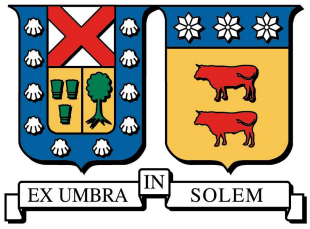
Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Mecánica
Valparaíso, Chile



Diseño, construcción e instalación de un concentrador solar tipo Cassegrain

Felipe Tomás Cisternas Bernal

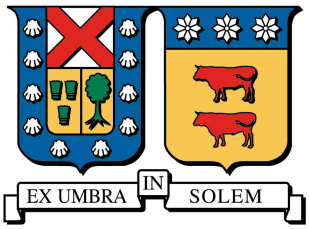
Año 2022

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Mecánico

Profesores guía:
Dr. Ing. Mario Toledo T.
Correferente:
PhD. Rodrigo Barraza V.

Valparaíso, Marzo 2022.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Mecánica
Valparaíso, Chile



Diseño, construcción e instalación de un concentrador solar tipo Cassegrain

Felipe Tomás Cisternas Bernal

Año 2022

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres Mauricio y Bárbara, y a mis hermanos Mauricio y Ariel, por ser un pilar fundamental en mi formación como persona y profesional, soportándome y acompañándome en todas las etapas que he vivido. Siempre han estado conmigo y espero poder seguir disfrutando de su compañía y amor por muchos años más. También quiero agradecer a mis abuelos, tíos y primos por su amor incondicional.

Debo agradecer especialmente a mi pareja Camila por acompañarme durante gran parte de este recorrido, brindándome su total apoyo en las etapas más difíciles que he vidido, en donde su cariño, preocupación y sabiduría me han permitido crecer enormemente como persona.

Por otro lado, quiero agradecer a cada uno de los profesores que estuvieron presentes y formaron parte de mi desarrollo profesional dentro de la Universidad. En particular, al profesor Mario Toledo por permitirme ser parte de su equipo de trabajo y guiarme en el desarrollo de mi memoria de título, compartienedo gratos momentos de conversación tanto académicos como de la vida. Agradezco a cada uno de mis amigos por apoyarme dentro y fuera de la universidad, han sido un gran apoyo en cada paso que he dado. A la selección de fútbol de la universidad y al profesor Jorge Soriano por abrirme sus puertas y permitirme ser parte de un gran grupo de personas, en donde conocí a grandes amigos y siempre fue una buena forma de separar la mente de lo académico.

Además, en el desarrollo de mi trabajo de título pude compartir con grandes compañeros dentro del Laboratorio de Energías Renovables, en donde cada uno fue fundamental en el avance del proyecto. Miguel Cubillos y Francisco Vargas siempre tuvieron la mejor disposición al momento de dar una mano o ayudarme con algún consejo durante el período que me encontré trabajando en las instalaciones de la Universidad, por lo que les agradezco enormemente.

Finalmente, debo agradecer especialmente a Nicolás Ripoll por ser un gran apoyo en materias de conocimiento y por su compromiso con el desarrollo de todo el proyecto, abriendo las puertas de su casa en tiempos de pandemia y facilitando todo tipo de herramientas y materiales para sacar la tarea adelante.

Felipe Cisternas Bernal

Resumen

En el marco del proyecto FONDAP "Solar Energy Research Center" en su línea de desarrollo e investigación de almacenamiento y química solar, este trabajo de título tiene como objetivo el diseño, construcción e instalación de un concentrador solar que utiliza una configuración Cassegrain dentro de las dependencias del Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad Técnica Federico Santa María. El sistema busca alimentar un reactor rotatorio con energía solar concentrada para la producción de gas de síntesis.

Inicialmente, para el diseño del conjunto se utilizó el software Autodesk Inventor, tomando como punto de partida estructuras y materiales que se encontraban en desuso dentro del laboratorio. Posteriormente se realiza la fabricación de las piezas ya diseñadas utilizando en su mayoría perfiles de acero estructural y se montan cada uno de los componentes logrando construir una estructura firme y robusta para soportar un espejo parabólico utilizado anteriormente en procesos de fundición de metales. Debido a problemas en la confección de un espejo hiperbólico solo se realizaron pruebas para la primera etapa de reflexión.

Con la estructura del concentrador solar ya en posición y operativa, se utilizó un heliostato con un área total de reflexión de 3,205 $[m^2]$ con su sistema de seguimiento solar correspondiente para realizar un total de 12 ensayos. Utilizando un calorímetro de flujo radial entre placas paralelas equipado con termopares tipo K y un sensor de flujo de agua se obtuvieron datos de temperatura y caudal para ser analizados posteriormente.

Finalmente, terminadas las pruebas realizadas con el sistema de concentración completo, se evalúa la potencia térmica del sistema realizando un balance general de energía que utiliza los parámetros de *temperatura*, *caudal*, *densidad* y C_p *del agua*. Además, se determinan los factores que afectan el rendimiento del sistema, siendo el seguimiento solar el más importante.

Índice general

1. Introducción **1**

1.1. Objetivo general 3

1.2. Objetivos específicos 3

2. Antecedentes **4**

2.1. Problemática 4

2.2. Energía 5

2.3. Energías Renovables 8

2.4. Energía Solar 9

2.4.1. Energía Solar Fotovoltaica 10

2.4.2. Energía Solar Térmica 11

2.5. Concentradores Solares 12

2.5.1. Planta de torre central 12

2.5.2. Concentradores solares de cilindro parabólico 13

2.5.3. Concentradores solares de disco parabólico 13

2.5.4. Reflector lineal Fresnel 14

2.6. Aplicaciones y usos industriales 15

2.6.1. Precalentamiento 16

2.6.2. Calentamiento de procesos 16

2.6.3. Generación de vapor 17

2.6.4. Motor solar Stirling 18

2.6.5. Recuperación mejorada de petróleo 18

2.6.6. Producción de combustible neutro en carbono 18

2.7. Concentradores solares de dos etapas 19

3. Diseño del concentrador solar **30**

3.1. Estructura superior 30

3.2. Estructura inferior 40

3.3. Caracterización del disco parabólico 46

3.4. Diseño del disco hiperbólico 47

4. Construcción e Instalación del concentrador solar **53**

4.1. Medición y perforación de agujeros 53

4.2. Moldaje de pilares 54

4.3. Armado de estructura 55

4.4. Disco hiperbólico 65

5. Puesta en marcha del sistema integrado **67**

5.1. Posicionamiento de base Heliostato 67

5.2. Sistema de tensión del heliostato 68

5.3. Diseño y construcción de marco para espejo 69

5.4. Primera prueba del sistema 72

5.5. Construcción de la nueva propuesta 74

6. Procedimiento experimental **78**

6.1. Dispositivos de medición 78

6.1.1. Calorímetro 78

6.1.2. Sensor de flujo de agua 79

6.1.3. Piranómetro 79

6.2. Procedimiento experimental 80

7. Presentación y análisis de resultados **82**

7.1. Irradiancia en el lugar de trabajo 83

7.2. Temperatura, potencia y caudal a través del tiempo 84

7.3. Factores que afectan el rendimiento del sistema 97

7.3.1. Sistema de seguimiento 97

7.3.2. Imperfecciones geométricas 98

7.3.3. Imperfecciones ópticas 98

7.3.4. Factor climático y horario 99

8. Conclusiones **100**

Anexo **102**

Bibliografía **117**

Índice de tablas

3.1. Cantidad de soportes a fabricar 36

3.2. Cantidad de soportes a fabricar 43

3.3. Valores en los ejes x e y de Focos, Centro y Vértices 48

Índice de figuras

1.1. Suministro total de energía primaria por fuente, Chile 1990-2020. 2

2.1. Proceso de transformación de la energía. Fuente: GascoEduca 6

2.2. Balance de energía Nacional 2020. Fuente: Comisión Nacional de Energía. . . . 6

2.3. Oferta de energía primaria por energético en TCal. Fuente: Comisión Nacional de Energía. 7

2.4. Total del consumo final por energético en TCal. Fuente: Comisión Nacional de Energía. 7

2.5. Participación de ERNC en la generación de Energía. Fuente: Acera. 9

2.6. Mapa mundial de radiación. Fuente: Global Solar Atlas. 10

2.7. Planta Fotovoltaica El Romero Solar, Atacama. Fuente: Acciona. 11

2.8. Complejo solar Cerro Dominador, Atacama. Fuente: Energía Limpia XXI . . . 12

2.9. Captadores cilindro-parabólicos con seguimiento solar - Planta JUCOSAL, San Felipe. Fuente: Agrificiente. 13

2.10. Concentrador solar parabólico en la Plataforma Solar de Almería. Fuente: psa.es 14

2.11. Colector Fresnel lineal en la Plataforma Solar de Almería. Fuente: psa.es 14

2.12. Tecnología solar aplicable por temperatura a procesos induatriales. Fuente: GIZ 15

2.13. Proceso de calentamiento directo de procesos. Fuente: IRENA 16

2.14. Proceso de precalentamiento utilizando energía solar térmica. Fuente: IRENA . 17

2.15. Proceso de generación directa de vapor. Fuente: Solar Payback 17

2.16. Planta de investigación para producción de combustible neutro en carbono ubicada en la ETH Zúrich. Fuente: ETHZ 19

2.17. Arreglo de disco primario parabólico y disco secundario parabólico convexo . . 20

2.18. Disco primario y secundario curvado en una dirección 21

2.19. Disco primario y secundario con forma parabólica cóncava 21

2.20. Disco primario parabólico cóncavo y disco secundario hiperbólico convexo . . . 22

2.21. Arreglo en el cual los focos de los discos no se encuentran alineados 22

2.22. Disco principal parabólico alineado con un espejo secundario tipo caleidoscopio 23

2.23. Espejo parabólico secundario con disco principal parabólico 24

2.24. Disco parabólico principal y una placa espejo plana inclinada 24

2.25. Arreglo de espejos planos principales y secundarios 25

2.26. Conjunto de espejos parabólicos principales y placas planas secundarias 25

2.27. Espejo principal en forma parabólica y espejo secundario elíptico 26

2.28. Espejo principal parabólico y espejo secundario tipo XX-SMS 27

2.29. Arreglo de 289 espejos dispuestos en forma de heliostatos, con un espejo secundario de forma esférica 28

2.30. Arreglo de heliostatos primarios y espejo secundario con forma parabólica . . . 29

3.1. Esqueleto Base 30

3.2. Concentrador utilizado para fundición 31

3.3. Soportes utilizados en el espejo 31

3.4. Ensamble soportes 32

3.5. Ensamble de octágono y espejo parabólico 32

3.6. Diseño base 33

3.7. Soportes diagonales 33

3.8. Soportes horizontales y verticales 34

3.9. Soportes utilizados en el montaje de la estructura 35

3.10. Posicionamiento ejes y descansos 37

3.11. Conjunto soporte superior. 38

3.12. Base posterior 38

3.13. Soporte disco hiperbólico 39

3.14. Ensamble final de todas las partes 39

3.15. Estructura base inferior 40

3.16. Estructura base superior 40

3.17. Modificación a la estructura superior 41

3.18. Soportes pilares 41

3.19. Soportes pilares en su posición 42

3.20. Estructura inferior 43

3.21. Estructura con diagonales y escalera 44

3.22. Estructura final montada 45

3.23. Diseño de discos hiperbólicos 48

3.24. Disco hiperbólico 49

3.25. Carcasa 50

3.26. Difusor 50

3.27. Conjunto disco hiperbólico 51

3.28. Conjunto del disco hiperbólico instalado 51

3.29. Geometría del sistema Cassegrain 52

4.1. Medición y perforación 54

4.2. Posicionamiento armazón y primer llenado 54

4.3. Vertimiento de concreto en moldajes 55

4.4. Posicionamiento de la base inferior sobre los apoyos de concreto 56

4.5. Montaje bases 57

4.6. Diagonales y escalera 58

4.7. Proceso de preparación y fijación de baranda y planchas de acero diamantado . 59

4.8. Proceso de fabricación estructura de soporte concentrador 61

4.9. Soporte cableado 62

4.10. Izaje de estructuras 62

4.11. Izaje de octágono y posición final 63

4.12. Estructura de soporte superior 63

4.13. Sistema de regulación de ángulo concentrador 64

4.14. Diseño vs Real 65

4.15. Impresión 3D de las piezas 66

4.16. Material reflectante en disco 66

5.1. Boceto del sistema de concentración solar con sus 3 etapas 67

5.2. Ubicación anterior y actual de la base 68

5.3. Sistema de tensión heliostato 69

5.4. Geometría del perfil de aluminio utilizado 70

5.5. Soportes utilizados para el armado del marco del espejo 71

5.6. Conjunto espejo heliostato 71

5.7. Espejo con sus soportes ya terminados 72

5.8. Deformaciones en disco hiperbólico 73

5.9. Mecanizado de madera de roble 74

5.10. Proceso de pegado y prensado 75

5.11. Mecanizado de madera de roble 75

5.12. Molde cóncavo terminado 76

5.13. Cruz y soportes de contención para la madera 76

5.14. Acero espejo luego del prensado 77

6.1. Calorímetro y su posicionamiento 79

6.2. Piranómetro utilizado. 80

7.1. Irradiancia global a través del tiempo el día 15 de Diciembre de 2021 83

7.2. Irradiancia global a través del tiempo el día 17 de Diciembre de 2021 84

7.3. Temperatura y caudal en h=0 posición 1 a través del tiempo. 85

7.4. Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 1 a través del tiempo. 85

7.5. Temperatura y caudal en h=0 posición 2 a través del tiempo. 86

7.6. Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 2 a través del tiempo. 86

7.7. Temperatura y caudal en h=0 posición 3 a través del tiempo. 87

7.8. Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 3 a través del tiempo. 87

7.9. Temperatura y caudal en h=0 posición 4 a través del tiempo. 88

7.10. Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 4 a través del tiempo. 88

7.11. Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 1 a través del tiempo. 89

7.12. Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 1 a través del tiempo. . . 89

7.13. Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 2 a través del tiempo. 90

7.14. Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 2 a través del tiempo. . . 90

7.15. Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 3 a través del tiempo. 91

7.16. Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 3 a través del tiempo. . . 91

7.17. Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 4 a través del tiempo. 92

7.18. Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 4 a través del tiempo. . . 92

7.19. Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 1 a través del tiempo. 93

7.20. Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 1 a través del tiempo. . 93

7.21. Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 2 a través del tiempo. 94

7.22. Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 2 a través del tiempo. . 94

7.23. Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 3 a través del tiempo. 95

7.24. Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 3 a través del tiempo. . 95

7.25. Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 4 a través del tiempo. 96

7.26. Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 4 a través del tiempo. . 96

7.27. Manchas en la superficie de reflexión debido a reacción del film reflectante con el disco parabólico. 98

Capítulo 1

Introducción

A nivel mundial, el consumo de energía es un tema de relevancia, ya que está estrechamente ligado al crecimiento y desarrollo económico de los países, en donde se cumple por norma general que un aumento del ingreso de las naciones se sustenta en una mayor demanda energética.

Actualmente, la matriz energética en Chile depende de energías convencionales, tanto renovables como no renovables. Dentro de las fuentes energéticas existentes se pueden identificar por sobre las otras el uso de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural, los cuales se usan de forma masiva alrededor del mundo, incluido nuestro país. Estos se encuentran restringidos debido a que no son energías renovables en el corto plazo, por ende, alcanzarán su pick de producción. Además, se encuentran sometidos al clima político del país distribuidor, pudiendo traer problemas en el suministro, como lo ocurrido en el pasado con la distribución de gas natural.

En el mundo existe una dependencia del petróleo, resaltando el hecho de que el factor limitante en la extracción de este es la energía requerida y no su coste económico, puesto que en cuanto la energía requerida para la extracción de un barril de petróleo sea mayor que la energía que se puede extraer de este, dejará de ser negocio para las empresas petroleras, viéndose necesaria la búsqueda de otras fuentes de energía.

Por otra parte, la energía hídrica es conocida como un tipo de energía renovable convencio-

nal, la cual presenta bajos costos de explotación y no produce contaminación ambiental. Los problemas que se presentan vienen ligados a la construcción, en donde los costos económicos, ambientales y sociales son altos, necesitando inundar áreas geográficas extensas, debiendo así, trasladar comunidades enteras y causar un impacto ambiental en algunos casos irreversible. Además, necesita lluvias constantes y causes naturales para poder explotarlos, limitando así su capacidad de producción a escala nacional y mundial.

La energía nuclear, si bien tiene la ventaja de no emitir gases contaminantes a la atmósfera, posee un alto riesgo de contaminación en caso de accidente. Además, se producen residuos radiactivos que son difíciles de almacenar o desechar, y su costo de implementación y mantención es muy alto.

Por estos motivos, resulta imprescindible la investigación e implementación de las energías renovables, puesto que la diversificación de la matriz energética evitaría la dependencia de una sola fuente de energía, disminuyendo así el impacto que tienen las crisis mundiales sobre el precio y la disponibilidad de las fuentes energéticas, además de reducir las emisiones de gases causantes del efecto invernadero.

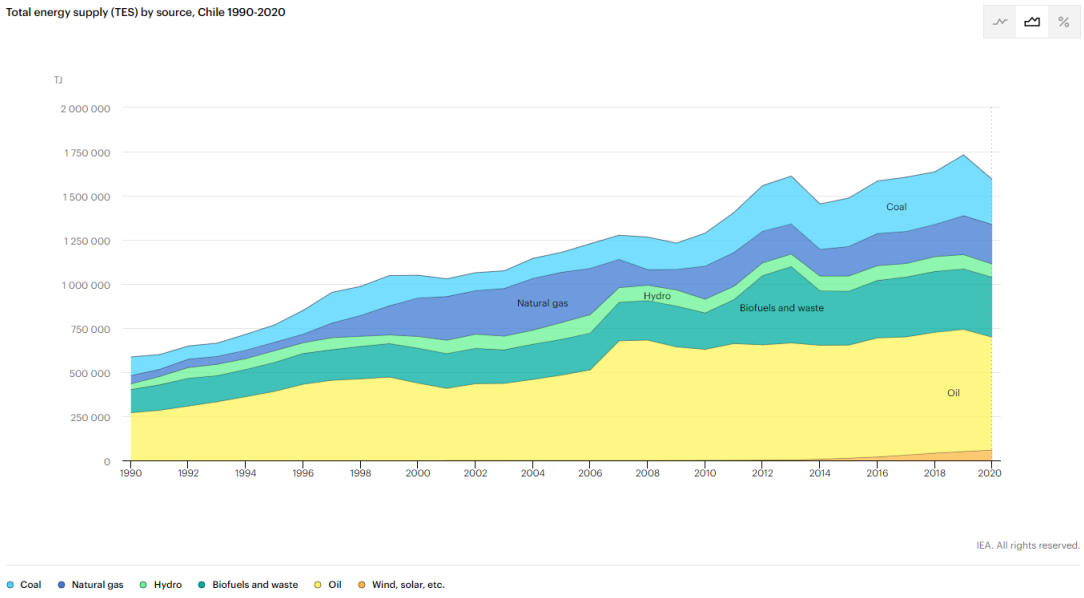


Figura 1.1: *Suministro total de energía primaria por fuente, Chile 1990-2020.* [1]

1.1. Objetivo general

En el marco del proyecto FONDAP "Solar Energy Research Center (SERC-Chile)", en su línea de desarrollo e investigación de almacenamiento y química-solar, el presente trabajo de titulación tiene como objetivo general el diseño y construcción de un concentrador solar parabólico tipo "Cassegrain" para su implementación con un campo de heliostatos y acoplamiento a un gasificador solar.

1.2. Objetivos específicos

- Definir el estado del arte de la aplicación de concentradores solares térmicos en la industria.
- Diseñar y construir un concentrador solar tipo Cassegrain con su estructura de soporte.
- Evaluar el desempeño del concentrador solar en conjunto con el campo de heliostatos.
- Evaluar y analizar la potencia e irradiancia del sistema

.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Problemática

La gasificación es un sistema de gran potencial, ya que permite la generación tanto de energía térmica como eléctrica mediante tecnologías de bajo costo como los gasificadores de lecho fijo (potencias medias-bajas), o reactores de lecho fluidizado con tecnología más exigente y con mayor capacidad de generación. Además, no es una tecnología desarrollada recientemente, sino que ha sido un recurso habitual en periodos de carencia o escasez de combustibles ligeros, ya que permite convertir sólidos como carbón o biomasa en gases que pueden ser empleados en motores de combustión interna, calderas y turbinas.

Debido a que la mayoría de los procesos químicos de la gasificación son de tipo termoquímicos, compuesto por reacciones endotérmicas en su mayoría y exotérmicas, es necesaria la adición de grandes cantidades de calor para lograrlo. La mayoría de los procesos actuales queman una porción de combustible fósil para la generación del calor requerido, lo que aumenta costos y baja la eficiencia del proceso, además de aumentar los niveles de dióxido de carbono en el gas sintético.[2]

Es por estas razones que, en la búsqueda de una fuente externa de calor, la energía solar aparece como la mejor alternativa a utilizar, ya que presenta diversas ventajas en comparación con la combustión de carbón u otros combustibles.

Un concentrador solar permite obtener temperaturas elevadas que permiten el funcionamiento de sistemas de generación o el reemplazo de sistemas convencionales que generan altas temperaturas utilizando combustibles, el cual acoplado a un reactor termoquímico puede ser capaz de realizar el proceso de gasificación para la producción de gas de síntesis (syngas), compuesto principalmente por H_2 y CO, permitiendo un proceso energético más limpio.

Algunas de sus ventajas son [3]:

- Almacenamiento de energía solar en forma química.
- Transporte de energía solar desde regiones de alta radiación solar a otras regiones con menor radiación.
- Uso del producto para la producción de combustibles líquidos o químicos.
- Conservación de recursos no renovables.
- Disminución de la polución ambiental.
- Eliminación de generadores de oxígeno de alto costo.
- Reducción de importaciones de gas y petróleo.

2.2. Energía

Tal como existen dos tipos de fuentes de energía, también las hay de matrices: primarias y secundarias. La primera alude a las diversas energías en el estado en que se extraen de la naturaleza, sin mediar procesos que la transformen. Las fuentes de energía secundarias en cambio, incluyen los diversos productos energéticos elaborados a partir del procesamiento de las energías primarias, como electricidad, gas distribuido por redes, derivados de los hidrocarburos, entre otros.

De manera análoga, la matriz energética primaria muestra la participación que tienen energéticos capturados directamente (como la hidráulica, eólica, solar) o indirectamente (como petróleo, gas natural, carbón mineral, etc) de recursos naturales en el consumo total. A su

vez, la matriz secundaria indica la participación de energéticos producidos a partir de la transformación de los primarios en el consumo total, como lo son el fuel oil (también denominados petróleos combustibles), diesel oil, gasolinas (de diferentes octanajes, con o sin plomo), kerosene, gas licuado de petróleo (GLP), gasolina y keroseno de aviación, naftas, gas de refinería, electricidad, carbón vegetal, gases, entre otros.

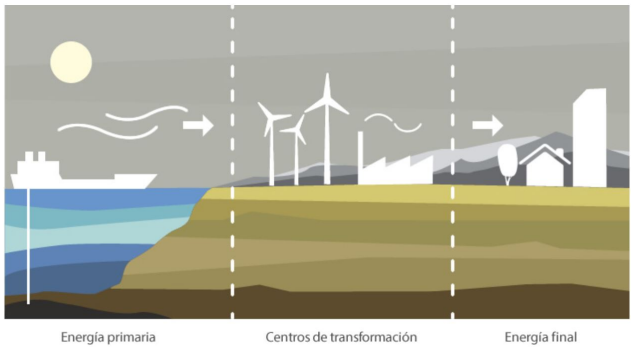


Figura 2.1: *Proceso de transformación de la energía. Fuente: GascoEduca* [4]

A continuación, se presenta un balance de energía a nivel nacional, emitido por el Ministerio de Energía en su reporte anual del año 2020, en donde es posible evidenciar que aproximadamente el 35,8 % se destina al sector industrial como usuario final.

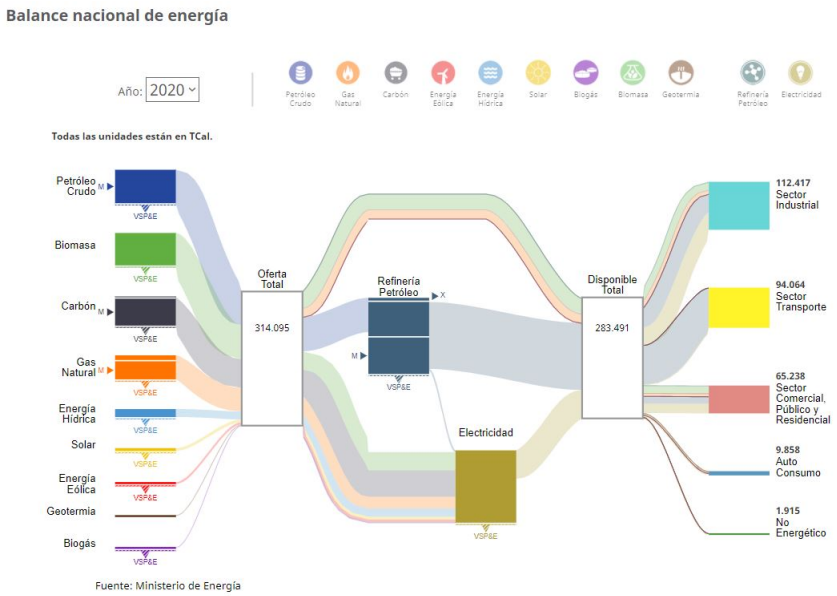


Figura 2.2: *Balance de energía Nacional 2020. Fuente: Comisión Nacional de Energía.* [5]

La matriz chilena es en la actualidad altamente dependiente de combustibles fósiles, en donde el petróleo crudo ocupa el 30 % de la oferta de energía primaria, seguido por el carbón con un 22 % y el gas natural con un 16 %, sumando un total del 68 %. Las energías renovables suman el 32 % de esta oferta, liderados por la biomasa con un 23 %.

