de hoja A3	Escala 1 : 4	Hoja: 7

8.3 Anexo C: Área visible del pirómetro proporcional

El pirómetro proporcional analiza una circunferencia de la superficie donde el lente está enfocado. Esta circunferencia será en la práctica una elipse, debido a la inclinación que el pirómetro tendrá en relación con la superficie superior del quemador poroso, como muestra la Figura 12.

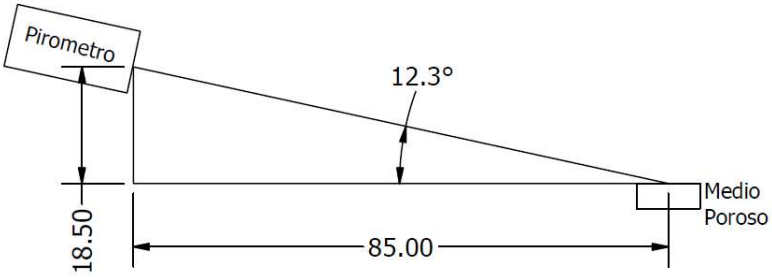


Figura 12: Esquema posicionamiento del pirómetro respecto del quemador poroso (el cual se denomina como medio poroso en la figura). Dimensiones en centímetros. Fuente: Confección propia.

Es de interés conocer estas dimensiones, ya que se debe asegurar que las temperaturas medidas corresponden específicamente a las del quemador poroso, es decir, la elipse no podrá sobrepasar los bordes de la superficie de este componente. De las dos dimensiones características de una elipse, la longitud mayor corresponde a la dimensión de más interés en esta situación, ya que es la que sobrepasara los límites de la circunferencia antes que cualquier otra.

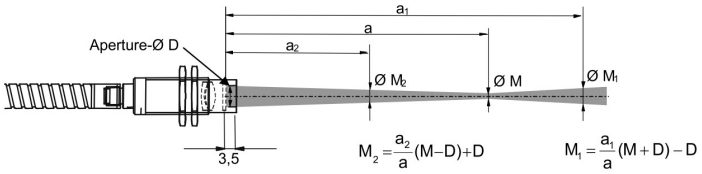


Figura 13: Proyección de la circunferencia de visibilidad del pirómetro utilizado y las fórmulas entregadas por el fabricante para el cálculo de su diámetro. Fuente: Adaptado de [31].

En primer lugar, es necesario caracterizar el tamaño de la circunferencia formada por el pirómetro. Esta se puede calcular utilizando la información en la Figura 13 y la Ecuación 27, además de considerar que para este modelo de pirómetro $a = 800[mm]$, $D = 6[mm]$ y $M = 8[mm]$.[34]

$$M_x = \frac{a_x \cdot (M + D)}{a} - D$$

Ecuación 27: Calculo del diámetro de la circunferencia de visibilidad del pirómetro al utilizar un "a" superior al entregado por el fabricante. Todas las variables corresponden a las ilustradas en la Figura 13. Fuente: Adaptado de [31].

La distancia directa desde el pirómetro al centro del quemador poroso, o la hipotenusa de la Figura 11, es de $a_1 = 869.97[mm]$. Además de esta distancia, se deben considerar dos más, en los lugares donde se comenzará ($a_2 < a_1$) y terminará ($a_3 > a_1$) de generar la elipse en cuestión. Debido a que a_1 se encuentra muy sobre el valor de $a = 800[mm]$, se estima que a_2 también lo hará y por lo tanto se utilizó la Ecuación 27, al igual que para a_3.

El análisis geométrico de estos valores y de la Figura 12, entrega finalmente el triángulo de la Figura 14, donde la suma de los valores c_2 y c_3 corresponde al lado más grande de la elipse que se busca caracterizar. Los puntos 2 y 3 representan, respectivamente, las posiciones donde se comenzará y terminará a formar la elipse de medición.

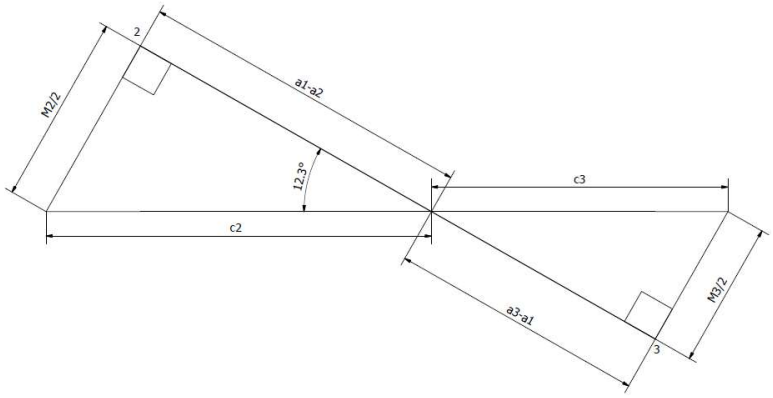


Figura 14: Triangulo a resolver para obtener la información requerida. Fuente: Confección propia.