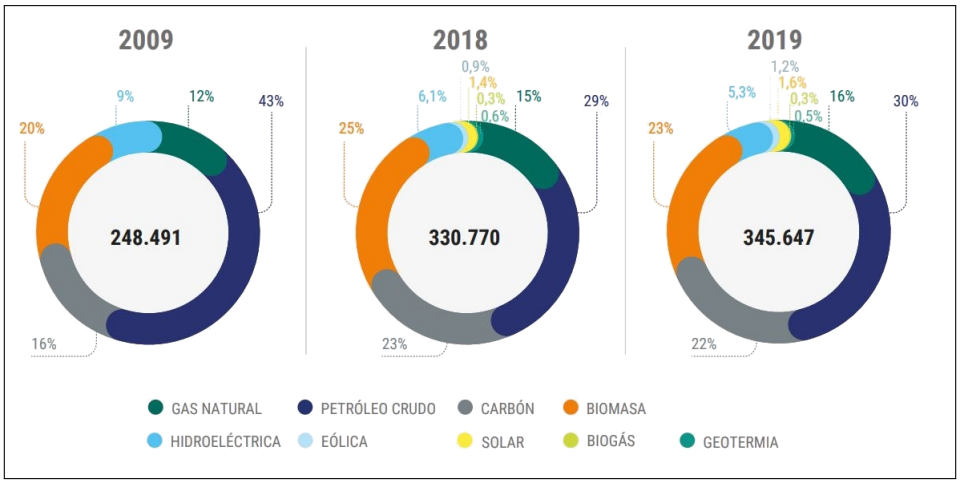


Figura 2.3: *Oferta de energía primaria por energético en TCal. Fuente: Comisión Nacional de Energía.*

[6]

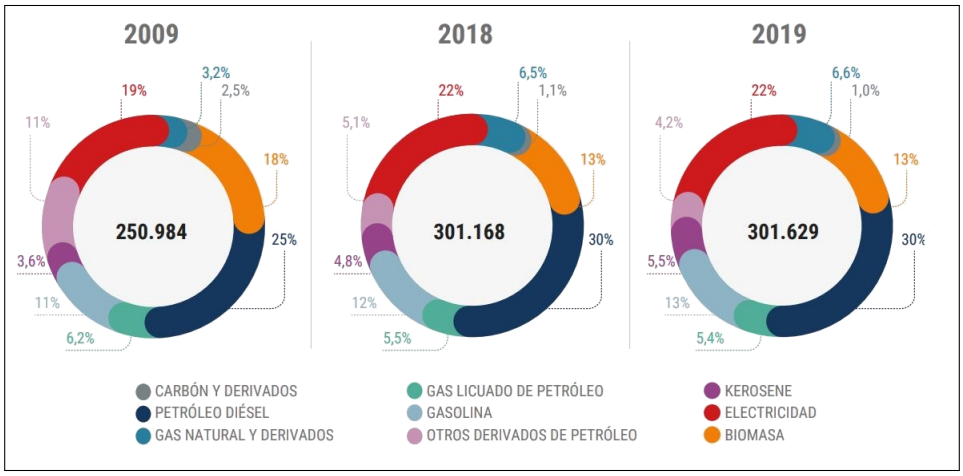


Figura 2.4: *Total del consumo final por energético en TCal. Fuente: Comisión Nacional de Energía.*

[6]

Las políticas gubernamentales del país, mediante el Ministerio de Energía están apuntando a la descarbonización con el plan "Zero Carbón", el cual comenzó el pasado 2019, en el cual

la primera medida a implementar es el cierre de 8 centrales a carbón para el 2024 y se espera que para el 2040 el 100 % de las centrales termoeléctricas a carbón dejen de funcionar.[7]

Junto con lo anterior, las proyecciones sobre el escenario energético chileno en cuanto a la incorporación de energías renovables a la matriz consideran un 20 % para el año 2025, 60 % para el 2035 y un 70 % para el año 2050, mediante el programa "Energía 2050" lanzado en el año 2015. En esta materia, las energías renovables pueden ser variadas, dentro de las cuales destacan en nuestro país la hidráulica, la eólica y la solar. Estas tres constituyen gran parte de la base de generación eléctrica limpia en Chile, aun así, no alcanza el 30 % del total generado, siendo la última la que contribuye con un mayor porcentaje, correspondiente a un 50 % del aporte de la matriz renovable al sistema energético nacional (SEN). [8]

2.3. Energías Renovables

Las energías renovables se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento continuo en energía útil no se consumen ni se agotan en una escala humana. Las principales fuentes de energía renovable vienen de los ríos, el movimiento de las aguas oceánicas, el viento, el sol, entre otros. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la biomasa, la energía geotérmica y los biocombustibles.

En Chile se define como fuentes de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) a la eólica, la pequeña hidroeléctrica (centrales hasta 20 MW), la biomasa y el biogás, la energía geotérmica, la energía solar y la energía mareomotriz.

El bajo porcentaje de éstas en la matriz energética nacional contrasta con el gran potencial de desarrollo en el país, situación que se explica por la baja competitividad económica que tenían respecto de las energías convencionales y a la ausencia de un marco regulatorio que permitiese eliminar las barreras que su desarrollo tenía en Chile.

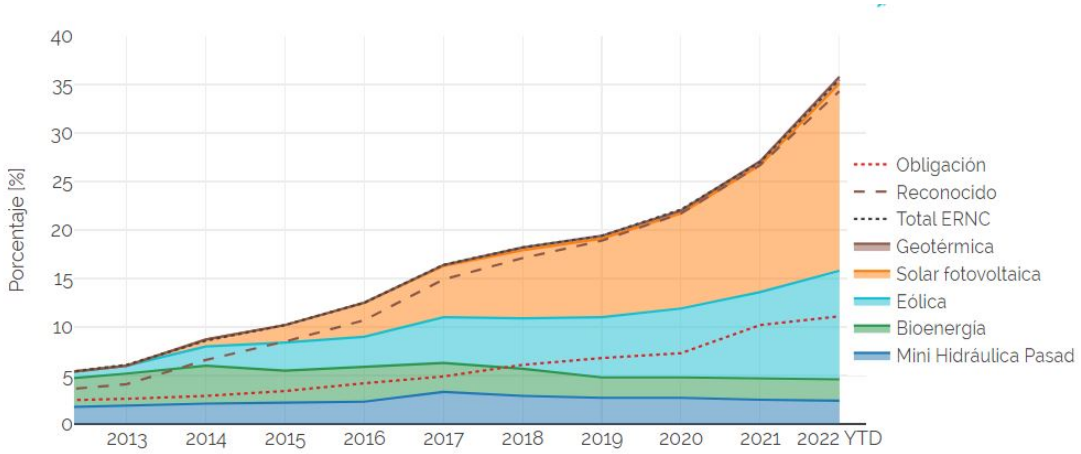


Figura 2.5: *Participación de ERNC en la generación de Energía. Fuente: Acera.* [9]

Ambos aspectos han cambiado en el país de acuerdo con las políticas que se han adoptado, con lo cual se prevé que este tipo de energías aumentarán su contribución a la generación eléctrica de los próximos años, además, si consideramos los índices de radiación solar en Chile, especialmente en el norte grande y la proyección en la demanda de energía eléctrica en el país, la oportunidad de desarrollo en esta área es enorme.

2.4. Energía Solar

El sol representa la mayor fuente de energía existente en nuestro planeta. La energía es transmitida por medio de ondas electromagnéticas presentes en los rayos solares, las cuales son generadas en forma continua y emitida permanentemente al espacio, esta energía la podemos percibir en forma de luz y calor. Cerca del 70 % de la energía solar recibida por la tierra es absorbida por la atmósfera, la tierra y por los océanos, mientras que el 30 % restante es reflejado por la atmósfera de regreso al espacio.

Por otro lado, la energía solar es una fuente de energía renovable, inagotable, limpia y sustentable en el tiempo. A modo de ejemplo, en solo una hora la cantidad de esta energía interceptada por la Tierra es mayor a la del consumo de energía del mundo durante todo el año, con lo que se demuestra que este tipo de energía también tiene un potencial para mitigar

el cambio climático igualmente impresionante e inminente.

Algunas de las tecnologías obtenidas de la conversión de energía solar que tienen una amplia gama de aplicaciones de servicio de energía son: iluminación, calefacción, agua caliente para edificios e industria, calor solar de alta temperatura para energía eléctrica e industria, conversión fotovoltaica para electricidad y producción de combustibles solares, como por ejemplo hidrógeno o síntesis gas.

Nuestro país cuenta con condiciones particularmente favorables para la explotación de fuentes de energía renovables, destacando el gran potencial que tiene la energía solar. El norte de Chile se reconoce como una de las zonas con los más altos índices de radiación solar a nivel mundial.

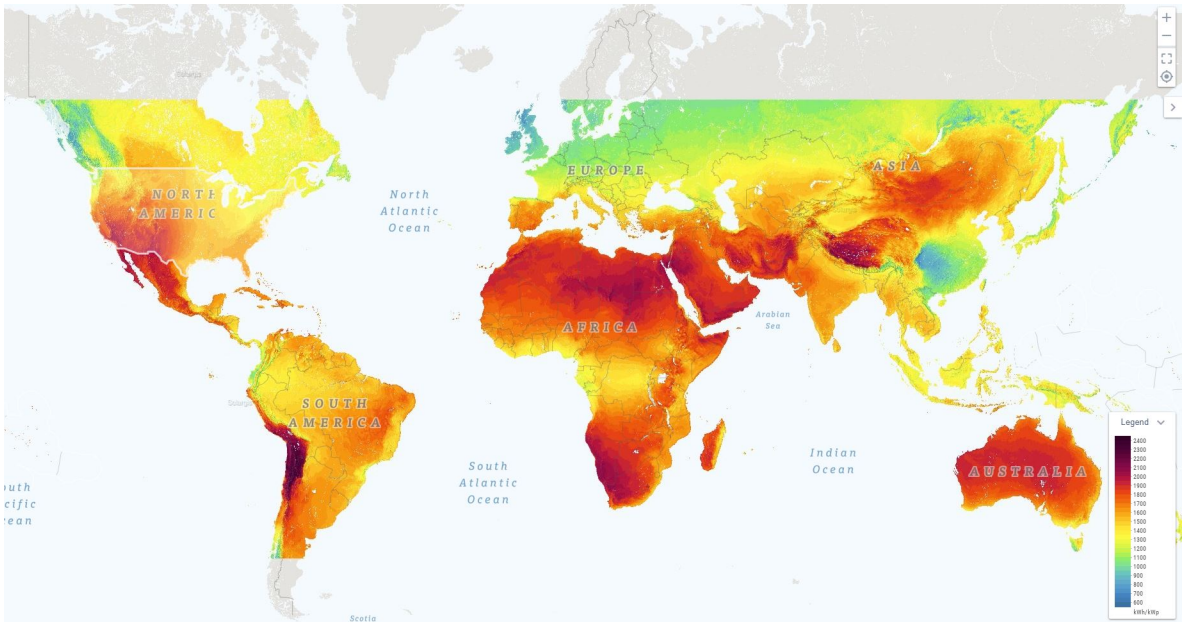


Figura 2.6: *Mapa mundial de radiación. Fuente: Global Solar Atlas.* [10]

2.4.1. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se encarga de transformar de manera directa la luz solar en electricidad, empleando tecnología basada en el efecto fotovoltaico. Esta transformación de energía se logra aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores, por lo que,

al incidir la radiación solar sobre una de las caras de la célula fotoeléctrica, se produce una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras, lo que produce una corriente eléctrica.

La energía eléctrica que se genera mediante este tipo de paneles es inagotable, por lo que contribuye de gran manera a un desarrollo sostenible. Este tipo de paneles es recomendable para zonas en las que el tendido eléctrico no llega o su instalación representa un gran gasto para el grupo familiar, o para zonas en las que su geografía permite la presencia del sol muchas horas en el año.



Figura 2.7: *Planta Fotovoltaica El Romero Solar, Atacama. Fuente: Acciona.* [11]

2.4.2. Energía Solar Térmica

Consiste en el aprovechamiento de la energía proveniente del sol para generar energía térmica o eléctrica. A diferencia de la energía solar fotovoltaica, las plantas de energía solar térmica generan energía a través del calentamiento de un fluido, en donde el vapor producido en este proceso alimenta un generador que se encarga de producir electricidad. Este proceso es similar a la forma en que funcionan las termoeléctricas, pero en este caso no se necesita quemar ningún tipo de combustible fósil.

2.5. Concentradores Solares

Un concentrador solar utiliza los principios de la óptica para capturar y redirigir la luz del sol desde un área de mayor tamaño hacia un área de recepción pequeña. El dispositivo de conversión de energía, también llamado receptor, convierte esta luz solar en una forma utilizable de energía, específicamente eléctrica o térmica. Los concentradores de una etapa pueden generar ya sea calor o electricidad.

2.5.1. Planta de torre central

Dentro de la generación de energía solar térmica se encuentran las plantas de torre central, la cual está compuesta por un conjunto de heliostatos encargados de reflejar la radiación solar hacia un receptor ubicado en lo alto de una torre por la cual circulan sales de nitrato fundidas. Estas sales son impulsadas hasta el receptor situado en la parte superior de una torre, en donde se calientan hasta alcanzar una temperatura de 565 °C para luego ser transportadas hacia estanques de almacenamiento o directamente hacia un intercambiador de calor, en donde se produce vapor de agua que acciona una turbina, cuyo eje se encuentra conectado a un generador para producir electricidad.



Figura 2.8: *Complejo solar Cerro Dominador, Atacama. Fuente: Energía Limpia XXI* [12]

2.5.2. Concentradores solares de cilindro parabólico

También conocido como concentradores "2D", utilizan espejos en forma de cilindro parabólico para concentrar toda la radiación solar que recibe hacia su foco. En este caso, el foco corresponde a una línea recta, en la cual se suele ubicar una tubería que transporta un fluido, generalmente aceite, el cual, por la acción de la radiación que recibe desde los espejos, se calienta gracias a procesos termodinámicos. Actualmente, este tipo de concentrador alcanza temperaturas cercanas a los 400 °C.

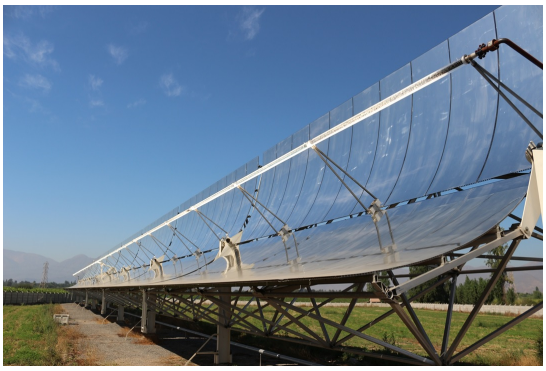


Figura 2.9: *Captadores cilindro-parabólicos con seguimiento solar - Planta JUCOSAL, San Felipe. Fuente: Agrificiente.*

[13]

2.5.3. Concentradores solares de disco parabólico

Conocidos también como concentradores de tres dimensiones, utilizan espejos en forma de sólidos de revolución, en donde la radiación solar se concentra en su foco. Este tipo de concentradores puede llegar a alcanzar temperaturas de 3.000 °C debido a la geometría que presenta.

Para alcanzar un funcionamiento eficiente de un concentrador solar, es necesario que el sistema de seguimiento se comporte de manera confiable, además de que la estructura de los espejos cuente efectivamente con una forma parabólica, sin presentar problemas en su estructura. Finalmente, la reflectividad del material elegido es un factor igual de importante que los mencionados anteriormente, ya que de esto dependerá la cantidad de radiación que sea reflejada hacia el foco.



Figura 2.10: *Concentrador solar parabólico en la Plataforma Solar de Almería. Fuente: psa.es* [14]

2.5.4. Reflector lineal Fresnel

Corresponde a un sistema de concentración solar que se encarga de proporcionar un flujo de calor a un receptor ubicado en su foco lineal. Utiliza un arreglo de espejos planos que se mueven de manera independiente reflejando la radiación solar. Debido a su geometría es uno de las configuraciones más económicas que existen.

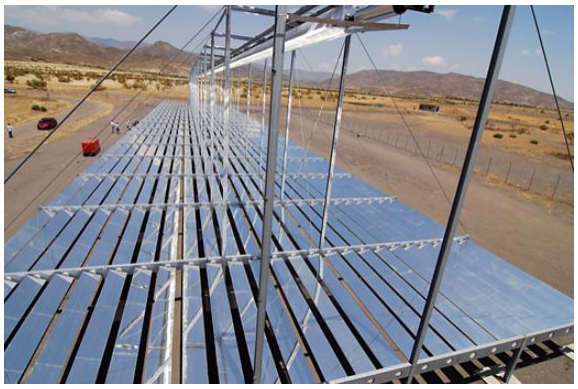


Figura 2.11: *Colector Fresnel lineal en la Plataforma Solar de Almería. Fuente: psa.es* [15]

2.6. Aplicaciones y usos industriales

El uso de calor en la industria se encuentra presente en prácticamente toda la cadena de fabricación, desde la extracción de materias primas hasta la transformación de materiales y procesos de acabado final para su distribución a los consumidores. En este contexto, la energía solar térmica ofrece una alternativa limpia y económicamente rentable para suministrar las necesidades de calor de la industria en comparación con los combustibles tradicionales, favoreciendo la competitividad y sustentabilidad del sector [16].

Los procesos industriales con condiciones favorables para el uso de energía solar son aquellos con una demanda continua de calor durante el día y estable a través del año. Algunos ejemplos de estos procesos incluyen el calentamiento de líquidos para lavado, tratamientos químicos, generación de vapor, procesos de secado, entre otros [16].

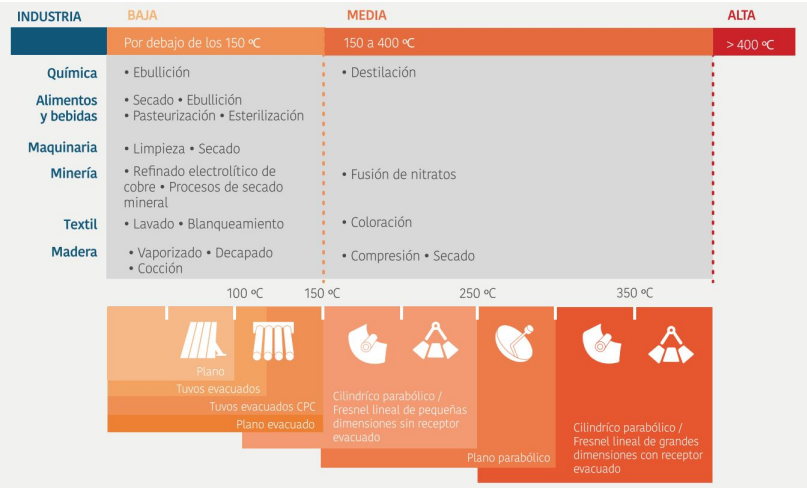


Figura 2.12: *Tecnología solar aplicable por temperatura a procesos induatriales. Fuente: GIZ* [17]

Los principales impulsores de la implementación de la energía para calentamiento y refrigeración solar en procesos industriales son:

- Reducir los riesgos asociados a precios cada vez más volátiles y crecientes para combustibles fósiles (Carbón, petróleo y gas natural)
- Eliminar los costos de combustibles

- Reducir las emisiones de carbono
- Necesidades energéticas debido a la producción localizada

Los costos actuales de los sistemas solares térmicos están determinados por un número relativamente pequeño de proveedores de estas tecnologías altamente sofisticadas. Aunque estas poseen un alto rendimiento, suelen ser demasiado costosas para el mercado global [18].

La utilización de energía solar térmica en procesos industriales generalmente puede realizarse de tres formas distintas.

2.6.1. Precalentamiento

El agua fría se precalienta en el campo solar y se introduce en un depósito de almacenamiento donde se calienta mediante una caldera de combustible fósil a la temperatura del proceso de producción requerida. [16]

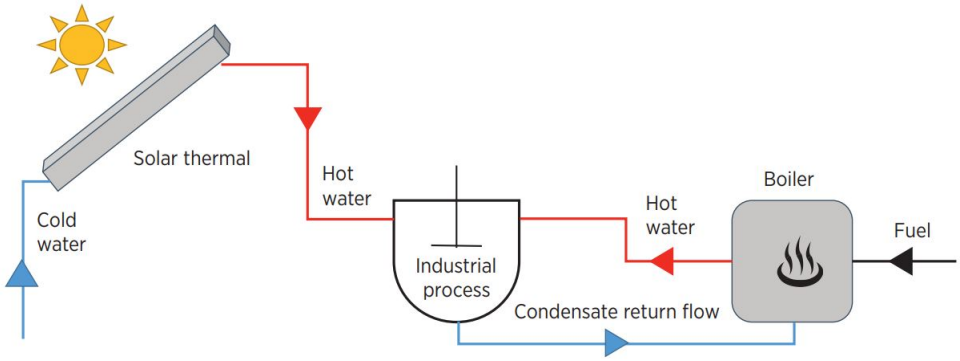


Figura 2.13: *Proceso de calentamiento directo de procesos. Fuente: IRENA* [18]

2.6.2. Calentamiento de procesos

El campo solar proporciona calor para mantener la temperatura de un baño o un proceso de separación térmica. Se suministra calor adicional al proceso de producción mediante una

caldera de combustible fósil. Ambos circuitos están cerrados de manera que el agua enfriada vuelve al campo de colectores o a la caldera respectivamente. [16]

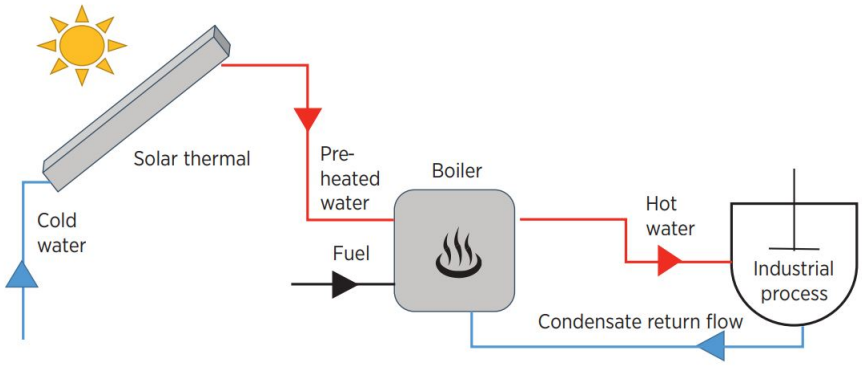


Figura 2.14: *Proceso de precalentamiento utilizando energía solar térmica. Fuente: IRENA* [18]

2.6.3. Generación de vapor

El agua se evapora parcialmente en los colectores concentradores. El vapor calentado mediante energía solar se separa del agua restante dentro del tambor de vapor antes de ser enviado al proceso industrial o a la red de vapor de la fábrica. El condensado tratado, también llamado agua de alimentación, se envía de nuevo al campo de colectores. Otra opción es la generación de vapor indirecta. En este caso, el campo de colectores calienta el agua o el aceite térmico en un circuito cerrado para generar vapor mediante un intercambiador de calor. [16]

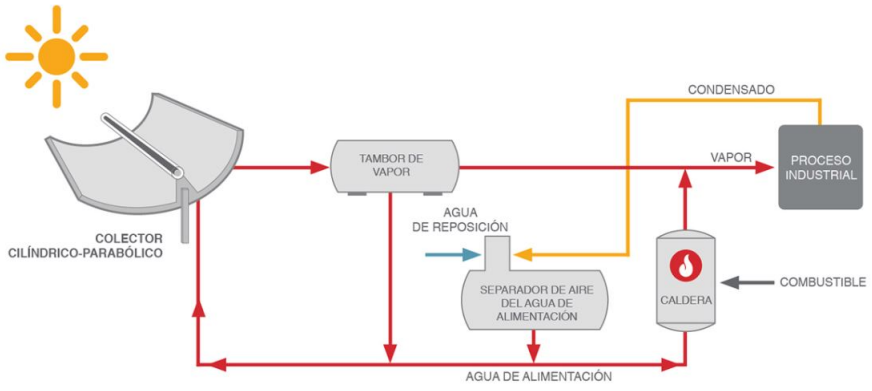


Figura 2.15: *Proceso de generación directa de vapor. Fuente: Solar Payback* [19]

2.6.4. Motor solar Stirling

Se utiliza un concentrador solar parabólico para concentrar la energía solar en un receptor solar acoplado a un motor stirling para convertir la energía solar térmica recibida en energía eléctrica. El receptor del motor solar Stirling tiene un intercambiador de calor externo que absorbe la energía térmica solar concentrada entrante. Esto calienta y luego presuriza el gas en el intercambiador de calor, y este gas a su vez alimenta el motor Stirling solar.

2.6.5. Recuperación mejorada de petróleo

La recuperación mejorada de petróleo corresponde a un término para las técnicas utilizadas que aumentan la cantidad de petróleo crudo que se puede extraer de un campo petrolero. Para este proceso se utiliza energía solar térmica concentrada para la generación de vapor. Luego, este vapor es inyectado en el depósito de petróleo para diluir el crudo pesado y facilitar su extracción. El método tradicional utilizado se realiza con gas natural para producir vapor. El vapor utilizado puede llegar a una temperatura de 400°C.

2.6.6. Producción de combustible neutro en carbono

Investigadores de la ETH (Escuela Politécnica Federal) Zúrich han desarrollado una novedosa tecnología que produce combustibles líquidos de hidrocarburos exclusivamente a partir de luz solar y aire. Por primera vez en el mundo, demuestran toda la cadena del proceso termoquímico en condiciones reales de campo. La nueva minirrefinería solar se encuentra en el tejado del edificio del Laboratorio de Máquinas de la ETH de Zúrich.

Aldo Steinfeld, profesor de portadores de energía renovable en la ETH de Zúrich, y su grupo de investigación desarrollaron la tecnología. “Esta planta demuestra que se pueden fabricar combustibles de hidrocarburos neutros en carbono a partir de la luz solar y el aire en condiciones reales de campo”, explicó. “El proceso termoquímico utiliza todo el espectro solar y procede a altas temperaturas, lo que permite reacciones rápidas y una alta eficiencia”. La planta de investigación en el centro de Zúrich hace avanzar la investigación de la ETH hacia los combustibles sostenibles. [20]

La cadena de procesos del nuevo sistema combina tres procesos de conversión termoquímica: En primer lugar, la extracción de CO2 y agua del aire. En segundo lugar, la división termoquímica solar del CO2 y el agua. En tercer lugar, su posterior licuación en hidrocarburos. El CO2 y el agua se extraen directamente del aire ambiente mediante un proceso de adsorción/desorción. Ambos se introducen en el reactor solar en el foco de un reflector parabólico. La radiación solar se concentra por un factor de 3.000, generando calor de proceso a una temperatura de 1.500 grados Celsius dentro del reactor solar. En el corazón del reactor solar hay una estructura cerámica de óxido de cerio, que permite una reacción de dos pasos -el ciclo redox- para dividir el agua y el CO2 en gas de síntesis. Esta mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono puede transformarse en combustibles de hidrocarburos líquidos mediante la síntesis convencional de metanol o Fischer-Tropsch. [20]



Figura 2.16: *Planta de investigación para producción de combustible neutro en carbono ubicada en la ETH Zúrich. Fuente: ETHZ*

[20]

2.7. Concentradores solares de dos etapas

Incorporando espejos secundarios a los concentradores de una etapa, se incrementa el ángulo de aceptación, definido como el ángulo al cual la luz solar entrante es capturada por un concentrador solar. Además, un estudio realizado añadiendo un espejo secundario a los concentradores de una etapa [21] , dio como resultado que este cambio mejoró el ratio de concentración en un 80 %. La geometría de los concentradores solares de dos etapas mejora el proceso de recolección de energía. Generalmente, la geometría de estos incluye un espejo primario y uno secundario, para reflejar los rayos de luz hacia el receptor. Existen cuatro

categorías para clasificar los concentradores solares de dos etapas, basados en la forma y configuración de sus espejos reflectantes: Cassegrain, Two-Stage Dish, Two-Stage Trough y Solar furnace.

2.7.0.1. Cassegrain

Los concentradores tipo Cassegrain, se componen de un disco primario parabólico y un disco secundario parabólico o hiperbólico. Generalmente, se busca que los focos de los dos discos coincidan, de modo que los rayos reflejados en el disco principal puedan dirigirse hacia el disco hiperbólico secundario y luego hacia el receptor. Existen distintas configuraciones para este tipo de concentradores, de las cuales destacan las siguientes:

Disco primario parabólico cóncavo y disco secundario parabólico convexo

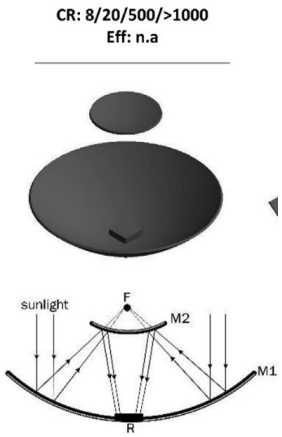


Figura 2.17: *Arreglo de disco primario parabólico y disco secundario parabólico convexo* [22]

Meng et al., (2016) en [23] asegura que este tipo de geometría permite tener ratios de concentración bajos, medios y ultra altos.

Disco primario curvado en una dimensión

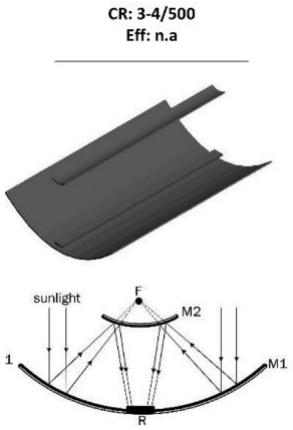


Figura 2.18: *Disco primario y secundario curvado en una dirección*
[22]

Este tipo de arreglo proporciona un bajo ratio de concentración y rendimiento óptico deficiente, el cual puede estar relacionado a su geometría simple.

Discos primario parabólico y secundario parabólico cóncavo

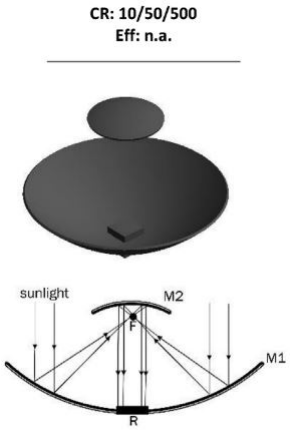


Figura 2.19: *Disco primario y secundario con forma parabólica cóncava*
[22]

Ideal para cuando se requiere crear un sistema altamente compacto.

Disco primario parabólico cóncavo y disco secundario hiperbólico convexo

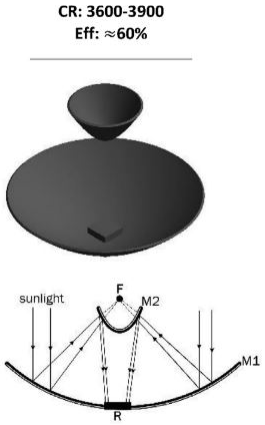


Figura 2.20: *Disco primario parabólico cóncavo y disco secundario hiperbólico convexo* [22]

Tsai, (2015) en [24] asegura que este tipo de configuración permite alcanzar un flujo uniforme en el receptor, además de un ratio de concentración muy alto.

Además de este tipo de concentradores, en los cuales los ejes de los dos discos se encuentran centrados, existen los concentradores tipo cassegrain en los que los focos de los dos discos no se encuentran alineados.

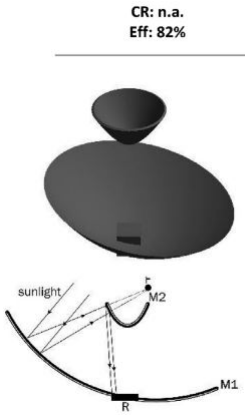


Figura 2.21: *Arreglo en el cual los focos de los discos no se encuentran alineados* [22]

David et al., (2015) en [25] propuso una geometría de concentrador en donde el foco del

disco principal, no se encuentra alineado con el foco secundario. Esta geometría se encuentra compuesta por un disco primario parabólico y cóncavo y un disco secundario hiperbólico convexo, dando como resultado un alto rendimiento óptico (82 %), además de que se encuentra compuesto de menos partes móviles y posee un buen alineamiento óptico.

2.7.0.2. Two-Stage Dish

Este tipo de concentradores se compone de un disco principal parabólico curvado en dos ejes, alineado con un espejo secundario no parabólico o no hiperbólico. La mayoría de este tipo de colectores son fabricados con los ejes de sus espejos alineados entre sí.

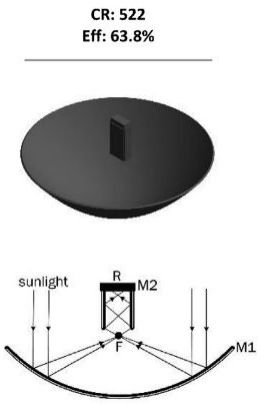


Figura 2.22: *Disco principal parabólico alineado con un espejo secundario tipo caleidoscopio* [22]

Helmers y Kramer (2013) en [26] propusieron la construcción de un concentrador con un disco principal parabólico y un espejo secundario tipo caleidoscopio como homogeneizador de flujo, logrando un alto ratio de concentración (522) y una eficiencia óptica media.

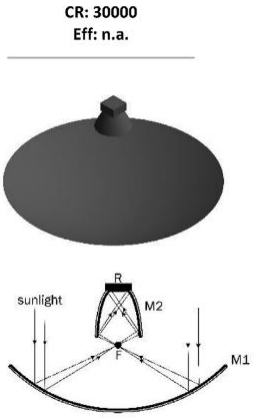


Figura 2.23: *Espejo parabólico secundario con disco principal parabólico* [22]

Sánchez et al., (2014) en [27] se propuso la construcción de un concentrador solar compuesto por un espejo parabólico secundario con un disco parabólico principal de diámetro 1.4 [m], logrando un ratio de concentración mayor a 30.000, sin embargo, sugirió investigar más en algún tipo de material que pudiese aguantar de buena manera tan alto nivel de concentración.

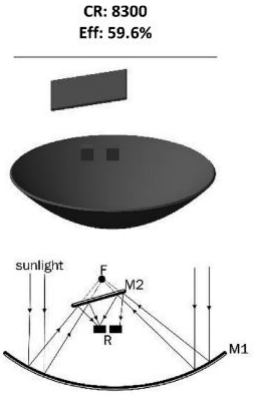


Figura 2.24: *Disco parabólico principal y una placa espejo plana inclinada* [22]

Dähler et al., (2018) en [28] propuso un diseño de concentrador que consiste en un disco parabólico principal y una placa espejo plana que se encuentra inclinada con el objetivo de lograr un flujo solar distribuido entre dos receptores. Su estudio concluyó en que esta geometría simple ofrece robustez y una estructura que puede alcanzar un ratio de concentración muy elevado (8.300), además de una buena eficiencia óptica, superior al 40 %.

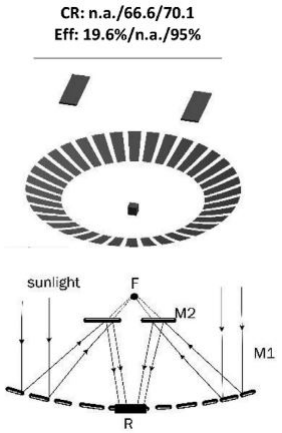


Figura 2.25: *Arreglo de espejos planos principales y secundarios*
[22]

Obianuju y Chong (2017) en[29] propusieron una geometría de concentrador compuesto por espejos planos principales y secundarios. Este tipo de diseño se caracteriza por su simplicidad de construcción, además de ofrecer un ratio de concentración alto y una distribución de flujo uniforme en el receptor.

Además de las geometrías mencionadas anteriormente, también se pueden encontrar configuraciones que no se encuentren centradas en su eje.

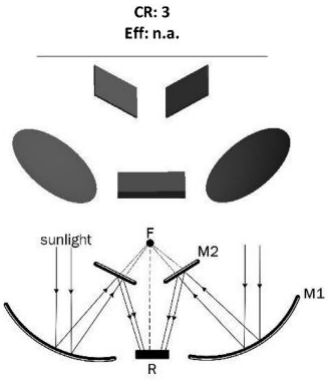


Figura 2.26: *Conjunto de espejos parabólicos principales y placas planas secundarias*
[22]

Meng et al., (2013) en [30] propuso una geometría que consiste en un conjunto de espejos parabólicos y un conjunto de placas planas, dispuestas de modo que la reflexión sea redirigida

hacia el receptor. Los resultados de este estudio arrojaron que este sistema permite tener una distribución de flujo uniforme en el receptor, pero un ratio de concentración muy bajo.

2.7.0.3. Two-Stage Trough

Todas las geometrías de los concentradores Two-Stage Trough se encuentran centradas en su eje, empleando un espejo parabólico principal curvado solamente en una dirección y un espejo secundario de diferentes formas.

Comparando este tipo de concentradores solares con los de tipo cassegrain y two-stage dishes, su espejo principal tiene una mayor longitud en su área de apertura, por lo que su volumen se vuelve un factor crucial en su construcción.



Figura 2.27: *Espejo principal en forma parabólica y espejo secundario elíptico* [22]

Cannavaro et al., (2016) en [31] Propuso un diseño de concentrador compuesto por un espejo principal de forma parabólica y un espejo secundario con forma elíptica. Como resultado se obtuvo un ratio de concentración medio. Además, comparado con un concentrador cilíndrico parabólico de una etapa, este ratio se ve aumentado en un 50 %, pero la eficiencia óptica se ve disminuida desde un 80 % hasta un 70 % debido a la presencia del espejo secundario.

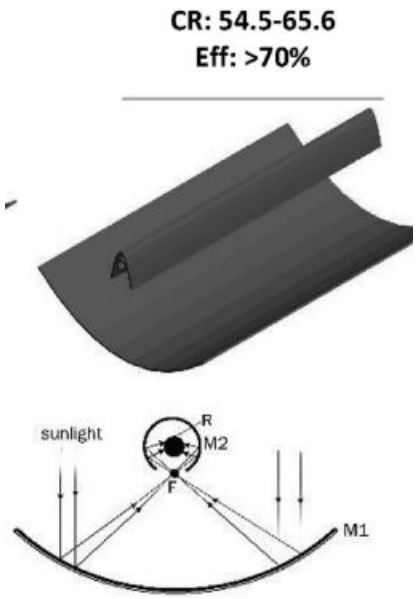


Figura 2.28: *Espejo principal parabólico y espejo secundario tipo XX-SMS* [22]

Cannavaro et al., (2013) en [32] propuso un diseño de concentrador con un espejo principal de forma parabólica y un espejo secundario llamado XX-SMS, de modo que el ratio de concentración se viera aumentado con respecto a otros modelos. La eficiencia óptica alcanzó un valor de 70 % y el ratio de concentración se mantuvo a un nivel intermedio menor a 100.

2.7.0.4. Solar Furnace

Este tipo de concentradores utiliza espejos primarios planos llamados heliostatos y un espejo secundario parabólico o esférico. Existe una gran variedad de configuraciones, variando el número de heliostatos y su posición. Debido a que se puede agregar una serie de heliostatos a la configuración, el ratio de concentración que alcanzan estos es muy elevado.

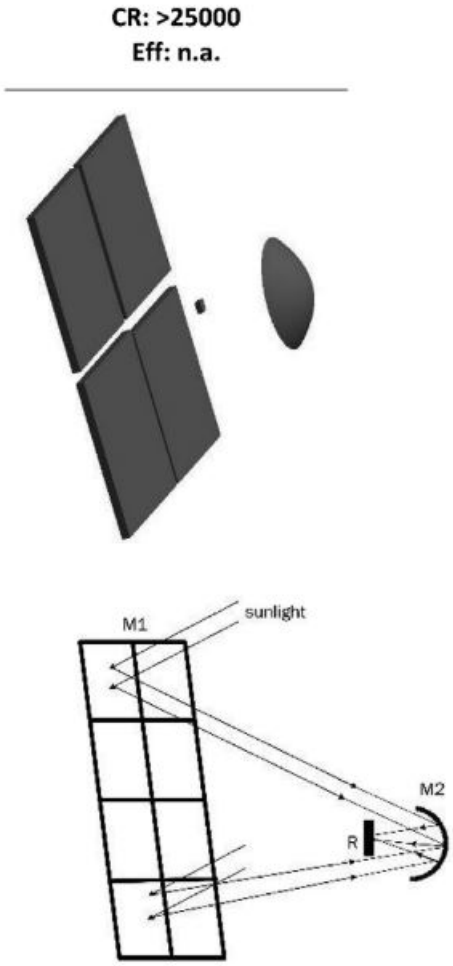


Figura 2.29: *Arreglo de 289 espejos dispuestos en forma de heliostatos, con un espejo secundario de forma esférica*

[22]

Lim y Li (2009) en [33] propusieron un diseño con un total de 289 espejos dispuestos en forma de heliostatos, con un espejo secundario en forma esférica encargado de recibir la reflexión de los espejos primarios. Este tipo de configuración arrojó como resultado un ratio de concentración de 25.000. Además, otra ventaja que presenta este diseño es que el espejo secundario puede ser mucho más pequeño que el área de colección de los heliostatos primarios, lo que conllevaría a un menor costo de fabricación.

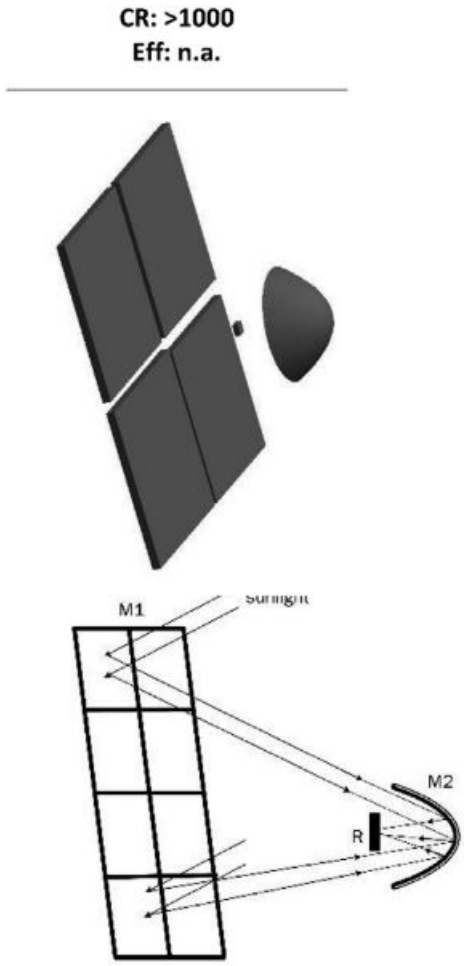


Figura 2.30: *Arreglo de heliostatos primarios y espejo secundario con forma parabólica* [22]

Chong et al., (2011) en [34] propuso un diseño de concentrador utilizando un arreglo de heliostatos primarios y un espejo secundario de forma parabólica. Los resultados obtenidos mostraron un ratio de concentración mayor a 1.000, mientras que el espejo parabólico secundario de menor tamaño permite una simplificación del modelo, reduciendo así los costos de construcción asociados.

Capítulo 3

Diseño del concentrador solar

Para el diseño de piezas y ensamble de estas, se utilizó el software Autodesk Inventor Professional 2020, además de Autodesk Fusion 360.

3.1. Estructura superior

El punto de partida del diseño fue una estructura que se encontraba en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad, utilizada anteriormente como base de un estanque de agua, la cual fue recuperada y pintada para poder utilizarla en el montaje del concentrador.

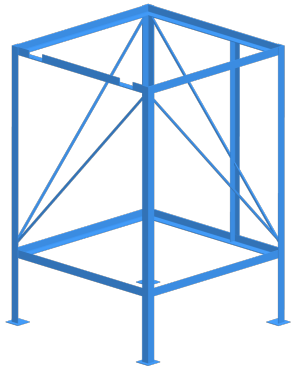
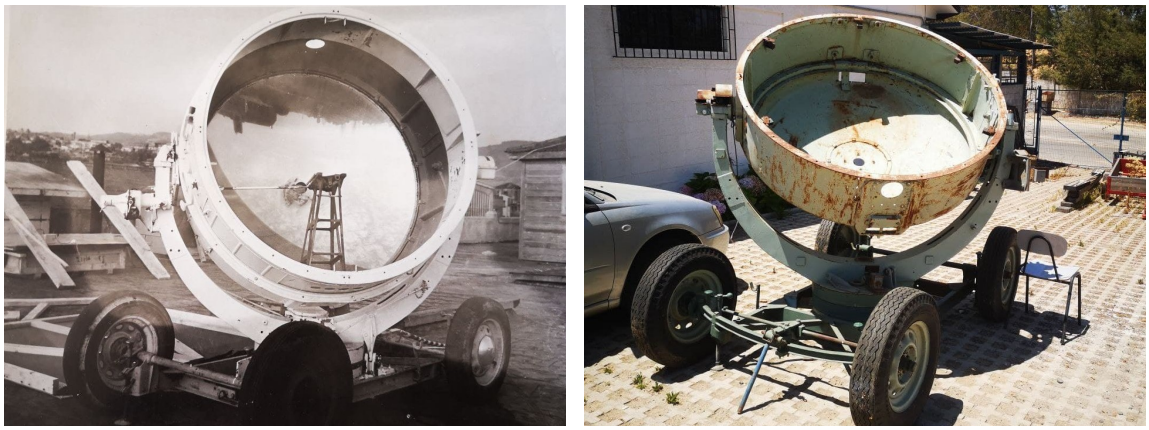


Figura 3.1: *Esqueleto Base*

Además de la estructura mostrada, se recuperó un disco parabólico utilizado anteriormente para fundición de metales. Su armazón consideraba un carro con 4 ruedas para su fácil transporte y un sistema compuesto por una base giratoria y 2 descansos a los costados para permitir su posicionamiento en dirección al sol.

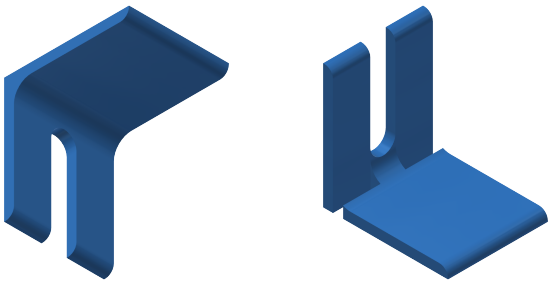


(a) *Concentrador solar utilizado para fundir metales* ***(b)*** *Soporte del concentrador en la actualidad*

Figura 3.2: *Concentrador utilizado para fundición*

Como se puede apreciar en el reflejo de 3.2a, la calidad del espejo era muy buena. Sin embargo, debido a los malos cuidados que se ha tenido y a otros factores, en la actualidad se encuentra abollado y su recubrimiento no posee las mismas características de reflexión..

Para acoplar el espejo parabólico de 1569 [mm] de diámetro a la estructura, se diseñó un octágono con perfiles cuadráticos de 40 [mm] x 40 [mm] x 2 [mm] de medida interior 1620 [mm]. Además, se diseñaron 2 tipos de soporte para fijar el disco al marco.



(a) *Soporte superior espejo* ***(b)*** *Soporte inferior espejo*

Figura 3.3: *Soportes utilizados en el espejo*

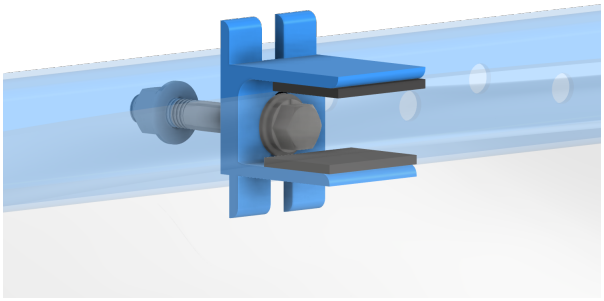


Figura 3.4: *Ensamble soportes*

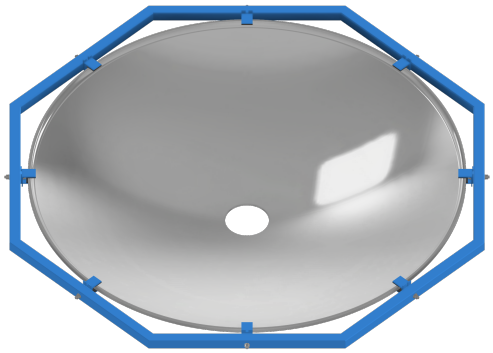


Figura 3.5: *Ensamble de octágono y espejo parabólico*

En la figura 3.4 se puede apreciar la forma en la que se posicionan los soportes mostrados en 3.3, en donde se utiliza una goma dura de espesor 3[mm] pegada en la cara interior de cada uno de ellos para lograr un mejor apriete en contacto con el espejo parabólico y evitar que este deslice.

En 3.5 se visualiza el ensamblaje del disco parabólico junto al octágono, utilizando los soportes superior e inferior del espejo.