Se requiere entonces resolver la Ecuación 28, con el fin de encontrar a_2 y a_3, y luego calcular M_2 y M_3, para finalmente calcular los buscados c_2 y c_3.

$$tg(12.3°) = \frac{M_2}{2 \cdot (a_1 - a_2)} = \frac{M_3}{2 \cdot (a_3 - a_1)}$$

Ecuación 28: Relación trigonométrica útil para este caso. Todas las variables corresponden a las ilustradas en la Figura 14. Fuente: Confección propia.

Finalmente, al resolver ambos triángulos, se obtiene que $c_2 + c_3 = 43.37[mm]$ y por lo tanto se tienen 16.63[mm] de holgura entre la elipse de medición y los bordes del quemador poroso, el cual tiene un diámetro superficial de 60[mm].

8.4 Anexo D: Perfil de temperaturas de la prueba 2

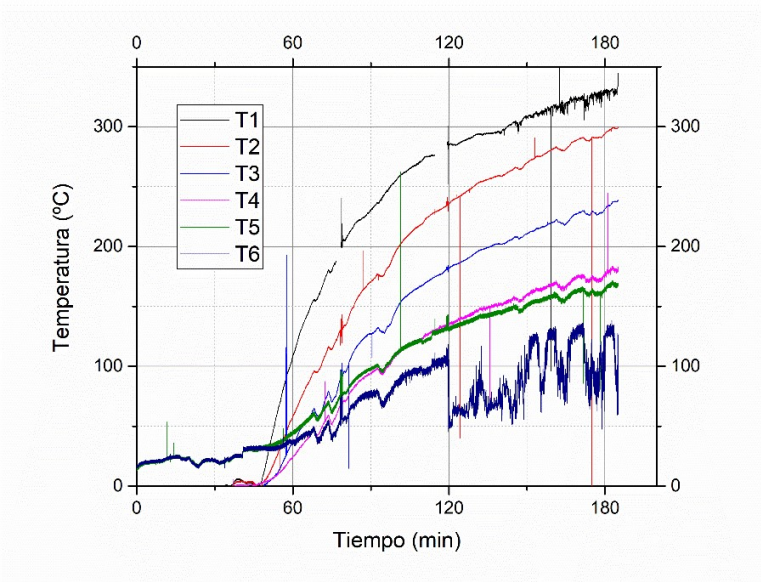


Gráfico 33: Perfil de temperatura de la prueba 2. Fuente: confección propia.

8.5 Anexo E: Composición de los gases de escape saliendo desde el quemador

A continuación, se presenta información relacionada a los gases de escape de la combustión que tuvo lugar al interior del quemador poroso en las pruebas 3, 4 y 5.

Esta información se obtuvo utilizando el analizador de gases "TESTO 350 xl" y la toma de datos se realizó en una fecha distinta a la de las pruebas, pero utilizando las mismas condiciones de aire y combustible.

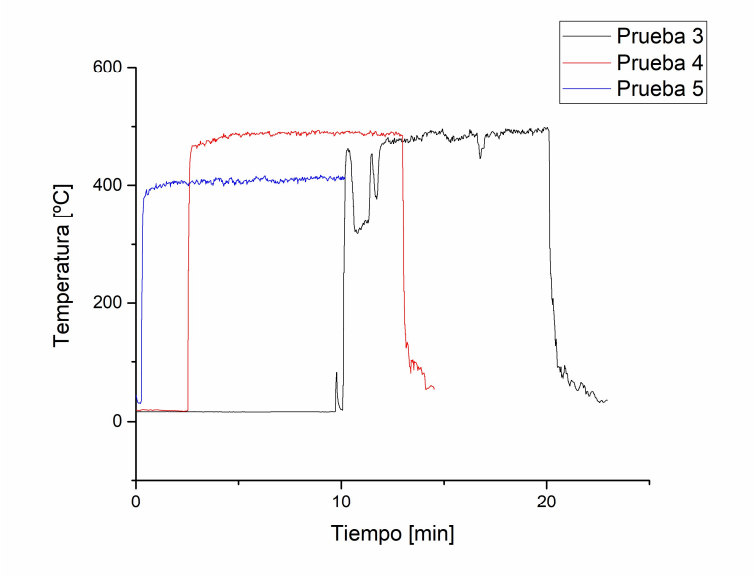


Grafico 34: Temperatura de los gases de escape desde el quemador para las condiciones de aire combustible de las pruebas 3, 4 y 5. Fuente: confección propia.