Para posicionar el conjunto 3.5 sobre la estructura 3.1 es necesario el uso de acoples que permitan aumentar el alcance de la base tanto en anchura como en altura, por lo que se propuso el siguiente diseño:

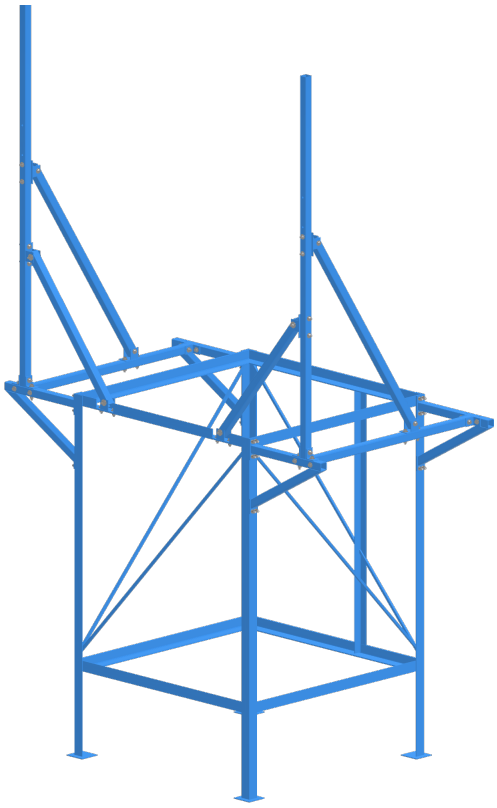
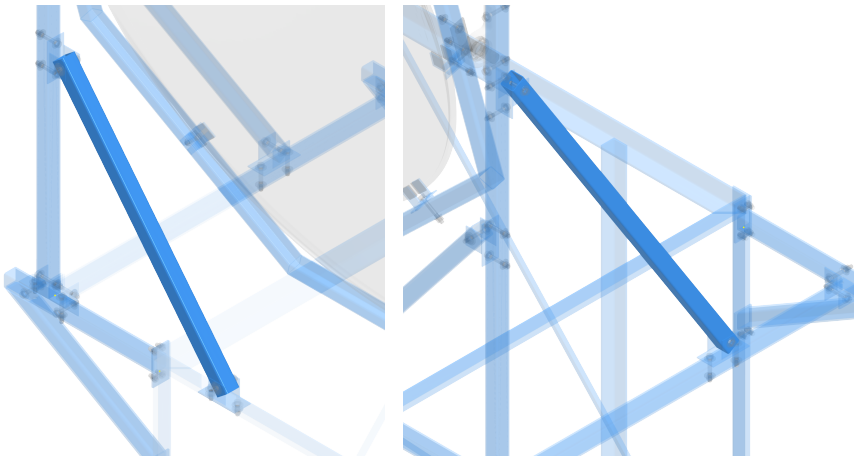


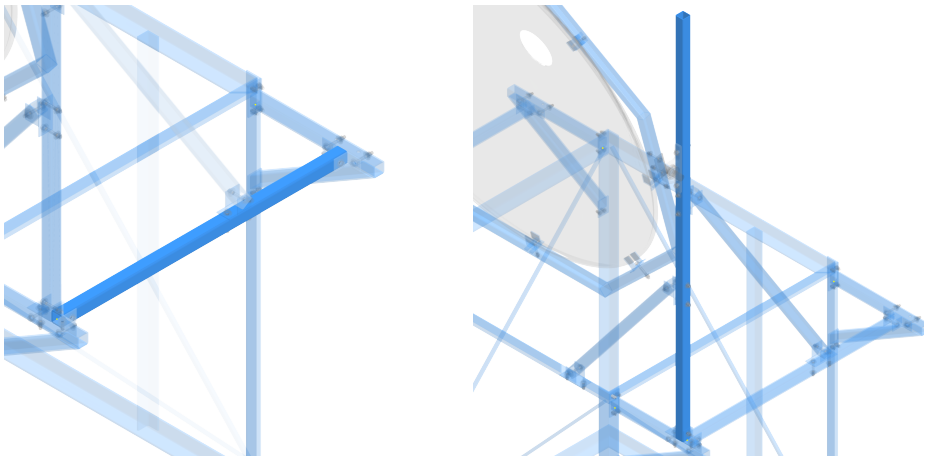
Figura 3.6: *Diseño base*

A continuación, se detallan las piezas utilizadas en 3.6



(a) *Diagonal lateral* ***(b)*** *Diagonal trasera*

Figura 3.7: *Soportes diagonales*



(a) *Soporte horizontal* ***(b)*** *Soporte vertical*

Figura 3.8: *Soportes horizontales y verticales*

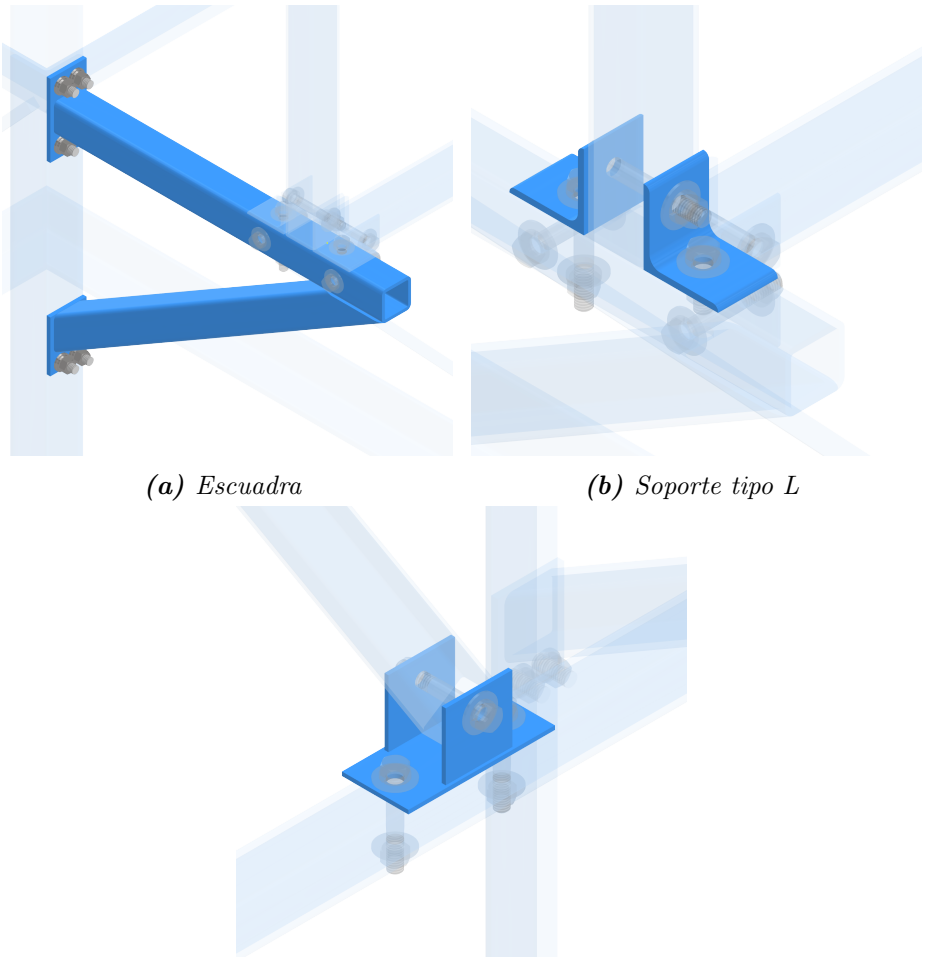
Los soportes anteriores están diseñados a partir de un perfil cuadrático de medidas 40 [mm] x 40 [mm] x 2 [mm].

La diagonal lateral 3.7 se utiliza para evitar que el soporte vertical se mueva en dirección lateral. Tiene un largo de 800 [mm] y cuenta con 2 perforaciones en sus extremos para ser posicionado y fijado.

La diagonal trasera 3.7b es utilizada para evitar que el soporte vertical se mueva hacia adelante o hacia atrás. Al igual que la pieza anterior cuenta con 2 perforaciones en sus extremos y tiene un largo de 1.200 [mm].

El soporte horizontal 3.8a tiene como función fijarse a los soportes tipo ángulo y darle rigidez a la diagonal trasera. Cuenta con 2 perforaciones en sus extremos y tiene un largo de 1.037 [mm].

El soporte vertical 3.8b sirve de apoyo para posteriormente posicionar el conjunto del octágono y espejo parabólico 3.5. En su parte inferior posee 2 perforaciones para fijarlo a la estructura y tiene un largo de 1.800 [mm].



(a) *Escuadra* ***(b)*** *Soporte tipo L*

(c) *Soporte tipo T*

Figura 3.9: *Soportes utilizados en el montaje de la estructura*

El soporte tipo escuadra 3.9a se realizó con perfil 40 [mm] x 40 [mm] x 2 [mm], el cual posee un ángulo entre los perfiles de 30°. Para acoplarlo a la estructura cuenta con una pletina de medidas 50 [mm] x 5[mm], la cual posee 4 perforaciones en la parte superior y 2 en la parte inferior para ser posicionada dentro de 6 hilos roscados que se encuentran fijos en la base 3.1.

Para el soporte tipo L 3.9b se utilizó un ángulo de medida 50 [mm] x 50 [mm] x 5 [mm], el cual se encuentra cortado a 40 [mm] de largo y perforado según 2 configuraciones:

- 20 [mm] en una cara y 20 [mm] en la otra.
- 20 [mm] en una cara y 30 [mm] en la otra.

Las medidas son tomadas desde el borde de cada cara, para evitar que ocurra una interferencia al momento de montar los soportes y sus respectivos elementos de fijación.

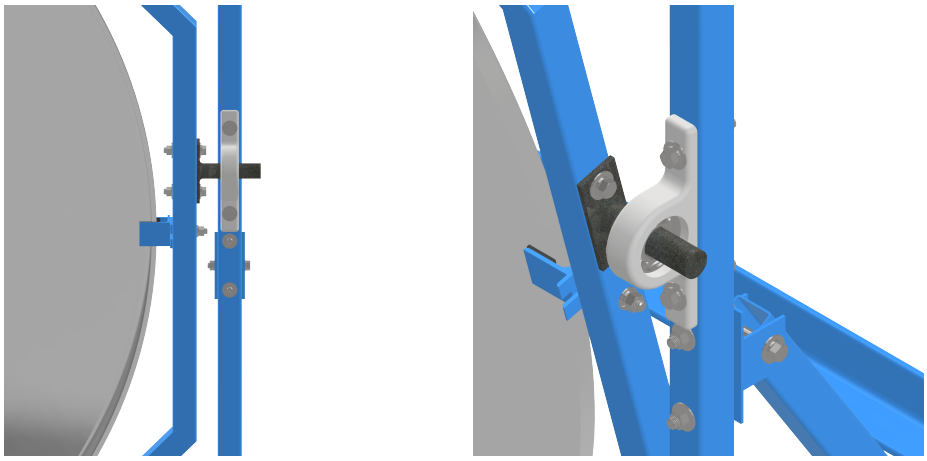
El soporte tipo T 3.9c, se diseñó para fijar las diagonales frontales y traseras, encargadas de mantener los pilares verticales en su posición. Están hechos a partir de una pletina de 50 [mm] x 3 [mm], y soldados en un ángulo de 90° con respecto a la base. Cuenta con un total de 4 perforaciones para su posicionamiento.

La cantidad de soportes utilizados en el ensamble de la estructura se muestra en la siguiente tabla:

Tipo de Soporte	**Cantidad**
Diagonal lateral	2
Diagonal trasera	2
Soporte horizontal	2
Soporte vertical	2
Escuadra	4
Tipo L	12
Tipo T	8

Tabla 3.1: *Cantidad de soportes a fabricar*

Teniendo la estructura ya ensamblada, es necesario montar el octágono sobre los perfiles verticales de 3.6. Para esto, hay que considerar que el octágono necesita posicionarse en diferentes ángulos con respecto a la vertical, por lo que es necesaria la utilización de ejes y descansos para permitir el giro de este.



(a) *Descanso y eje frontal* ***(b)*** *Descanso y eje*

Figura 3.10: *Posicionamiento ejes y descansos*

Como se puede apreciar en 3.10, los ejes se encuentran posicionados sobre el centro del octágono, de modo que el centro de gravedad del ensamble se encuentre por debajo del eje de giro del octágono. Esto permite que el conjunto descanse de manera vertical, impidiendo cualquier tipo de rotación no requerida.

Para evitar que los verticales pudiesen abrirse, se diseñó un conjunto que permite mantenerlos en su posición ante la acción de cualquier fuerza externa. Este soporte está hecho en base a perfiles tipo C de medida 50 [mm] x 25 [mm] x 2.5 [mm]. En el centro de la parte superior y en los laterales se encuentran 2 de estos perfiles unidos formando un cuadrado, permitiendo obtener una mayor rigidez, además de permitir que el soporte vertical se posicione dentro del conjunto. Para fijarlo a la estructura cuenta con 2 tuercas fijadas a cada uno de los laterales, en donde se introducen 4 pernos y aprietan el conjunto contra los soportes.

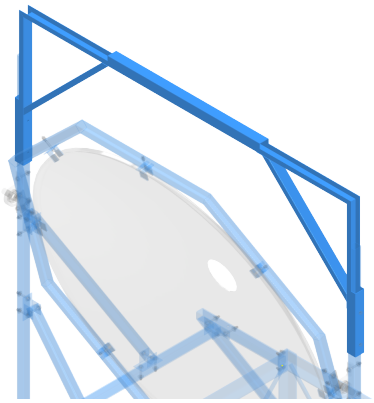


Figura 3.11: *Conjunto soporte superior.*

Finalmente, considerando que detrás de la estructura debe posicionarse un reactor rotatorio, es necesario crear un tipo de base en la parte posterior de este.

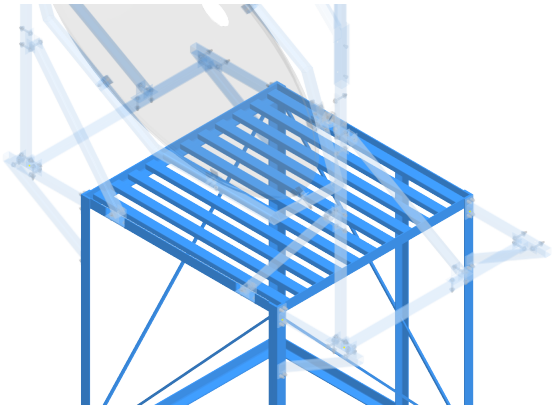


Figura 3.12: *Base posterior*

Como se puede apreciar en la figura 3.12, la base cuenta con un total de 11 perfiles tipo C, de medidas 50 [mm] x 25 [mm] x 2.5 [mm] y un largo de 1.100[mm] cada uno, posicionados a una distancia de 50[mm] entre ellos.

Para terminar, se utilizó un soporte del tipo trípode fijado a la estructura del octágono para poder posicionar el espejo hiperbólico dentro de él. Cuenta con un aro interior de 245 [mm] de diámetro que se encuentra a 423 [mm] de la base de sus patas.

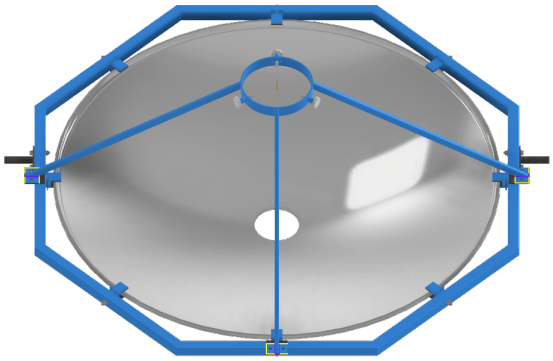


Figura 3.13: *Soporte disco hiperbólico*

El ensamble final considerando todos los componentes detallados anteriormente se muestra en la siguiente figura:

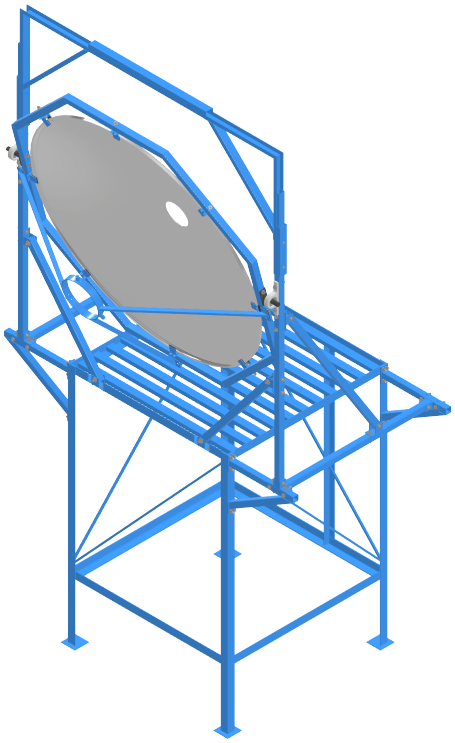


Figura 3.14: *Ensamble final de todas las partes*

3.2. Estructura inferior

Para comenzar a diseñar la parte inferior de la base final, se recuperaron 2 estructuras que eran parte de un módulo Fénix utilizado para realizar pruebas en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad. Están construidas con perfiles 50 [mm] x 30 [mm] x 2 [mm] y poseen las siguientes medidas:

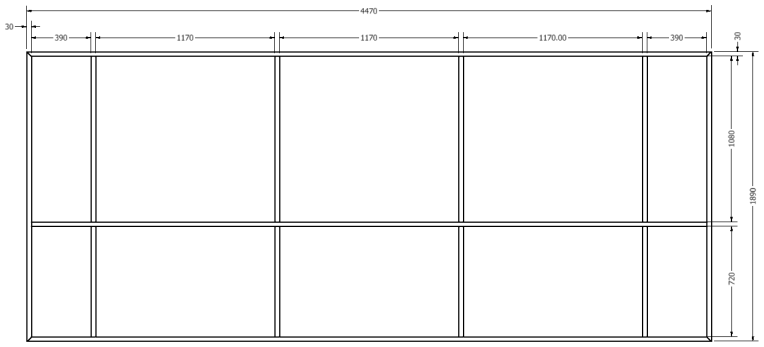


Figura 3.15: *Estructura base inferior*

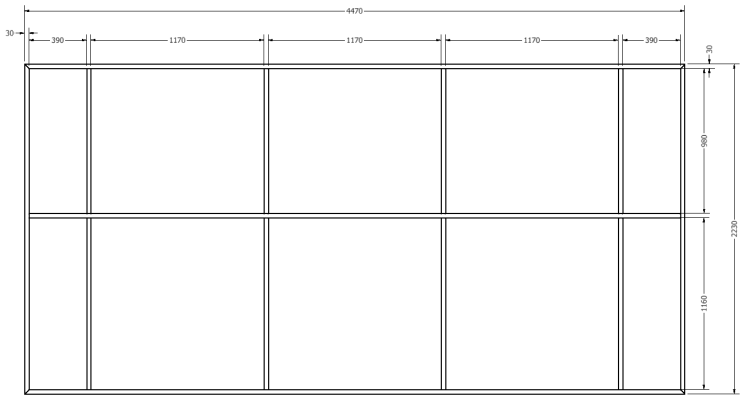


Figura 3.16: *Estructura base superior*

Debido a que las medidas del ancho de estas estructuras no son iguales, fue necesario agregar perfiles a la base superior para ensamblarlas. Para esto, se utilizaron perfiles cuadráticos de medida 50 [mm] x 50 [mm] x 2.5 [mm], posicionados de manera que la cara exterior de estos tenga una medida de 1.890[mm] con respecto al inicio.

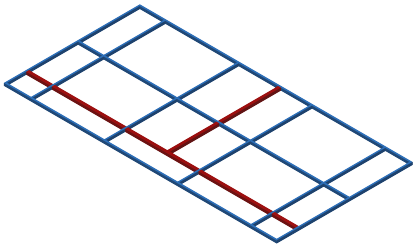
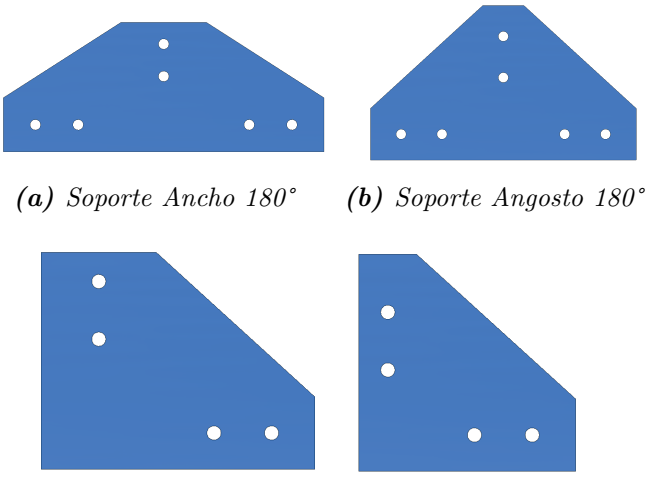


Figura 3.17: *Modificación a la estructura superior*

En la figura anterior, se puede apreciar que con el arreglo realizado a la estructura superior se obtiene la misma medida de ancho de la estructura inferior, por lo que realizar el ensamble de estas resulta más fácil.

Gracias a esta modificación es posible ensamblar las estructuras mostradas anteriormente y lograr aumentar la distancia a la que se encontrará el concentrador solar del suelo. Para esto, se utilizaron pilares hechos a partir de perfiles rectangulares de medidas 80 x 40 x 3 [mm], los cuales tienen un largo de 1.830[mm].

Para ensamblar los pilares a las estructuras tanto inferior como superior, se utilizan los soportes que se muestran a continuación:



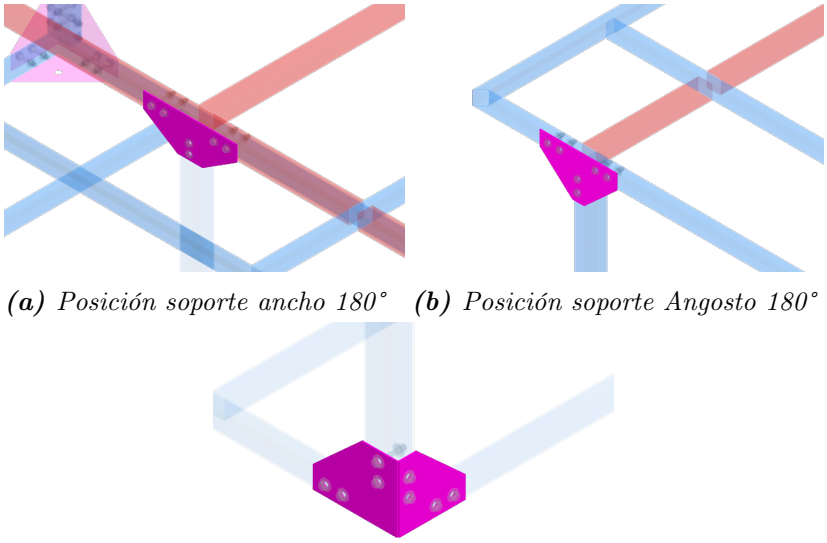
(a) *Soporte Ancho 180°* ***(b)*** *Soporte Angosto 180°*

(c) *Soporte Ancho 90°* ***(d)*** *Soporte Angosto 90°*

Figura 3.18: *Soportes pilares*

- **Soporte ancho 180°:** Utilizados para unir la estructura base superior e inferior con los pilares centrales. Cuenta con un total de 6 perforaciones de 10 [mm] para su fijación mediante pernos.
- **Soporte angosto 180°:** Utilizados para unir la estructura superior a 2 de los pilares laterales. Cuenta con un total de 6 perforaciones de 10 [mm] para su fijación mediante pernos.
- **Soporte ancho 90°:** Utilizados para unir las 4 esquinas inferiores y 2 esquinas superiores a la cara más ancha de los pilares (80 [mm]). Cuenta con un total de 4 perforaciones de 10 [mm] para su posterior fijación mediante pernos.
- **Soporte angosto 90°:** Cumplen la misma función que los soportes mencionados anteriormente, pero están ubicados en la cara angosta del pilar (40 [mm]). Cuenta con 4 perforaciones de 10 [mm], en las cuales se debe considerar que los agujeros verticales no deben tener la misma posición que en el soporte ancho 90°, para evitar interferencia entre los elementos de fijación.

Todos los soportes detallados anteriormente poseen un espesor de 8 [mm].



(a) *Posición soporte ancho 180°* ***(b)*** *Posición soporte Angosto 180°*

(c) *Posición de los soportes de 90°*

Figura 3.19: *Soportes pilares en su posición*

Además de los soportes detallados anteriormente, se utilizaron 6 placas de 8 [mm] de espesor unidas a la base inferior que permiten posicionar la estructura sobre 6 hilos roscados de 3/4 [in] de diámetro y así poder nivelarla.

El total de soportes que se necesitan fabricar para implementar en la estructura se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de Soporte	**Cantidad**
Soporte ancho 180°	4
Soporte angosto 180°	2
Soporte ancho 90°	6
Soporte angosto 90°	6
Soporte base	6

Tabla 3.2: *Cantidad de soportes a fabricar*

Posicionando todos los elementos mencionados con anterioridad, la estructura inferior se ve de la siguiente manera.

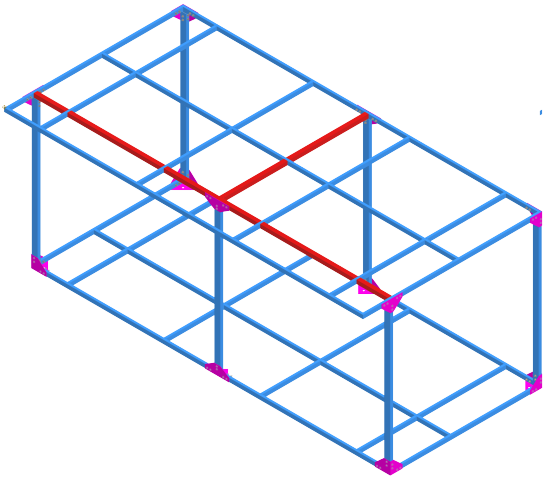


Figura 3.20: *Estructura inferior*

Cabe destacar que esta se posicionará sobre 6 soportes de concreto ubicados a la altura de los 6 pilares.

En la parte posterior de la base se diseñó una escalera que permite acceder a la parte superior de esta estructura de manera segura. Está hecha a partir 2 perfiles tipo ángulo de medidas 30 [mm] x 30 [mm] x 3 [mm] posicionados de manera vertical y 5 perfiles del mismo tipo ubicados de forma horizontal a 300 [mm] de distancia entre ellos para formar los peldaños. Además, para dar una mayor rigidez a la estructura se posicionaron 4 diagonales (1 en la parte frontal, 1 en la parte trasera y 2 en los laterales) hechas a partir de perfiles tipo ángulo de 30 [mm] x 30 [mm] x 3 [mm] posicionadas como se ven en la siguiente imagen.

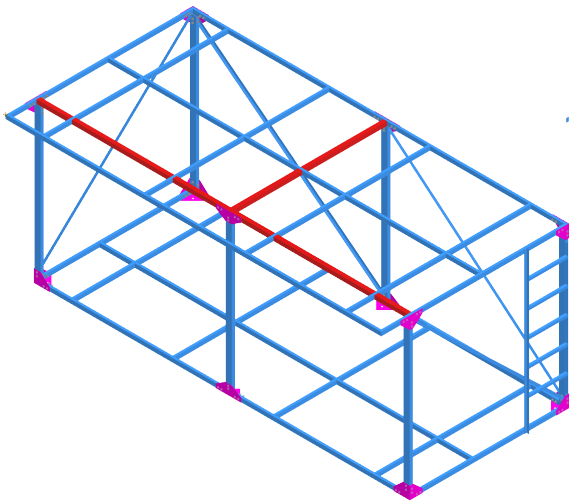


Figura 3.21: *Estructura con diagonales y escalera*

Para poder transitar sobre esta estructura, se posicionan planchas de acero diamantado de 3 [mm] de espesor fijadas a la base superior, además de un sistema de barandas de 1.100 [mm] de alto ubicadas en su perímetro para dar seguridad a las personas que se encuentren realizando mediciones en el concentrador solar.

Finalmente, con cada uno de los elementos que componen esta estructura terminados, el diseño se ve de la siguiente forma:

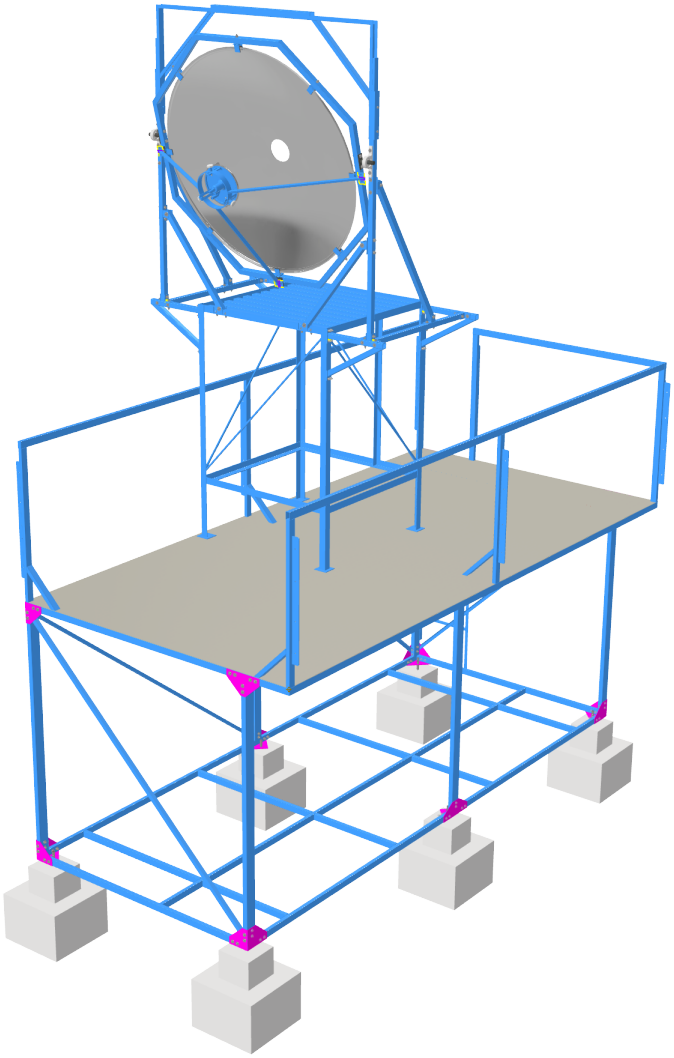


Figura 3.22: *Estructura final montada*

3.3. Caracterización del disco parabólico

Uno de los trabajos a realizar fue la caracterización del espejo parabólico, por lo que se midió su diámetro interior y distancia al vértice para encontrar la ecuación que representa su geometría.

La ecuación de una parábola vertical, con su vértice en el origen viene dada por la expresión:

$$x^2 = 4py \tag{3.1}$$

En donde p corresponde a la distancia desde el vértice hasta el foco de la parábola.

Midiendo la geometría del disco mencionado anteriormente se obtuvo que el diámetro efectivo de reflexión es de 1.518,197 [mm] y que la altura desde el vértice a la parte superior es 212,619 [mm]. Con estos valores se procede a determinar la distancia que existe hasta el foco de la parábola:

$$759,0985^2 = 4p \cdot 212,619 = 677,5389[mm]$$

$$x^2 = 2710,16y$$

Finalmente,la distancia que existe desde el vértice de la parábola a su foco corresponde a 677,54 [mm]

El arreglo a utilizar es del tipo Cassegrain, el cual consta de 2 espejos, 1 de geometría parabólica y el otro hiperbólica. El primer espejo es el encargado de recibir los rayos provenientes del heliostato, para luego dirigirlos a su foco. Alineado al punto focal del paraboloide se encuentra el disco hiperbólico, encargado de la segunda etapa de reflexión y de redirigir los rayos del sol hacia su segundo foco, en donde se encuentra ubicado el reactor.

3.4. Diseño del disco hiperbólico

Para completar el sistema de concentración tipo Cassegrain fue necesario diseñar y fabricar un disco hiperbólico. Para esto, es necesario conocer los parámetros y la ecuación característica de las hipérboles.

La ecuación de la hipérbole viene dada de la siguiente forma:

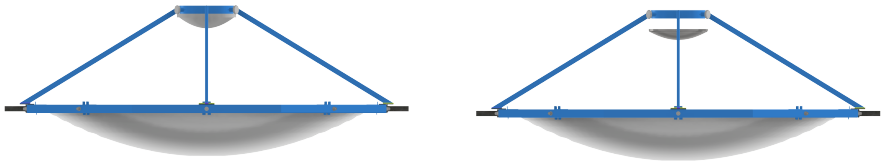
$$\frac{(y-k)^2}{a^2} - \frac{(x-h)^2}{b^2} = 1 \tag{3.2}$$

- (h, k): Coordenada en la que se encuentra el centro
- a : Distancia existente entre el centro de la hipérbole y su vértice
- b : Valor calculado utilizando Teorema de Pitágoras
- c : Distancia existente entre el centro de la hipérbole y su foco

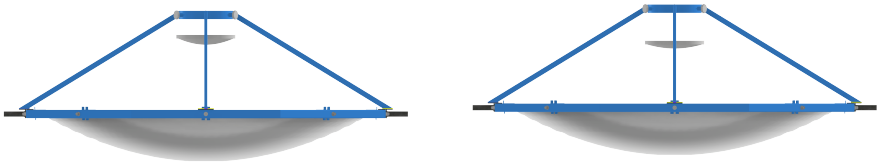
Para el disco a modelar, se necesita que uno de sus focos se posicione a la misma distancia del foco del disco parabólico, por lo que se situó a 677,54[mm] del eje (0,0), que corresponde al centro de la parábola. Además, el 2do foco debe estar a una distancia de 350[mm] detrás del disco parabólico para coincidir con el reactor rotatorio.

Se analizaron diversos factores a la hora de determinar la ecuación de la hipérbole, por lo que se diseñaron distintas propuestas para poder elegir la que mejor se acoplara al sistema. Dentro de los factores a considerar se encuentran:

- Factor de forma
- Distancia del vértice al foco
- Diámetro de la hipérbola
- Dificultad de impresión



(a) *Distancia de vértice a foco 72 mm* ***(b)*** *Distancia de vértice a foco 100 mm*



(c) *Distancia de vértice a foco 122 mm* ***(d)*** *Distancia de vértice a foco 172 mm*

Figura 3.23: *Diseño de discos hiperbólicos*

Considerando las restricciones de diseño para posicionarlo dentro del aro existente y generar la menor sombra posible, el disco que mejor cumple con los factores mencionados anteriormente es el que tiene una distancia desde el vértice a su foco de 100 [mm], el cual posee las siguientes coordenadas para su foco, centro y vértice:

	x	y
Foco 1	0	677,54
Vértice 1	0	577,54
Centro	0	163,77
Foco 2	0	-350
Vértice 2	0	-250

Tabla 3.3: *Valores en los ejes x e y de Focos, Centro y Vértices*

Con estos datos, se pueden determinar los valores de a y c

$$a = 413,77$$

$$c = 513,77$$

Conociendo los valores de a y c, y utilizando el Teorema de Pitágoras, se puede obtener el valor de b.

$$a^2 + b^2 = c^2 \tag{3.3}$$

$$b^2 = c^2 - a^2 \rightarrow b = 304,555414$$

De esta manera, la ecuación de la hipérbole utilizada como segunda etapa de reflexión viene dada por la expresión:

$$\frac{(y - 163,77)^2}{413,77^2} - \frac{x^2}{304,555414^2} = 1 \tag{3.4}$$

Debido a que el disco hiperbólico se encuentra expuesto a altas temperaturas, fue necesario implementar un sistema de enfriamiento que permitiese disminuir estos valores para evitar cualquier tipo de deformación térmica en el conjunto.

Con los datos obtenidos anteriormente y tomando en cuenta los aspectos a considerar en el diseño, se fabricó el conjunto de piezas mostradas a continuación:



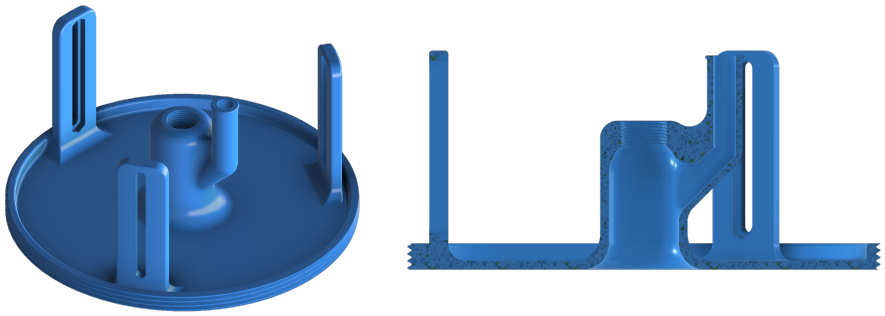
(a) *Vista principal disco hiperbólico*



(b) *Vista lateral Disco hiperbólico* ***(c)*** *Vista en corte disco hiperbólico*

Figura 3.24: *Disco hiperbólico*

Esta pieza consiste en un disco hiperbólico de diámetro 260[mm] que viene dado por la geometría obtenida en 3.4. Cuenta con un cuerpo roscado que permite acoplarlo a la carcasa, además de 2 manillas para facilitar su instalación.

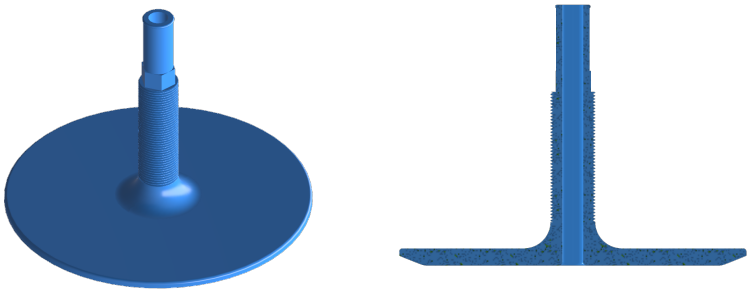


(a) *Carcasa conjunto hiperbólico* ***(b)*** *Vista en corte carcasa conjunto hiperbólico*

Figura 3.25: *Carcasa*

El cuerpo central de la carcasa consta de una entrada roscada para la instalación del difusor, además de un acople lateral que conecta con la cámara de este para la conexión de una manguera utilizada como salida de agua.

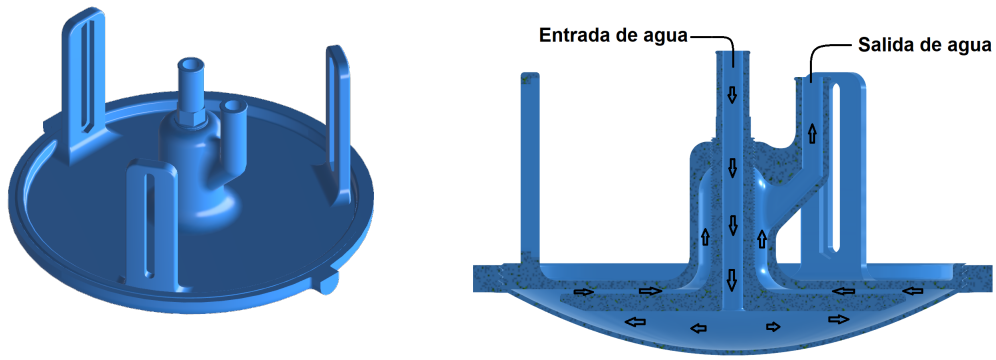
En el exterior de la carcasa se pueden apreciar 3 columnas verticales, las cuales se posicionan dentro de la geometría del aro ubicado en la estructura del concentrador, y que permiten el posicionamiento y la regulación del disco. Además, la rosca exterior de la carcasa permite el acople con la pieza 3.24a.



(a) *Difusor* ***(b)*** *Vista en corte difusor*

Figura 3.26: *Difusor*

El difusor cuenta con una rosca exterior para posicionarse dentro de la carcasa, además de un borde superior con un diámetro levemente mayor para posicionar la manguera de entrada de agua con medida 3/4 [in] de diámetro y fijarla mediante el uso de abrazaderas.



(a) *Conjunto hiperbólico* ***(b)*** *Vista en corte conjunto hiperbólico*

Figura 3.27: *Conjunto disco hiperbólico*

En 3.27a se aprecia la vista del conjunto completo, en donde se identifica el funcionamiento del sistema de enfriamiento empleado.

Teniendo las piezas completamente ensambladas, se posicionan dentro del aro ubicado en el rango del foco del disco parabólico. Esto se realiza mediante 3 acoples roscados de 8[mm] de diámetro junto a sus respectivas tuercas, que permiten un posicionamiento y apriete rápido.

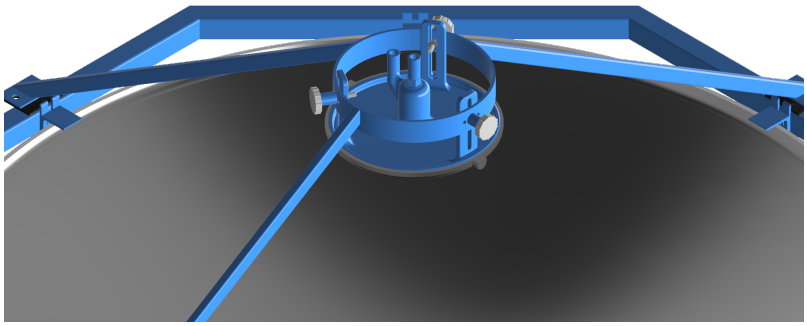


Figura 3.28: *Conjunto del disco hiperbólico instalado*

Finalmente, el arreglo Cassegrain con los espejos instalados de acuerdo a las medidas calculadas, y cumpliendo el objetivo de que el foco del disco parabólico y el primer foco del disco hiperbólico coincidan en un mismo punto, de modo que el foco secundario se encuentre detrás del sistema se puede observar en la siguiente figura junto a sus medidas.

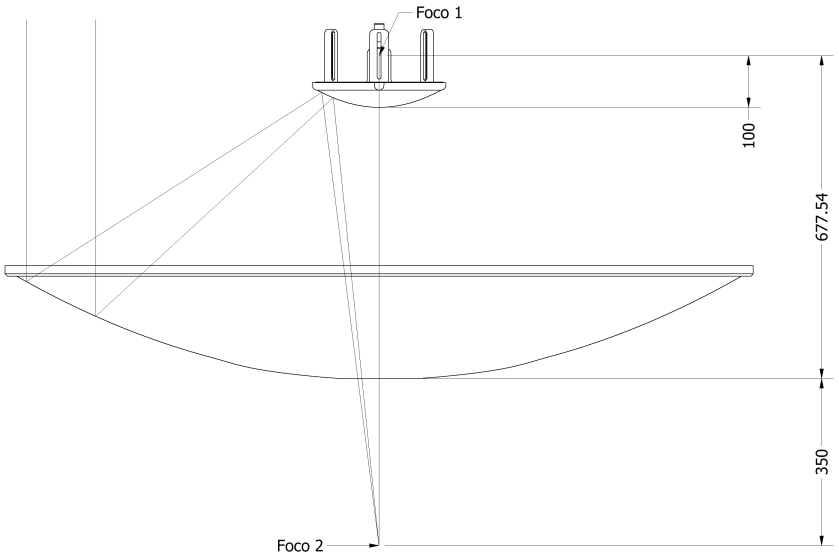


Figura 3.29: *Geometría del sistema Cassegrain*

Capítulo 4

Construcción e Instalación del concentrador solar

4.1. Medición y perforación de agujeros

Para iniciar, se definió el espacio donde se ubicaría la estructura para posteriormente medir y marcar el lugar en el cual se instalarán los apoyos de concreto. Esto se realizó utilizando 6 barras de fierro y 1 cuerda de pita; además, se definió la altura a la cual debería llegar el hormigón utilizando nivelación con manguera. Se excavaron de 6 agujeros de dimensiones 0,5[m] x 0,5[m] x 0,5[m] y en cada uno de ellos se ubicó un armazón de fierro para darle rigidez a la base. Luego, en el centro de cada uno de estos agujeros se posicionó un espárrago de 3/4 [in] previamente soldado en forma de L, para regular la altura y nivelar la estructura que se posicionará posteriormente sobre los apoyos de hormigón.



(a) *Base inferior y medición del espacio a ocupar*



(b) *Perforación del suelo*

Figura 4.1: *Medición y perforación*

4.2. Moldaje de pilares

Teniendo ya posicionado el armazón de fierro y el espárrago, se procede a rellenar el agujero con mezcla de concreto en proporción de 3 medidas de gravilla, 2 de arena y 1 de cemento, utilizando una sonda de vibración para evitar la formación de burbujas. Luego de rellenar los agujeros, se posicionan los moldes hechos a partir de terciado estructural de 18 [mm] de espesor sobre cada una de las bases. Estos moldajes en su parte superior tienen medidas de 250 [mm] de largo y ancho, y una altura de 150 [mm].

Finalmente, se vierte la mezcla de cemento dentro de los moldes y se realiza nuevamente un proceso de vibrado, para posteriormente dejar fraguar la mezcla y obtener su rigidez máxima.



(a) *Armazón de fierro y espárrago*



(b) *Sonda de vibración*

Figura 4.2: *Posicionamiento armazón y primer llenado*



(a) *Vertimiento de concreto* ***(b)*** *Moldajes en posición*

Figura 4.3: *Vertimiento de concreto en moldajes*

Cabe mencionar que luego de realizar los primeros soportes de concreto y retirar los moldajes, la parte superior se desprendió, por lo que fue necesario utilizar otro tipo de arena, cambiar la proporción de la mezcla (2 de gravilla, 2 de arena y 1 de cemento) y repetir el mismo proceso mencionado anteriormente.

Durante aproximadamente una semana se mantuvo un ambiente húmedo en el concreto, mojándolo al menos una vez al día, permitiendo que adquiera la totalidad de su resistencia. Con el proceso de curado terminado, se procedió a quitar los moldajes para continuar con el montaje de la estructura.

4.3. Armado de estructura

Para posicionar la estructura mostrada en 4.1a sobre los apoyos de concreto, se soldaron piezas de acero de 8 [mm] de espesor en cada una de las esquinas y en la mitad del largo, las cuales cuentan con una perforación más grande que el diámetro de la barra hilada posicionada en el centro de la base de hormigón para tener una holgura al momento del montaje. Con este sistema, y utilizando tuercas en la parte inferior y superior de los acoples de acero, es posible regular y nivelar la estructura.



Figura 4.4: *Posicionamiento de la base inferior sobre los apoyos de concreto*

Fue necesario realizar las modificaciones a la base superior mostradas en 3.17 antes de continuar con el armado de la estructura, con el objetivo de obtener la misma medida que el ancho de la base inferior y así facilitar el acople con los pilares verticales. Para esto, se soldaron perfiles cuadráticos de medidas 50 [mm] x 50 [mm] x 2 [mm] a la estructura.

Se utilizaron pilares de 1.830 [mm] de largo fabricados a partir de perfiles rectangulares de medidas 80 [mm] x 40 [mm] x 3 [mm] sacados de un antiguo ventanal del casino de la Universidad, que se encontraba en desuso. Para acoplar estos pilares a la base superior e inferior de la estructura, fue necesario fabricar los soportes mostrados en 3.18. Para ello se utilizaron retazos de una plancha de acero de 6 [mm] de espesor, los cuales fueron cortados con un esmeril angular de 7 [in] a la forma deseada y perforados a 11,5 [mm] de diámetro de acuerdo a la configuración de cada uno de los soportes.

Teniendo todos los elementos ya mecanizados, se inició el posicionamiento y ensamble de los pilares sobre la base inferior. Se hicieron calzar las perforaciones de los perfiles verticales con las de los soportes, insertando pernos de cabeza hexagonal de 3/8 [in] de diámetro junto a sus golillas, para posteriormente realizar el apriete correspondiente. Este proceso se realizó en cada uno de los pilares verificando su posición con un nivel de burbujas. Posteriormente, se ubicó la base superior sobre la estructura ya montada, se colocaron los soportes correspondientes, se posicionaron los pernos dentro de las perforaciones y se ajustaron todos los elementos de fijación. Finalmente, se pintó toda la estructura con anticorrosivo estructural, utilizando una pistola de pintura y un compresor marca Indura de 24 [L] de capacidad y potencia de 2 [HP].



(a) *Posicionamiento pilar* ***(b)*** *Estructura ensamblada*

(c) *Estructura pintada frontal* ***(d)*** *Estructura pintada lateral*

Figura 4.5: *Montaje bases*

Se fabricó una escalera utilizando perfiles de 30 [mm] x 30 [mm] x 3 [mm], la cual fue soldada a la parte posterior de la estructura permitiendo un fácil acceso a la parte superior. Además, para restringir el movimiento lateral de esta base y darle una mayor rigidez, se instalaron 4 diagonales, 1 en la parte frontal, 1 en la parte posterior y 2 en los laterales. Estas fueron soldadas a los soportes respectivos de las esquinas a las cuales llegan.

Para nivelar la base se utilizó un nivel topográfico y una mira telescópica de aluminio, situándola sobre cada uno de los soportes de concreto y realizando las mediciones correspondientes, moviendo las roscas inferior y superior de la barra hilada fijada en el hormigón para regular la altura de la estructura. Con la base ya en su posición, se realizó el apriete de las roscas para evitar cualquier movimiento no deseado.



Figura 4.6: *Diagonales y escalera*

Utilizando perfiles de 50 [mm] x 30 [mm] x 2 [mm] se construyeron barandas de 1.100 [mm] de altura en la parte lateral y posterior de la base superior, dejando un espacio en el lugar donde se ubica la escalera para acceder a esta. El espacio frontal se dejó libre para facilitar el izaje de las estructuras que posteriormente se ubicarán sobre la base.

Para poder transitar sobre el armazón se utilizaron planchas diamantadas de 3 [mm] de espesor recuperadas de un proyecto anterior. Estas se encontraban recubiertas de una gran cantidad de óxido y pintura, por lo que fue necesario realizar los siguientes trabajos:

- Golpear planchas con mazo para soltar óxido y pintura
- Limpieza de impurezas con esmeril angular de 7 [in] y grata de copa trenzada
- Limpieza final con ácido muriático

Luego de realizar los trabajos mencionados durante varios días, las planchas quedaron en buen estado para poder montarlas sobre la base. Estas fueron posicionadas y cortadas a la medida necesaria para posteriormente ser soldadas al armazón superior, obteniendo un piso firme para moverse y seguir con el montaje del concentrador solar. Finalmente, se aplicó anticorrosivo estructural tanto a las barandas como al piso diamantado utilizando un compresor y pistola de pintura.



(a) *Limpieza de planchas diamantadas*

(b) *Barandas y planchas de acero diamantado fijadas*

(c) *Planchas preparadas para pintar*

(d) *Aplicación de anticorrosivo estructural*

Figura 4.7: *Proceso de preparación y fijación de baranda y planchas de acero diamantado*

Al aplicar 3 manos de anticorrosivo, seguía brotando óxido de las planchas de acero, por lo que fue necesario revestirlas con otro tipo de pintura. Se utilizó anticorrosivo de terminación azul de marca Revor, el cual se aplicó en 2 capas y tiene la ventaja de ser anticorrosivo y además dejar una película de terminación brillante. Gracias a este producto, se frenó el avance del óxido de manera inmediata.

Continuando con el proceso de construcción del concentrador solar, se fabricaron las piezas mostradas en 3.8 y 3.9 para ensamblar al esqueleto base 3.1. Para las diagonales y los soportes horizontal y vertical se utilizaron perfiles de medidas 40 [mm] x 40 [mm] x 2 [mm], cortados a su respectivo largo y perforados a un diámetro de 11,5 [mm] en sus extremos para su acople con los soportes tipo L y tipo T. Además, el soporte horizontal posee perforaciones en su parte central para el posicionamiento de los descansos que soportarán la estructura del disco

parabólico y permitirán que este gire. Posteriormente, se probaron las piezas anteriores para detectar cualquier inconveniente que pudiese presentarse al momento de ensamblar todo.

Para soportar el disco parabólico sobre las piezas construidas anteriormente se fabricó el octágono 3.5 a partir de perfiles cuadráticos de 40 [mm] x 40 [mm] x 2 [mm] cortados a 704 [mm] en su parte más larga y a un ángulo de 67,5°, para que al momento de soldarlos formen un ángulo interno de 135° cada esquina. Fijando cada uno de los 8 trozos de acero entre si, se obtiene una distancia interna igual a 1620[mm]. Cada uno de los lados del octágono posee una perforación en el medio de 11,5 [mm] de diámetro para posicionar los soportes del espejo. Además, los perfiles laterales poseen 2 perforaciones extra para posicionar el eje de los descansos que se utilizarán.