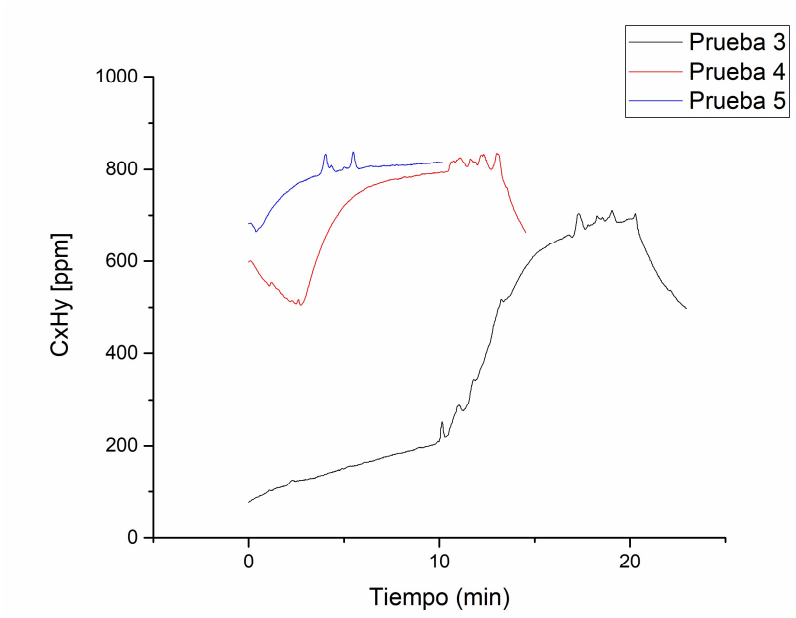


Grafico 35: Cantidad de C_xH_y de los gases de escape desde el quemador para las condiciones de aire combustible de las pruebas 3, 4 y 5. Fuente: confección propia.

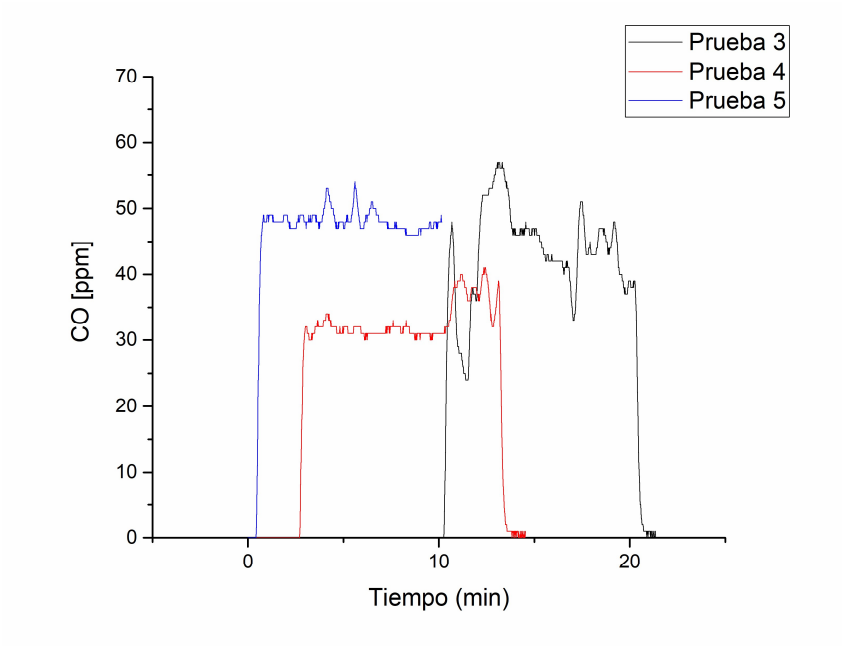


Grafico 36: Cantidad de CO de los gases de escape desde el quemador para las condiciones de aire combustible de las pruebas 3, 4 y 5. Fuente: confección propia.