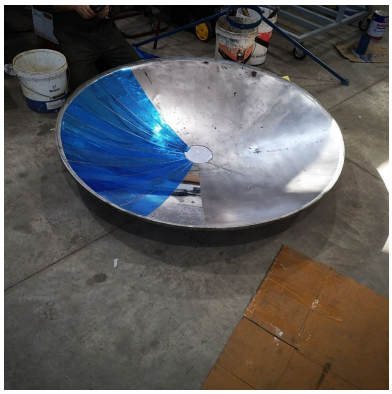
Finalmente, se fabricaron los soportes del espejo a partir de un ángulo de medidas 50 [mm] x 50 [mm] x 4 [mm], cortados a 40[mm] y mecanizados de forma que exista una ranura en el centro para posicionar un perno hexagonal de 3/8 [in] de diámetro y permitir cambiar la posición de estos deslizando las piezas. Además, el soporte superior cuenta con 2 ranuras en la otra cara del perfil tipo ángulo, permitiendo el acople de estas 2 piezas. Para asegurar la fijación de estos soportes con el espejo parabólico se cortaron pedazos de goma de 3 [mm] de espesor y se pegaron a una de las caras de estos utilizando adhesivo de contacto.

El disco parabólico se encontraba deteriorado, por lo que se utilizó una pulidora y pasta de pulir para intentar mejorar su calidad superficial, llegando a un resultado no tan óptimo como se esperaba, por lo que fue necesario pensar en otra manera de mejorar la reflectividad del espejo. Para esto, se utilizaron pliegos de papel reflectante con adhesivo en su parte posterior, los cuales fueron cortados de acuerdo a la geometría de la parábola en gajos de 10° cada uno, para evitar la formación de burbujas al momento de posicionarlos. Teniendo los trozos de material ya cortados, se marcaron 4 cuadrantes dentro del espejo para utilizar como guía y se comenzó a pegar cada uno de estos utilizando agua con jabón y una espátula para quitar las burbujas y desplazar el fluido.

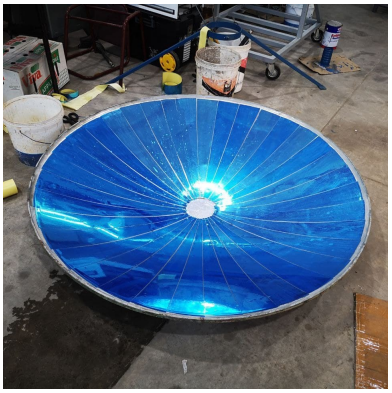
Con el espejo parabólico listo y el octágono junto a los soportes del disco ya mecanizados y pintados, se procedió al montaje de todas las piezas, utilizando pernos de cabeza hexagonal de 3/8 [in] de diámetro junto a sus respectivas golillas y tuercas.



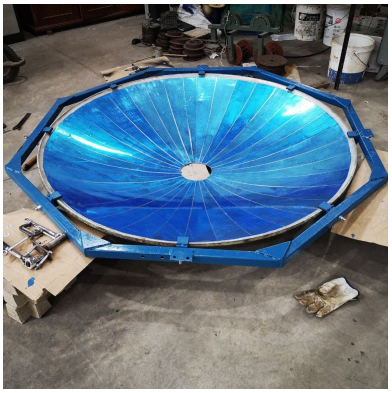
(a) *Prueba de piezas*



(b) *Proceso de pegado film reflectante*



(c) *Disco cubierto de material reflectante*



(d) *Disco posicionado y fijado dentro del octágono*

Figura 4.8: *Proceso de fabricación estructura de soporte concentrador*

Para terminar con la barandilla, se fabricaron piezas de 1.000 [mm] de largo hechas a partir de pletinas de 50 [mm] de ancho x 3 [mm] de espesor, a las cuales se les hicieron 4 agujeros y fueron soldadas a cada uno de los pilares verticales de las barandas. Se utilizó un cable de acero de 1/8 [in] recubierto con PVC, el cual se fue pasando por cada uno de los agujeros hasta lograr generar una barrera de seguridad. Teniendo los cables ya en posición, se utilizó una eslinga con sistema de carga ratchet para realizar la tensión de estos. Para evitar que el cable de acero sufriera algún daño en contacto con los soportes al momento de tensar, se imprimieron 6 piezas en 3D y se posicionó cada una de ellas en los lugares en que el cable giraba y formaba un ángulo de 90°.

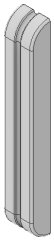


Figura 4.9: *Soporte cableado*

Antes de subir la estructura de soporte del concentrador, se ensamblaron todas las piezas probadas anteriormente de modo que sea más fácil realizar el montaje sobre la base y evitar trabajar en altura. De esta manera, el conjunto 3.6 se deslizó por sobre 2 vigas de roble apoyadas en la base para ubicarla sobre las planchas de acero diamantado. Utilizando un trípode construido a partir de 3 perfiles cuadráticos de 50 [mm] x 50 [mm] x 2,5 [mm] de 6 [m] de largo y un tecle de cadena manual ubicado en la parte superior de este, se realizó el izaje del conjunto del espejo parabólico posicionándolo en la parte frontal de la base. Posteriormente, se acoplaron estos 2 conjuntos insertando los ejes dentro de los descansos y fijando estos a los soportes verticales. Finalmente, pivoteando y empujando la estructura se logró posicionar de manera vertical en el lugar planificado, y utilizando 4 hilos roscados de 3/8 [in] con sus respectivas golillas y tuercas se fijó a las planchas de acero diamantado para restringir su movimiento.



(a) *Izaje de soporte concentrador* ***(b)*** *Armado de trípode*

Figura 4.10: *Izaje de estructuras*



(a) *Izaje conjunto de disco parabólico* ***(b)*** *Posicionamiento final de la estructura*

Figura 4.11: *Izaje de octágono y posición final*

Para evitar que los ejes pudiesen deslizar dentro del descanso y dotar de una mayor rigidez al concentrador, se fabricó el conjunto 3.11 soldando perfiles tipo C de medida 50 [mm] x 25 [mm] x 2.5 [mm]. Luego, se posicionó dentro de los soportes verticales y se fijó utilizando 4 pernos de cabeza hexagonal de 3/8 [in].



Figura 4.12: *Estructura de soporte superior*

Se fijaron 2 pernos de tipo ojo cerrado en las partes superior e inferior del octágono, fijando a cada uno de ellos un cable de acero recubierto de pvc de 1/8 [in]. Luego, se amarró una roldana doble a una de las diagonales que sostienen la baranda y se pasó cada uno de los segmentos de cable por su respectiva rueda acanalada, posicionando al final de éstos un tensor del tipo ojo-gancho que se inserta en su extremo a una guía acoplada a la base. Con este sistema de fijación se puede regular el ángulo del concentrador con respecto a la vertical y evita que exista cualquier tipo de movimiento por acción de fuerzas externas.



(a) *Perno ojo superior junto a cable de acero recubierto*



(b) *Perno ojo inferior junto a cable de acero recubierto*



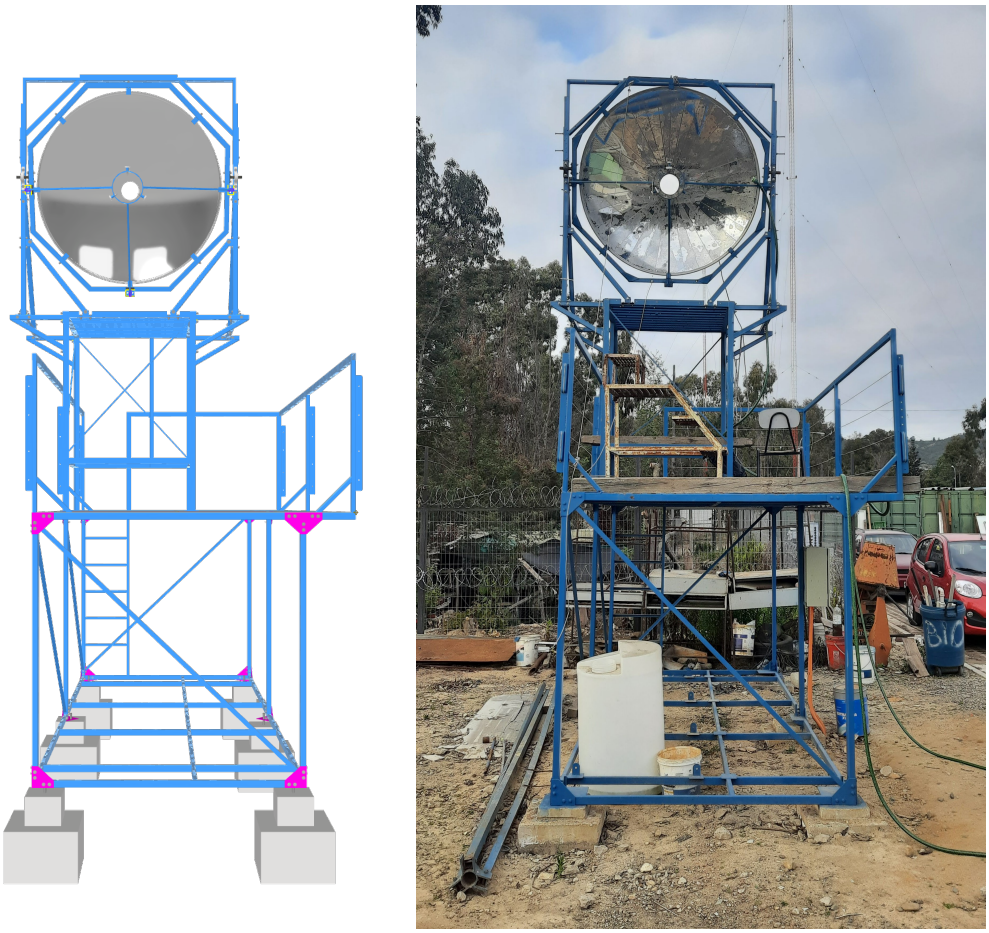
(c) *Guía para posicionar los tensores*



(d) *Roldana doble*

Figura 4.13: *Sistema de regulación de ángulo concentrador*

Finalmente, con todas las piezas y ensambles ya fabricados y posicionados, la estructura se ve de la siguiente manera:



(a) *Diseño final estructura de concentrador solar*

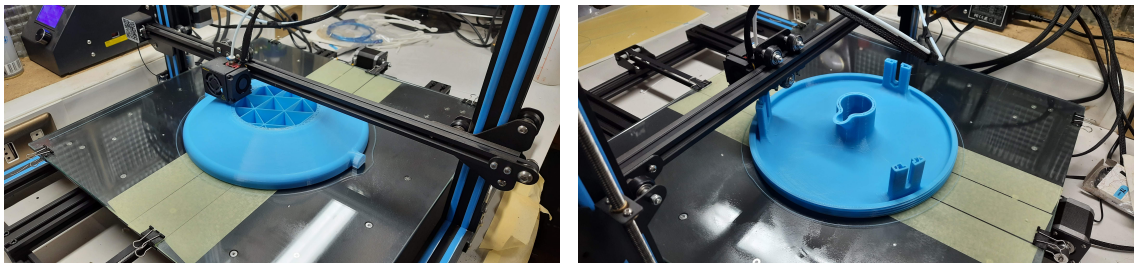
(b) *Construcción real estructura de concentrador solar*

Figura 4.14: *Diseño vs Real*

4.4. Disco hiperbólico

Para construir el disco hiperbólico se utilizaron los modelos 3.25a, 3.26a y 3.27a realizados en el software Autodesk Inventor. Fue necesario exportar las piezas a Autodesk Fusion 360 para realizar las roscas antes de llevarlas a impresión, ya que en Inventor se realizan solo de manera conceptual.

Para imprimir, se utilizó una impresora Crealty CR10-S5 perteneciente a Nicolás Ripoll y filamento de impresión 3D del tipo PLA (ácido poliláctico) de color celeste.



(a) *Impresión del disco* ***(b)*** *Impresión de la carcasa*

Figura 4.15: *Impresión 3D de las piezas*

En 4.15a se pueden observar los soportes en forma de patrón triangular que fue necesario implementar para la impresión del disco hiperbólico.

Teniendo las piezas ya impresas, se retiraron los soportes dentro del disco y se realizó el pulido de las imperfecciones de este utilizando lija de madera grano 120. Para darle un acabado tipo espejo se utilizó papel reflectante, cortándolo en gajos de 15° cada uno para evitar la formación de pliegues al momento de pegarlo a la superficie plástica. De esta manera se obtiene una cara que refleje los rayos que llegan a ella siguiendo la geometría de la hipérbola.



Figura 4.16: *Material reflectante en disco*

Capítulo 5

Puesta en marcha del sistema integrado

Antes de realizar las pruebas correspondientes con el concentrador solar en conjunto con el sistema de seguimiento solar se realizaron distintas tareas de preparación.



Figura 5.1: *Boceto del sistema de concentración solar con sus 3 etapas*

5.1. Posicionamiento de base Heliostato

Dentro del lugar de instalación del campo de concentración solar se encontraba la base de un prototipo de Casa Fénix en desuso, la cual fue trasladada desde su lugar de origen hacia

unos metros más atrás para utilizarla como soporte del heliostato que permitirá realizar las pruebas del campo de concentración. Se soldaron 2 perfiles de medidas 50 [mm] x 30 [mm] x 2 [mm] a dos de las vigas de la base para posteriormente soldar una plancha de acero sobre estos. De esta manera se consigue una base firme para posicionar la base del sistema de seguimiento solar.

Posteriormente se realizó la limpieza de la pintura antigua y se aplicó anticorrosivo de terminación azul a todo el esqueleto metálico. Finalmente, se realizó la nivelación de la estructura utilizando un nivel topográfico, posicionando bloques de adocreto y retazos de acero para dar la altura correspondiente.

Calo



Figura 5.2: *Ubicación anterior y actual de la base*

5.2. Sistema de tensión del heliostato

Para poder mover el espejo respecto a la posición del sol se utiliza un sistema de seguimiento solar, el cual presentaba algunos problemas en la transmisión, ya que no conseguía recorrer la totalidad del rango de movimiento tanto en el eje cenital como en el eje azimutal. Debido a esto, fue necesario diseñar y construir un sistema de tensión en ambos ejes.

Se fabricaron piezas de acero a partir de una plancha de 3 [mm] de espesor, las cuales fueron

cortadas, dobladas, y fijadas tomando en consideración el espacio que hay en la estructura del heliostato para no interferir en su movimiento. Se utilizó un total de 4 resortes, los cuales fueron posicionados en agujeros de 4 [mm] de diámetro previamente perforados, logrando la tensión necesaria para girar dentro de todo su rango de movimiento.



Figura 5.3: *Sistema de tensión heliostato*

5.3. Diseño y construcción de marco para espejo

Para realizar las pruebas de concentración se utiliza un espejo de un 95 % de reflectividad que tiene 2060 [mm] de largo, 1600 [mm] de ancho y un espesor de 4 [mm], por lo que es necesario realizar un marco y un soporte que permita su posicionamiento en el sistema de seguimiento solar.

Para soportar el espejo se decidió utilizar perfiles de aluminio de 40 [mm] x 40 [mm] debido a su facilidad de mecanizado y armado gracias a la gran cantidad de conectores existentes en el mercado.

La geometría del perfil utilizado se muestra a continuación junto a sus medidas más relevantes.

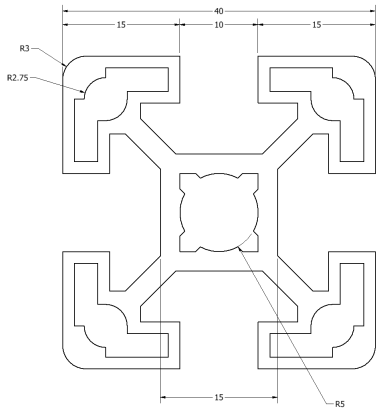


Figura 5.4: *Geometría del perfil de aluminio utilizado*

El marco exterior se diseñó de modo que el espejo quede dentro de la ranura central del perfil, utilizando una goma dura de 3 [mm] de espesor a ambos lados para protegerlo del contacto directo con el aluminio. Para conectar los perfiles verticales y horizontales entre si se fabrican escuadras de 3 [mm] de espesor perforadas con broca de 10 [mm] de modo que quede fijada con 2 pernos en el perfil horizontal y 2 en el vertical. Para posicionarse en el sistema de seguimiento, se creó un cuadrado utilizando pletinas de 50 [mm] x 3 [mm] de espesor soldadas a 4 cuadrados de 100 [mm] x 100 [mm] x 3 [mm], al que se fijaron 8 hilos roscados de 7/16 [in] de diámetro para ser posicionados dentro del soporte. Además, este cuadrilátero posee un total de 16 perforaciones para ser fijado.

Para fijar el soporte al marco se utilizaron 2 perfiles de aluminio de largo igual a 1.655 [mm], posicionados de manera horizontal y fijados utilizando un total de 8 ángulos de 40 [mm] x 40 [mm] x 3 [mm] perforados a 10 [mm] en el centro de sus caras. Además, se utilizaron 2 perfiles posicionados de verticalmente a la altura del cuadrado para dar aún más rigidez a la estructura.

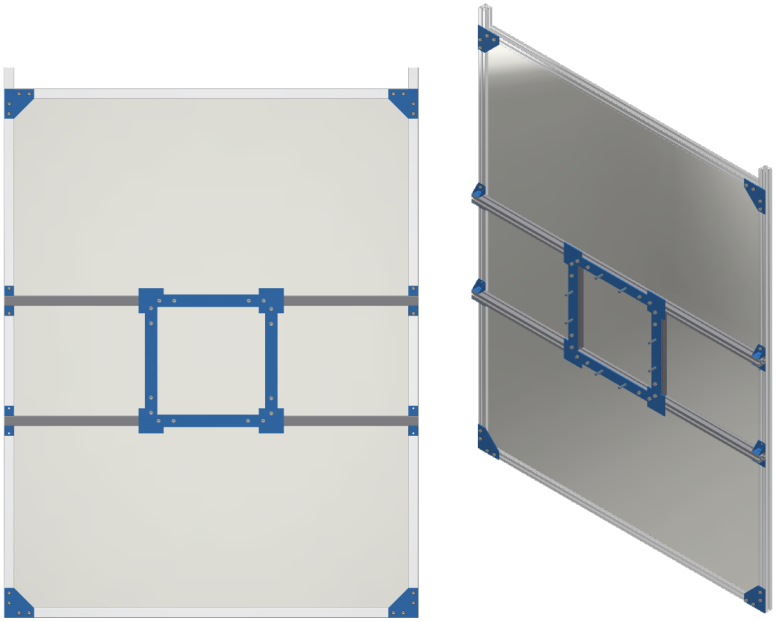
Se utilizaron pernos allen de cabeza cilíndrica de 8 [mm] de diámetro y tuercas de anclaje tipo T para ensamblar todos los acoples a la ranura central de los perfiles de aluminio, utilizando también arandelas planas y de presión. Además, para la parte central del soporte se utilizaron escuadras internas de aluminio.



(a) *Tuerca tipo T* ***(b)*** *Perno Allen* ***(c)*** *Escuadra interna*

Figura 5.5: *Soportes utilizados para el armado del marco del espejo*

Teniendo ya posicionados y fijados todos los elementos, el conjunto se ve de la siguiente manera:



(a) *Vista posterior marco y soporte espejo* ***(b)*** *Marco y soporte espejo*

Figura 5.6: *Conjunto espejo heliostato*

Finalmente, debido a que el espejo quedó posicionado dentro de las ranuras de los perfiles de aluminio, las medidas internas de la superficie real de reflexión son: 2,035 [m] de largo y 1,575 [m] de ancho, obteniendo un área total de reflexión de 3,205 [m^2].



Figura 5.7: *Espejo con sus soportes ya terminados*

5.4. Primera prueba del sistema

La primera prueba del campo de concentración solar se llevó a cabo utilizando un espejo de 0.25 [m^2] montado sobre el sistema se seguimiento solar. Se posicionó el conjunto del disco hiperbólico impreso dentro del aro del trípode para posteriormente fijarlo a una distancia de 100 [mm] desde el vértice hasta el foco de la parábola. Para evitar que el plástico sufra deformaciones térmicas debido a la alta temperatura durante el proceso, se acoplaron mangueras a la entrada y salida del ensamble para refrigerar la cara expuesta a la radiación.

Es necesario regular el ángulo del disco parabólico para lograr que los rayos reflejados desde el espejo lleguen de manera paralela a la dirección del eje, logrando que converjan hacia su foco. Esto se puede realizar utilizando los tensores posicionados en la parte superior e inferior del octágono.

El heliostato se maneja utilizando un controlador bluetooth desde el celular, en donde se pueden cambiar los parámetros de posición del objetivo utilizando los comandos respectivos.

El caudal de refrigeración se estableció en 13 [l/min] y se fijó el sistema de seguimiento

en dirección hacia el disco parabólico, para lograr redirigir los rayos que convergen a su foco hacia el foco posterior del espejo hiperbólico. Esta prueba se realizó durante 10 minutos y se apreció a simple vista una deformación plástica ubicada en la parte superior del disco, que se puede atribuir a 3 factores:

- El ángulo del conjunto parabólico con respecto a la vertical no se definió con anterioridad, por lo que no se logró que los rayos reflejados desde el heliostado convergieran a su foco.
- El sistema de seguimiento del heliostato presentaba errores de desplazamiento tanto en el ángulo cenital como en el azimutal, modificando la posición del foco reflejado desde la parábola.
- Al estar el disco de manera casi vertical, la parte superior de este no logró refrigerarse de manera óptima.



(a) *Deformación en la parte superior del disco* ***(b)*** *Papel reflectante quemado*

Figura 5.8: *Deformaciones en disco hiperbólico*

Debido a los acontecimientos descritos anteriormente, se tomó la decisión de buscar otra manera de construir el disco hiperbólico, ya que ácido poliláctico(temperatura de transición vítrica entre 52 °C y 60 °C, y temperatura de fusión entre 145 °C y 177 °C) y el film reflectante no fueron capaces de resistir las altas temperaturas.

5.5. Construcción de la nueva propuesta

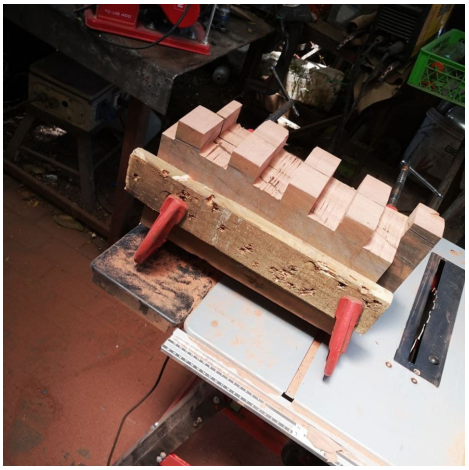
Para la construcción de la nueva propuesta de fabricación del disco hiperbólico se pensó en la idea de utilizar un molde de madera con la geometría superior e inferior del disco y prensar un trozo de acero espejo para obtener la forma deseada. Para esto, se utilizó una viga de madera de roble que se encontraba en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad, cortando 4 trozos de tamaño similar que se encontraban en buenas condiciones. Posterior a esto, se marcó un patrón de dientes en cada uno de los segmentos de viga y utilizando una sierra de banco se realizaron los cortes correspondientes para su posterior ensamble.



(a) *Sierra de banco y trozos de viga*



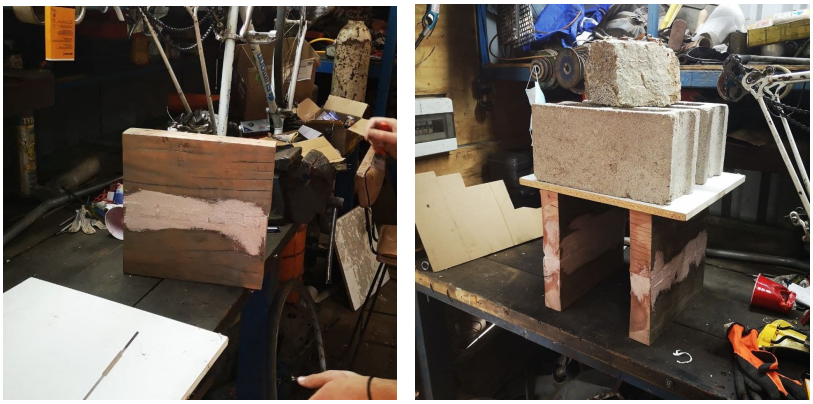
(b) *Corte de dientes*



(c) *Trozos de roble finalizados para su acople*

Figura 5.9: *Mecanizado de madera de roble*

Con los trozos de roble ya mecanizados, se utilizó cola fría de madera para pegar los segmentos.

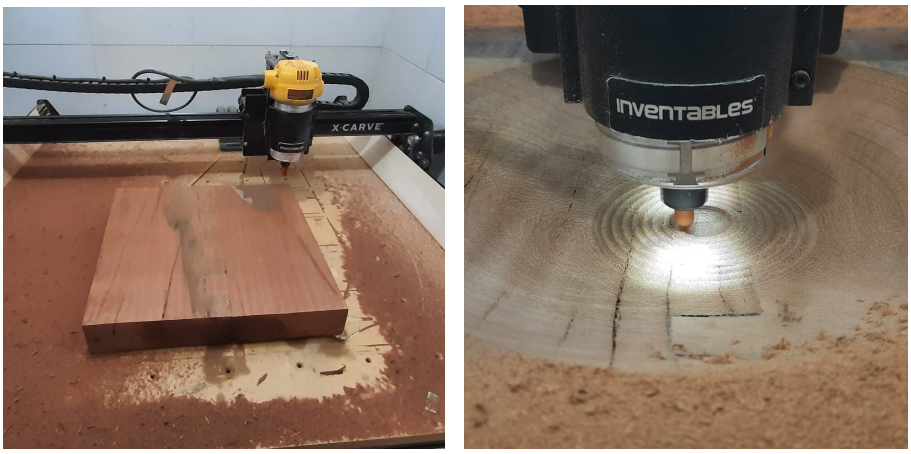


(a) *Pegado de trozos de madera* ***(b)*** *Prensado de piezas*

Figura 5.10: *Proceso de pegado y prensado*

Luego de 24 horas, con el pegamento ya seco y las piezas completamente rígidas, se utilizó un router CNC para madera para realizar el mecanizado de estas. Para definir la ruta de corte se utilizó el programa Autodesk Fusion 360 según el modelo previamente diseñado.

El primer paso fue el planeado de ambas caras de la madera para obtener un buen apoyo al momento de realizar el mecanizado final. Teniendo las 2 superficies ya planas, se realizó el mecanizado de la pieza con la geometría anteriormente definida, obteniendo la cara cóncava del molde. Para la superficie convexa se realizaron los mismos pasos definidos anteriormente.



(a) *Planeado de la madera* ***(b)*** *Router CNC en funcionamiento*

Figura 5.11: *Mecanizado de madera de roble*

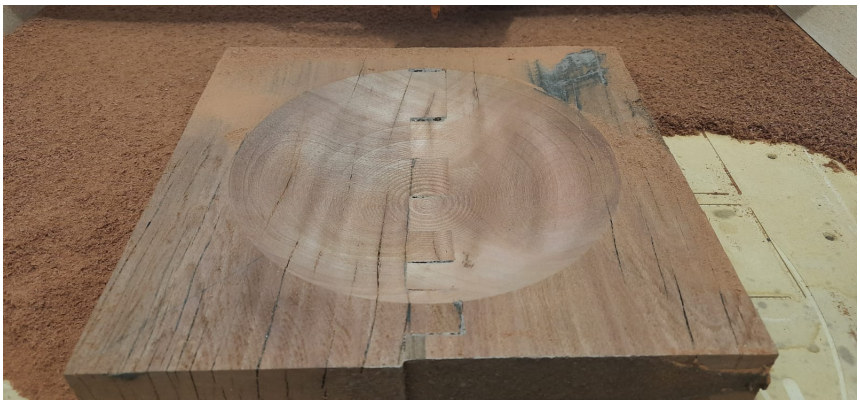


Figura 5.12: *Molde cóncavo terminado*

Para poder prensar el acero espejo entre los moldes ya fabricados, fue necesario diseñar y fabricar 2 soportes de acero para evitar la rotura de la madera. Para esto, se utilizaron planchas de acero de 4[mm] de espesor y perfiles tipo ángulo de 40 [mm] x 40 [mm] x 3 [mm], los cuales fueron cortados y soldados a la base formando una barrera de contención para que la madera no se expanda.

Además, utilizando un perfil cuadrático de 40 [mm] x 40 [mm] x 2 [mm] se fabricó una cruz para posicionarla sobre la parte superior del molde, de modo que la fuerza puntual de la prensa hidráulica se expanda de manera homogénea sobre las piezas.



Figura 5.13: *Cruz y soportes de contención para la madera*

Con los 2 moldes de madera mecanizados de acuerdo a la ecuación de la hipérbola definida en puntos anteriores y con los soportes de contención ya fabricados, se realizó el proceso de prensado del acero espejo utilizando una prensa hidráulica ubicada en el domicilio de Nicolás Ripoll. Para evitar daños en la superficie del acero espejo y facilitar el desplazamiento de este dentro de los moldes de roble se utilizó vaselina, la cual fue esparcida de manera generosa sobre la madera.

Al realizar el primer prensado, el resultado fue un disco con protuberancias en el centro, por lo que fue inmediatamente descartado su uso. Para el segundo intento se cortó parte del acero en 4 puntos a 90° de diferencia, para intentar evitar la formación de bultos en el acabado final, obteniendo como resultado un trozo de acero espejo que no era capaz de conservar su forma, por lo que no serviría para acoplar al sistema de seguimiento solar. Finalmente se intentó calentar la superficie del acero para hacerlo maleable, obteniendo el mismo resultado que en los intentos anteriores.



Figura 5.14: *Acero espejo luego del prensado*

Debido a que ninguno de los intentos por construir el disco hiperbólico resultó de manera positiva, las pruebas del sistema solo contemplan la primera etapa de reflexión del sistema.

Capítulo 6

Procedimiento experimental

6.1. Dispositivos de medición

Para evaluar el desempeño del concentrador solar en conjunto con el sistema de seguimiento solar se utilizó una serie de dispositivos de medición capaces de registrar los parámetros necesarios para cuantificar la potencia del sistema.

6.1.1. Calorímetro

Para medir el comportamiento de la temperatura en el foco de la parábola, el alumno Eduardo Figueroa diseñó y construyó un calorímetro de flujo radial entre placas paralelas que utiliza una placa de cobre como receptor de la radiación, capaz de registrar la temperatura en un total de 13 puntos utilizando termopares tipo K ubicados dentro del sistema. Estos son capaces de registrar temperaturas entre -200 °C y 1200 °C.

De los puntos de medición mencionados anteriormente, 11 se encuentran en la superficie interior de la placa de cobre, 1 en la entrada del agua y 1 en la salida del agua. Para nuestro análisis solo se tomarán en cuenta 2 de estos termopares. De esta manera se podrá cuantificar la potencia del sistema con los valores obtenidos.

Para registrar los valores de temperatura, los termopares se conectan a un datalogger, el cual genera una base de datos con los parámetros obtenidos a una frecuencia de 2 segundos.



(a) *Calorímetro de flujo radial* ***(b)*** *Posicionamiento del calorímetro*

Figura 6.1: *Calorímetro y su posicionamiento*

6.1.2. Sensor de flujo de agua

Para la medición del caudal de agua que ingresa al calorímetro se utilizó un sensor de flujo de agua marca YF-S201 conectado mediante un arduino, el cual va directamente enlazado al computador para la obtención de datos. La red de agua utilizada se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Energías Renovables, por lo que el valor del caudal puede verse afectado por el uso de agua dentro del recinto (Lavamanos, WC, estanques, riego, etc.).

6.1.3. Piranómetro

Se utilizó un piranómetro modelo CMP10 de la marca KIP ZONEN para registrar la radiación global dentro del recinto. Se ubicó sobre un mueble fuera de las oficinas del Laboratorio de Energías Renovables conectado a un datalogger marca OMEGA modelo OM-DAQ-USB-2400SERIES, enlazado a uno de los computadores de escritorio pertenecientes al LER.



Figura 6.2: *Piranómetro utilizado.*

6.2. Procedimiento experimental

Para la realización de las pruebas de concentración solar se debe contar con un equipo de mínimo 2 personas. La primera se debe encargar del chequeo del posicionamiento del heliostato, además de regular el caudal de agua en caso de necesitarse. La segunda persona debe encargarse de tomar los datos en tiempo real y verificar en todo momento si se está concentrando la radiación en el punto requerido.

Pasos a seguir para la preparación del sistema y posterior toma de datos:

1. Posicionar y conectar el piranómetro para comenzar a tomar los datos de radiación local.
2. Verificar el ángulo de inclinación del disco parabólico con respecto al eje vertical (11°)
3. Montar el calorímetro dentro del aro del octágono, preocupándose que quede ubicado a la distancia del foco.
4. Concetar mangueras del calorímetro a la red de agua de entrada y la salida al estanque de recepción, además de conectar las termocuplas al datalogger y este al PC.
5. Verificar que los datos que se están registrando sean verídicos.
6. Montar el marco del espejo a utilizar sobre el soporte del heliostato. Posteriormente fijarlo utilizando las arandelas y tuercas correspondientes.

7. Enchufar y prender el sistema de seguimiento solar esperando que realice la calibración inicial.

8. Abrir el paso del agua hacia el calorímetro y verificar que no existan fugas en las conexiones del sistema. Posteriormente fijar el caudal de entrada a un valor cercano a los 5 [l/min]

9. Iniciar la toma de datos en el PC y verificar nuevamente que todos los datos registrados no presenten variaciones significativas.

10. Abrir el controlador bluetooth desde el celular y conectarlo al sistema de seguimiento. Direccionar el espejo en dirección al concentrador.

11. Realizar la toma de datos por 10 minutos y revisar constantemente la posición del espejo. En caso de variar mucho la posición de este, se debe volver a apuntar hacia el centro de la parábola.

12. Pasados los 10 minutos, retirar el reflejo del espejo hacia fuera del concentrador y esperar a que la placa de cobre disminuya su temperatura a un valor cercano a 20°C.

13. Cerrar la llave de agua y drenar el calorímetro. Realizar una rotación de 90° en sentido horario para comenzar una nueva medición.

14. Repetir los pasos 8, 9, 10, 11, 12 y 13 hasta un total de 4 mediciones (Rotación completa del equipo)

15. Desplazar el calorímetro en dirección del eje focal para alejarlo de la parábola según la distancia establecida y repetir los pasos 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

16. Terminada la toma de datos, desconectar las mangueras de agua del calorímetro y los sistemas de registro de información.

17. Desconectar y guardar el piranómetro terminada la jornada.

18. Soltar el conjunto del espejo de la base del heliostato para posteriormente guardarlo en un lugar seguro.

19. Desconectar el sistema de seguimiento solar asegurándose de cubrir las conexiones eléctricas y electrónicas con una capa de material impermeable.

Capítulo 7

Presentación y análisis de resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en las mediciones realizadas durante el mes de diciembre de 2021. En el primer análisis se procesan los datos obtenidos por el piranómetro y se grafica el comportamiento de la irradiancia del sistema a través del tiempo. El segundo muestra el comportamiento de las variables más significativas del sistema (Temperatura, caudal, potencia, irradiancia) a través de un período de tiempo reducido (período de entre 5 a 10 minutos).

Las pruebas realizadas se separaron en 3 grupos de experimentos, alejando en cada uno de estos el calorímetro del punto focal del espejo parabólico. De esta manera fue posible obtener todos los datos necesarios para el desarrollo de la memoria de Eduardo Figueroa y además validar el funcionamiento del sistema de concentración solar.

- **Distancia del calorímetro al foco de la parábola igual a 0 [mm]:** Se posiciona el calorímetro al mismo nivel que el foco, realizando un total de 4 mediciones girando el dispositivo en 90° al terminar cada una de estas.
- **Distancia del calorímetro al foco de la parábola igual a 8,6 [mm]:** Se posiciona el calorímetro a una distancia de 8,6 [mm] alejado del foco, realizando un total de 4 mediciones girando el dispositivo en 90° al terminar cada una de estas.
- **Distancia del calorímetro al foco de la parábola igual a 20,8 [mm]:** Se posiciona el calorímetro a 20,8 [mm] de distancia alejado del punto focal, realizando un total de 4

mediciones girando el dispositivo en 90° al terminar cada una de estas.

Los registros obtenidos fueron procesados a través del software Microsoft Excel, recopilando los datos de cada uno de los dispositivos utilizados durante las mediciones y ordenándolos con respecto a su hora de medición.

Para realizar los gráficos que se mostrarán a continuación se utilizó el software OriginPro 2017.

7.1. Irradiancia en el lugar de trabajo

En los siguientes gráficos se muestra el comportamiento de la irradiancia global del sistema durante los días en que se realizaron las mediciones del sistema de concentración solar.

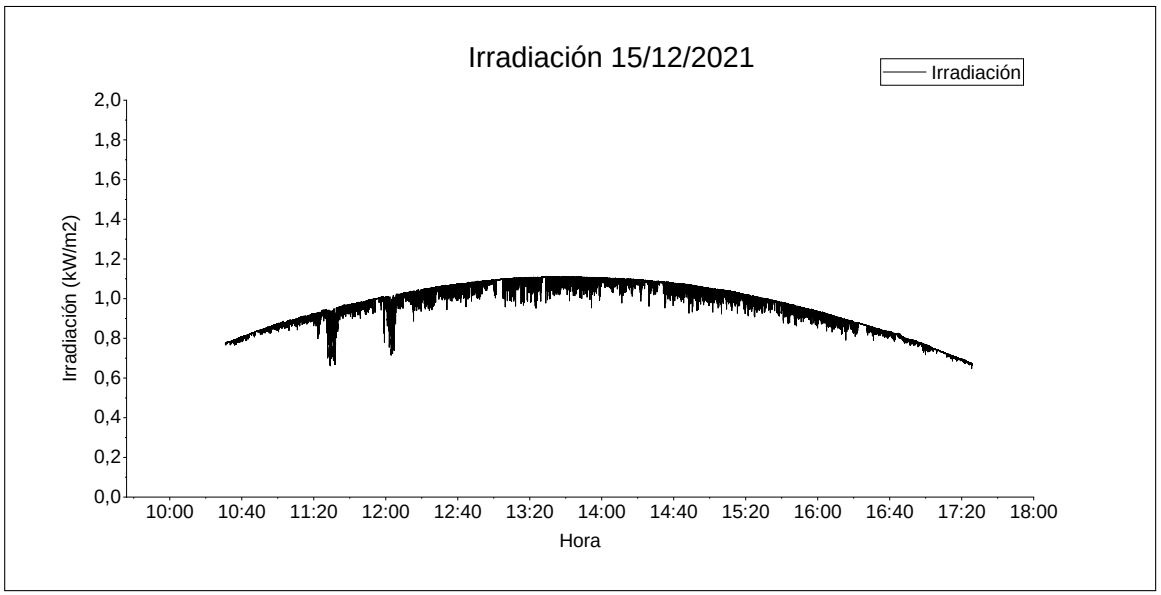


Figura 7.1: *Irradiancia global a través del tiempo el día 15 de Diciembre de 2021*

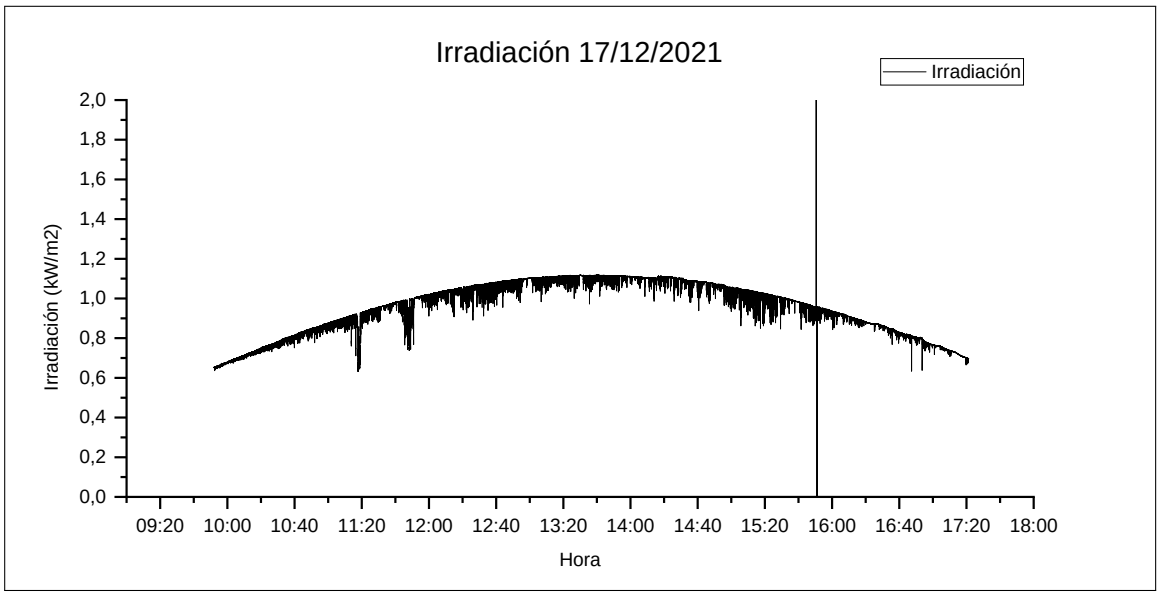


Figura 7.2: *Irradiancia global a través del tiempo el día 17 de Diciembre de 2021*

Se puede observar que la gráfica se comporta como una parábola, obteniendo su valor máximo entre las 13:10 y las 13:40 horas. La irradiancia máxima que se obtiene corresponde a 1.120 $[W/m^2]$. Los datos del calorímetro se obtuvieron dentro de un rango de tiempo entre las 12:30 y las 17:20, por lo que los valores de irradiancia global varían de manera significativa dentro de este período.

7.2. Temperatura, potencia y caudal a través del tiempo

Para cuantificar la potencia térmica dentro del sistema de concentración se utiliza la siguiente expresión de balance de energía:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f C_p (T_{in} - T_{out})$$

En donde $\dot{Q}$ corresponde a la potencia térmica instantánea del sistema, $\dot{m}_f$ el flujo másico de agua, C_p el calor específico del agua a presión constante, T_{in} temperatura de entrada del agua y T_{out} temperatura de salida del agua.

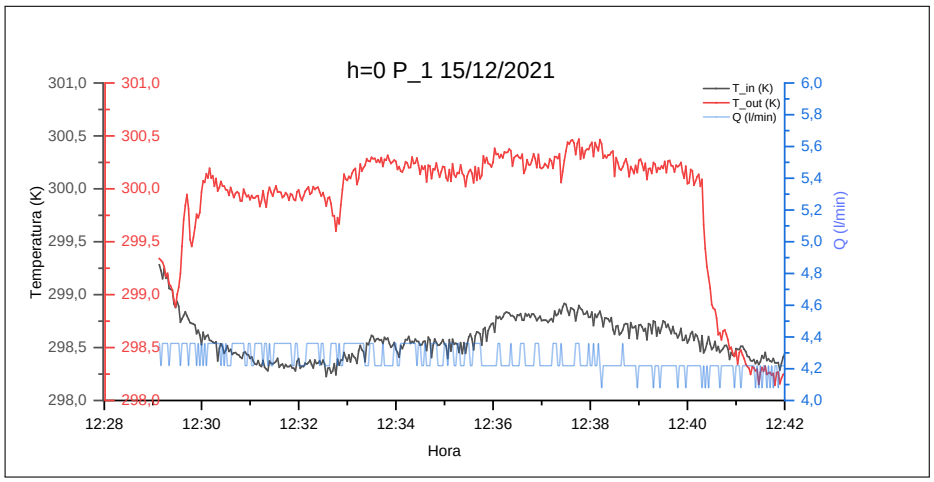


Figura 7.3: *Temperatura y caudal en h=0 posición 1 a través del tiempo.*

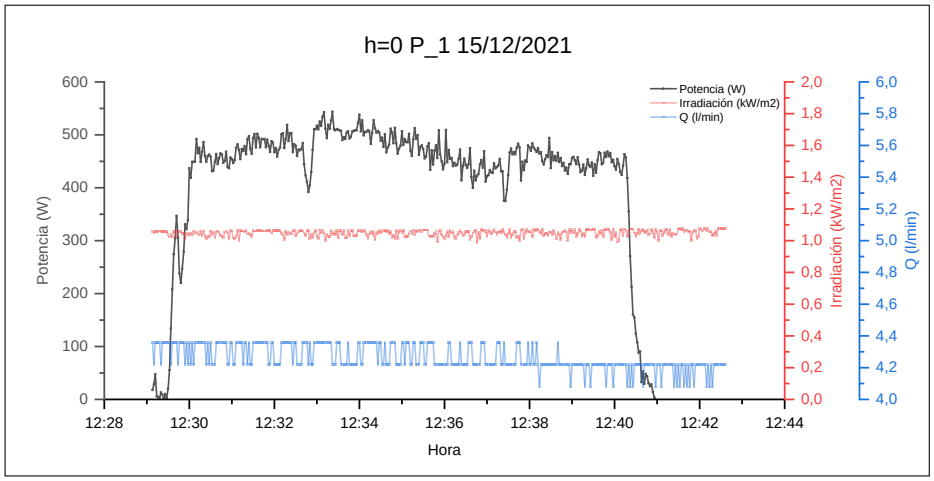


Figura 7.4: *Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 1 a través del tiempo.*

Este registro se realizó entre las 12:29 y las 12:42 del día 15 de diciembre de 2021. Se definió un caudal de 4,2 [l/min] para esta medición, el cual varía en ±0,2 [l/min]. Se puede observar que tanto la temperatura en la entrada como en la salida de agua se equilibra al comienzo y al final de la medición. Al apuntar el heliostato al concentrador se produce de manera casi inmediata un aumento de temperatura en la salida de agua, promediando 300,3 [K], mientras que la entrada de agua presenta un valor promedio de 298,8 [K]. La potencia térmica del sistema varía entre los 400 [W] y 550 [W] durante esta medición, mientras que la irradiancia se mantiene cercana a los 1.050 $[W/m^2]$.

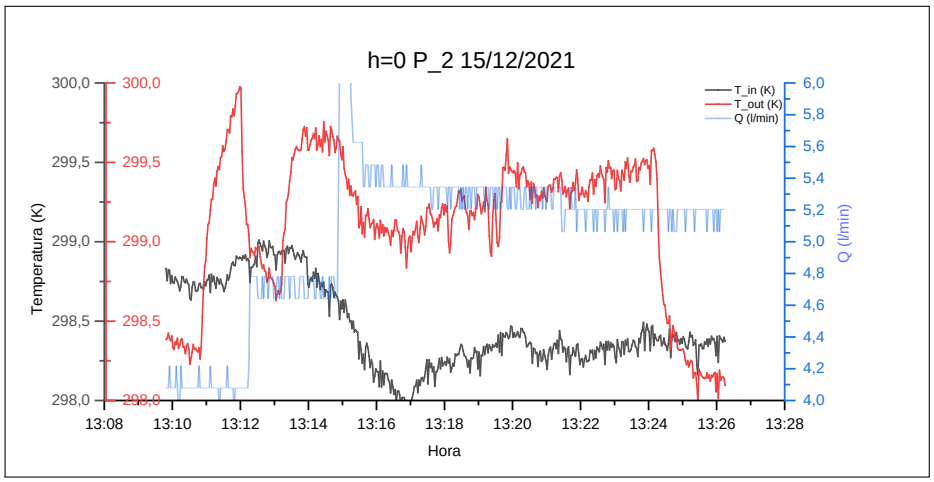


Figura 7.5: *Temperatura y caudal en h=0 posición 2 a través del tiempo.*

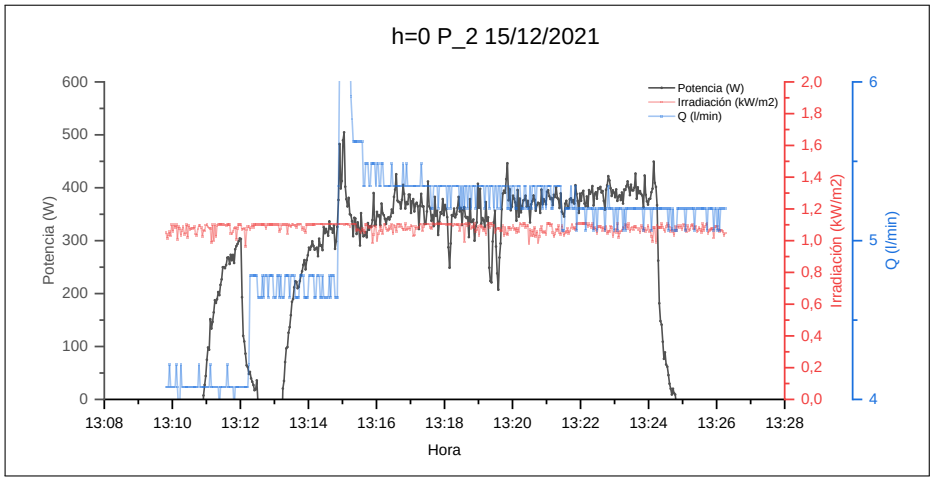


Figura 7.6: *Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 2 a través del tiempo.*

Este registro se realizó entre las 13:10 y las 13:26 del día 15 de diciembre de 2021. Se definió un caudal de 5,2 [l/min], pero como se puede observar en los gráficos, existe una gran variabilidad en este parámetro, esto se debe a la gran dificultad que existe al regular el flujo de agua del sistema. Debido a esto, los valores de temperatura y potencia presentan el mismo comportamiento. La irradiancia se mantiene cercana a los 1.100 $[W/m^2]$ y la potencia varía entre 300 [W] y 500 [W], con un valor promedio de 380[W].

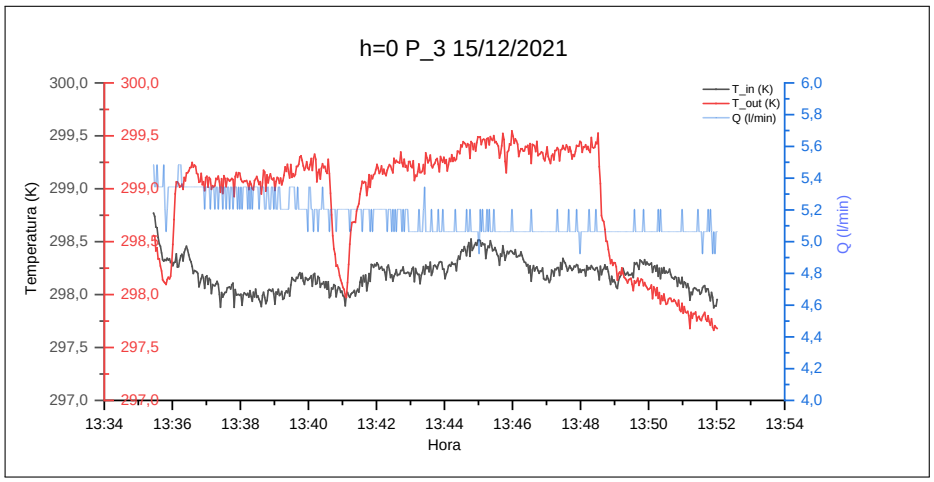


Figura 7.7: *Temperatura y caudal en h=0 posición 3 a través del tiempo.*

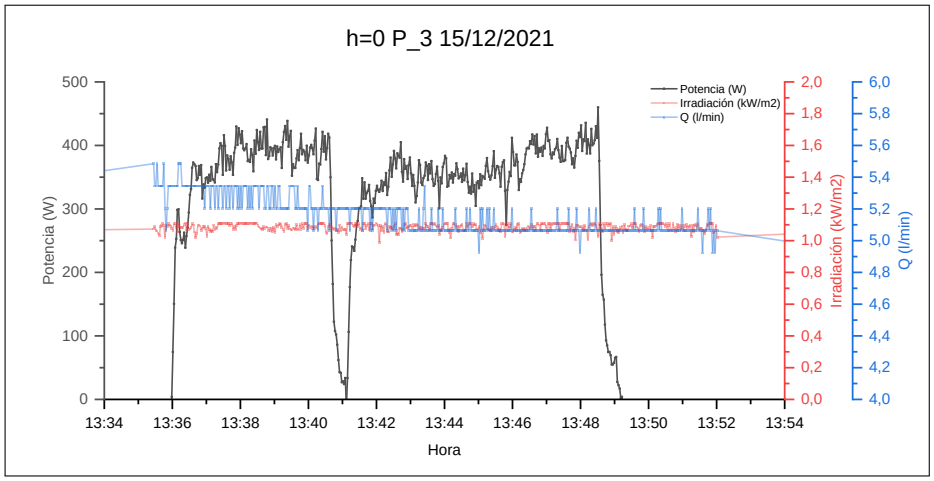


Figura 7.8: *Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 3 a través del tiempo.*

Este registro se realizó entre las 13:35 y las 13:52 del día 15 de diciembre de 2021. Se definió un caudal de 5,2 [l/min] de agua y se observó un valor de irradiancia global entre 1.040 $[W/m^2]$ y 1.110 $[W/m^2]$. Se observa que al posicionar la imágen del heliostato sobre el concentrador se produce el aumento de la temperatura de salida del agua (13:36 horas). Además, se observa una disminución de la temperatura de salida de agua a las 13:40 horas, y por consiguiente, una disminución en la potencia del sistema. Esto se debe a un error en el manejo del dispositivo de seguimiento, en donde se apuntó el reflejo del heliostato hacia fuera del concentrador. La temperatura de salida del agua alcanza valores entre los 299 [K] y 299,5 [K], y la potencia térmica del sistema promedia los 360[W].

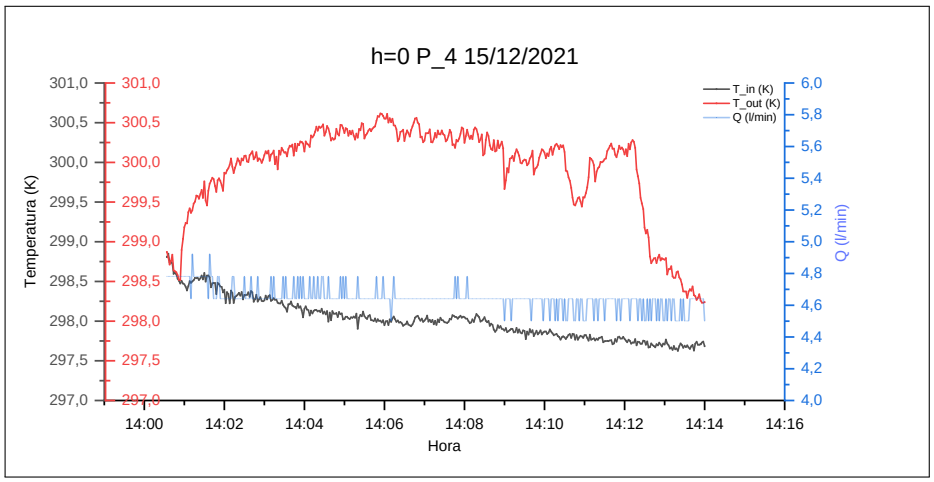


Figura 7.9: *Temperatura y caudal en h=0 posición 4 a través del tiempo.*

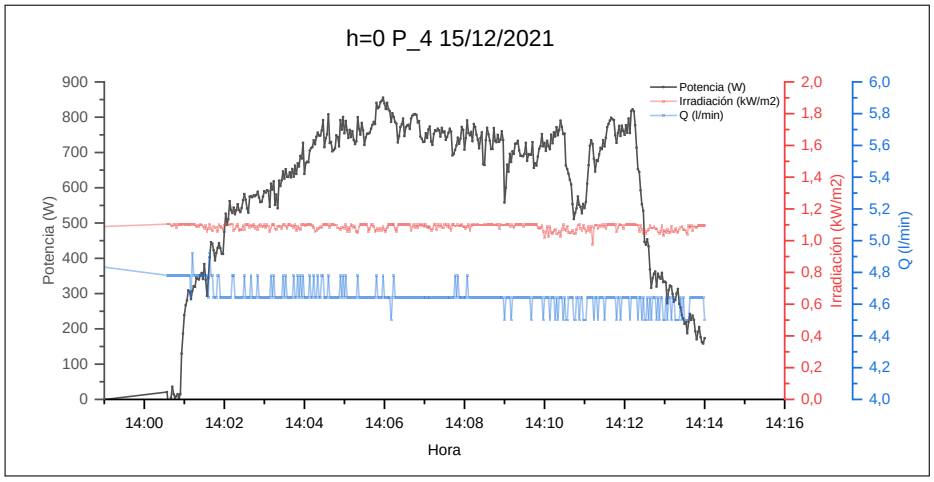


Figura 7.10: *Potencia, irradiancia y caudal en h=0 posición 4 a través del tiempo.*

Estos datos se registraron el día 15 de diciembre de 2021 entre las 14:00 y las 14:14, y corresponden a la posición 4 del registro h=0. Se definió un caudal promedio de 4,6 [l/min] y se obtuvo un valor de irradiancia global promedio de 1.088 $[W/m^2]$. Se puede apreciar una gran variabilidad en los valores de temperatura de salida del agua y la potencia, esto se debe a que el sistema de seguimiento del heliostato presentaba problemas en su movimiento y se debía posicionar de manera manual durante el período de toma de datos. Se puede observar que la potencia del sistema presenta valores superiores a las mediciones realizadas anteriormente, siendo su valor máximo cercano a los 800 [W].

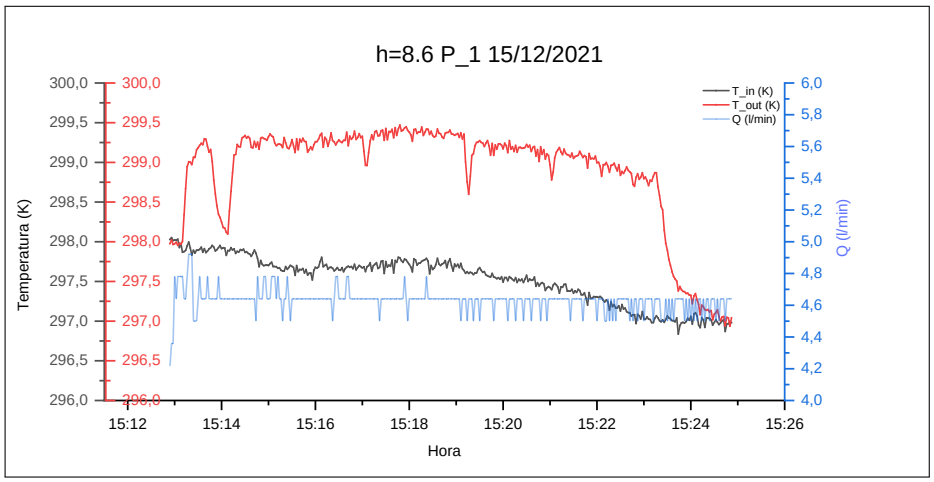


Figura 7.11: *Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 1 a través del tiempo.*

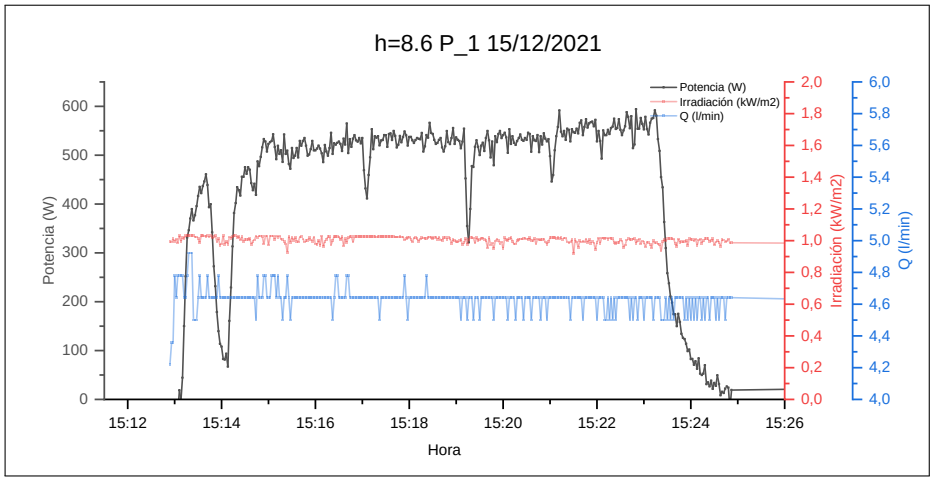


Figura 7.12: *Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 1 a través del tiempo.*

Los datos fueron registrados el día 15 de diciembre de 2021, en donde el caudal se estableció en 4,6 [l/min]. Se puede apreciar el aumento instantáneo en la temperatura de salida de agua y en la potencia a las 15:13 horas, además de una disminución de estos parámetro 1 minuto después debido a que la imágen del heliostato salió completamente del área del concentrador parabólico. A medida que avanza el tiempo se pueden observar disminuciones de la potencia térmica del sistema causadas por el error humano en el movimiento del espejo. En este período de tiempo, la irradiancia global tiene un valor promedio de 1.007 $[W/m^2]$, además de una potencia térmica que varía entre los 500 [W] y 600 [W].

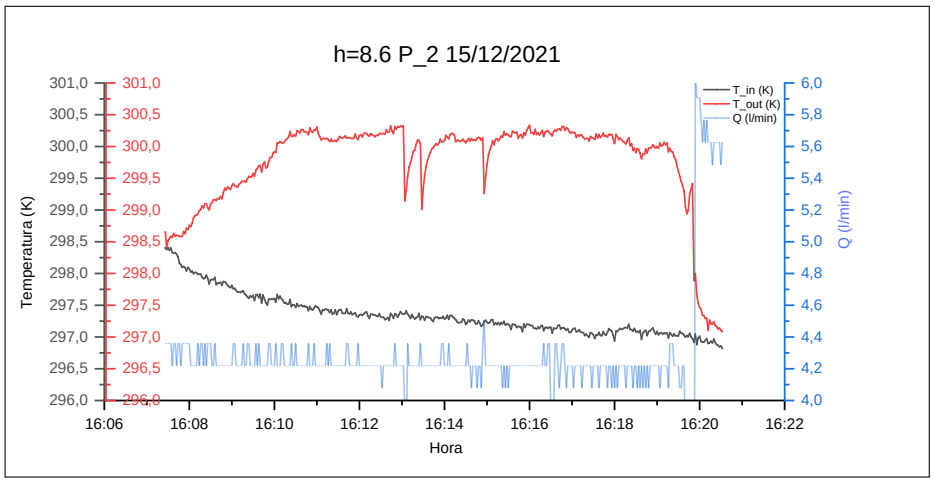


Figura 7.13: *Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 2 a través del tiempo.*

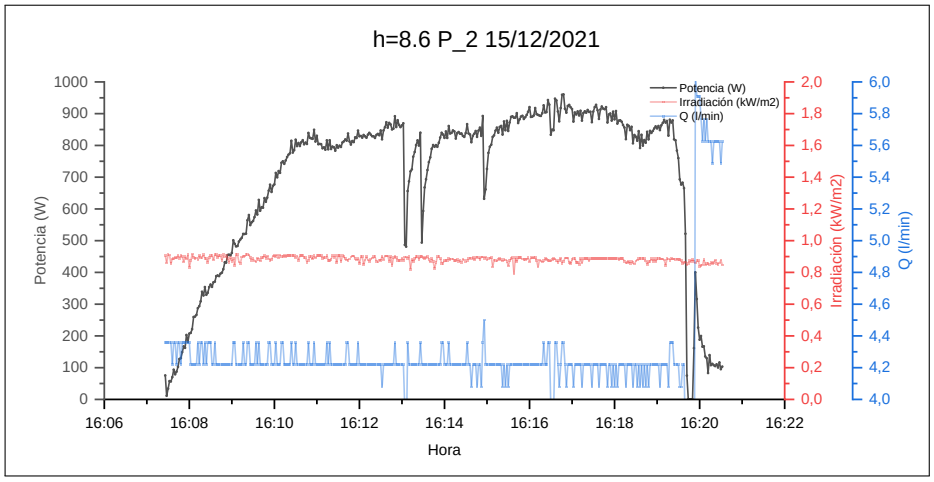


Figura 7.14: *Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 2 a través del tiempo.*

Este registro se realizó el día 15 de diciembre entre las 16:08 y las 16:20. Se definió un valor para el caudal de agua de 4,2 [l/min] y se obtuvo una irradiancia global promedio de 884 $[W/m^2]$. Se observa que al apuntar el heliostado dentro del concentrador parabólico se produce un aumento gradual de la temperatura de salida del agua, completamente distinto al comportamiento observado en las pruebas anteriores, además de un valor mayor de temperatura en este punto, por lo que el problema se le atribuye al termopar encargado de registrar la temperatura a la salida del calorímetro. El sistema alcanza una potencia térmica superior a los 900 [W]. Debido al problema mencionado, fue necesario revisar el termopar de la salida de agua del sistema, por lo que las siguientes pruebas se realizaron en una fecha diferente.

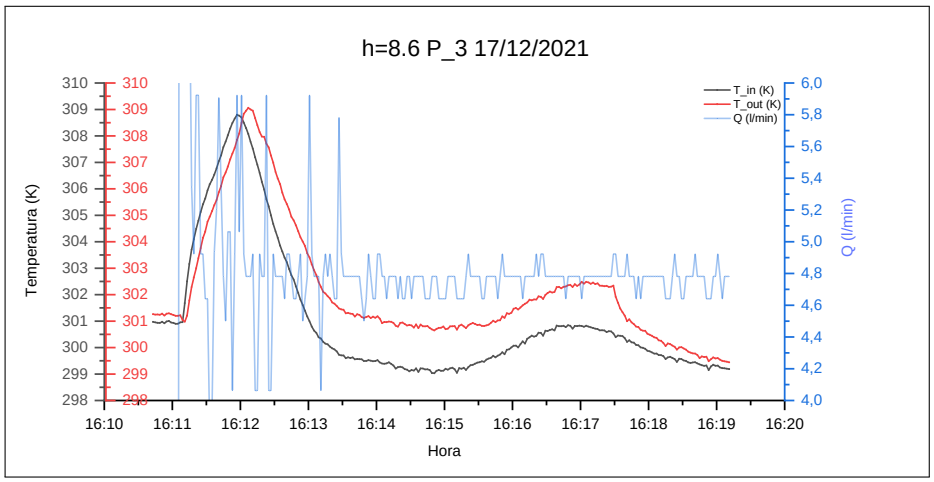


Figura 7.15: *Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 3 a través del tiempo.*

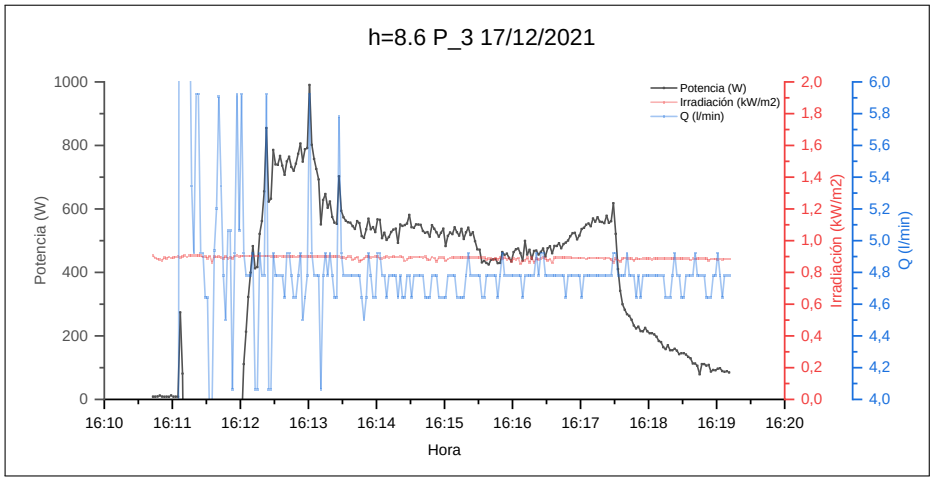


Figura 7.16: *Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 3 a través del tiempo.*

Los datos fueron resigtrados el día 17 de diciembre de 2021, con un caudal que al principio costó regular, pero que después se pudo establecer en 4,8 [l/min]. El aumento de las temperaturas al inicio de las mediciones se deben a que la manguera de entrada de agua se mantuvo en todo momento bajo la acción del sol, por lo que la temperatura del agua que se encontraba dentro de esta provocó que se registrara un aumento en la medición del termopar de entrada y salida de agua durante unos segundos, para luego normalizarse los valores de temperatura. La irradiancia global promedio que se registró fue de 892 $[W/m^2]$ y la potencia térmica se mantuvo en valores cercanos a 500 [W], alcanzando un peak de 1.000 [W] en el tramo inicial.

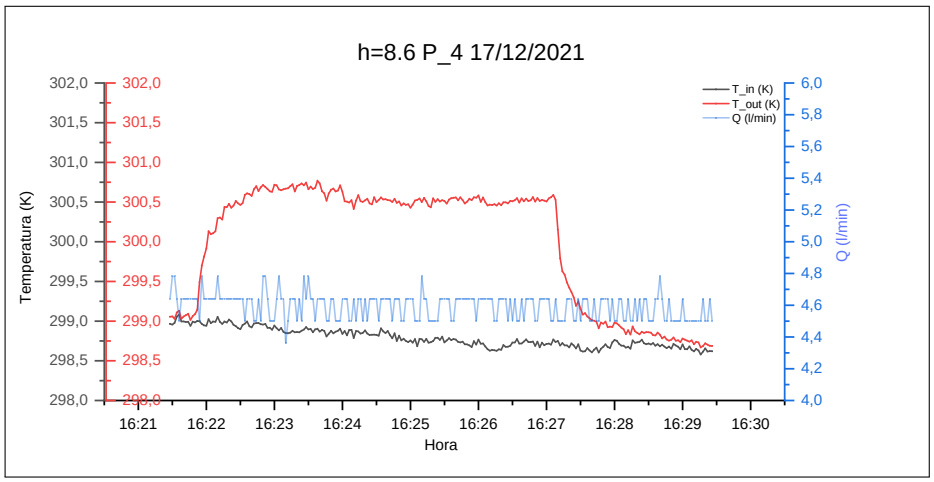


Figura 7.17: *Temperatura y caudal en h=8.6 [mm] posición 4 a través del tiempo.*

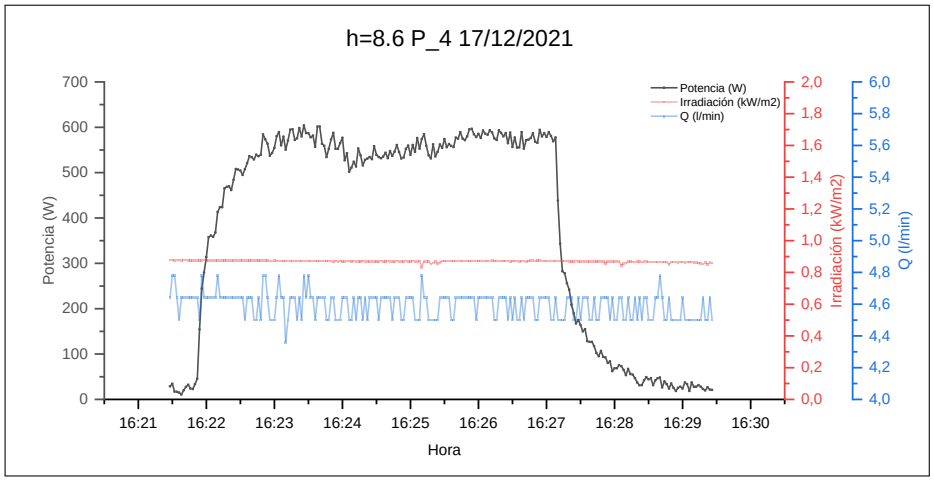


Figura 7.18: *Potencia, irradiancia y caudal en h=8.6 [mm] posición 4 a través del tiempo.*

Estos datos se registraron el día 17 de diciembre de 2021 entre las 16:22 y las 16:30 horas. Se definió un caudal de 4,6 [l/min] y la irradiancia global promedio en el lugar de medición fue de 870 $[W/m^2]$. Se puede apreciar el momento en que se posiciona el reflejo del espejo sobre el concentrador parabólico a las 16:22, debido al aumento casi instantáneo de la temperatura de salida del agua. De la misma manera, se observa el momento en que se retira la imágen del heliostado a las 16:27 horas. La temperatura de salida del agua se mantiene en los 300,5 [K], mientras que la potencia térmica del sistema varía entre 500 [W] y 600 [W]. La disminución de la potencia a las 16:24 horas se debe al error humano que existe al mover el espejo de forma manual durante la toma de datos.

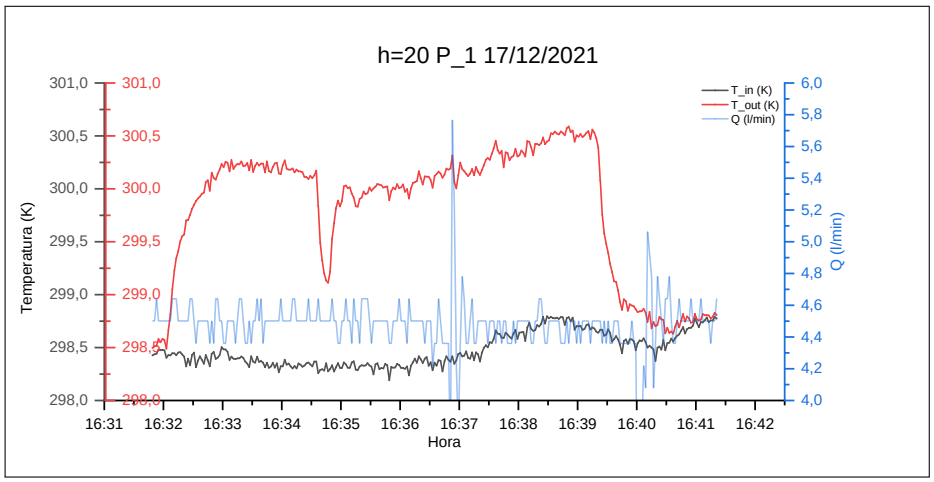


Figura 7.19: *Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 1 a través del tiempo.*

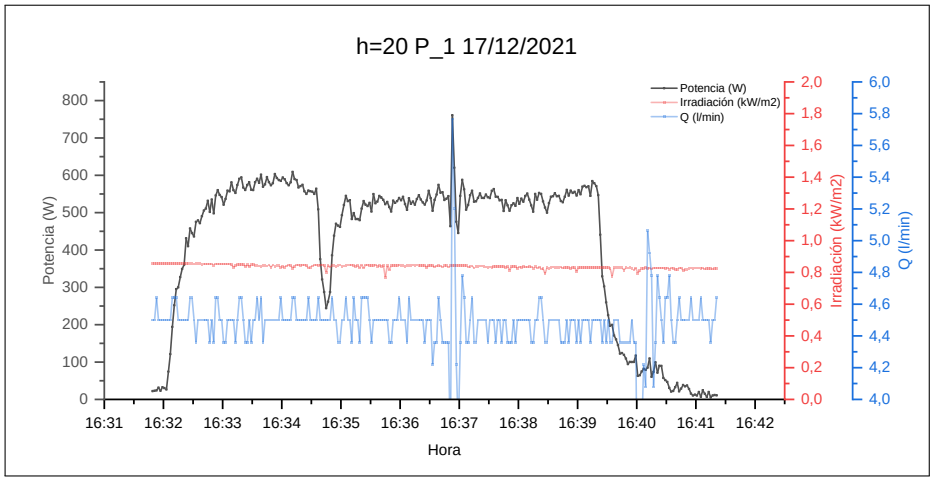


Figura 7.20: *Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 1 a través del tiempo.*

Este registro se realizó el 17 de diciembre de 2021. Se definió un caudal de 4,4 [l/min] y el valor promedio de la irradiancia global obtenida fue de 838 $[W/m^2]$. La temperatura de salida del agua se mantiene sobre los 300 [K] excepto a las 16:34:30, en donde se aprecia la disminución de esta debido a que el sistema de seguimiento dejó de apuntar en dirección al concentrador parabólico. Este error fue rápidamente corregido y se llevó la imágen del heliostato nuevamente al concentrador. A las 16:37 se puede apreciar una variación en el caudal del agua, provocando un aumento instantáneo de la potencia térmica del sistema alcanzando un valor cercano a los 750 [W]. A las 16:39 se mueve la imágen reflejada fuera del concentrador, produciendo una disminución en la temperatura de salida de agua hasta equilibrarse con la de entrada.

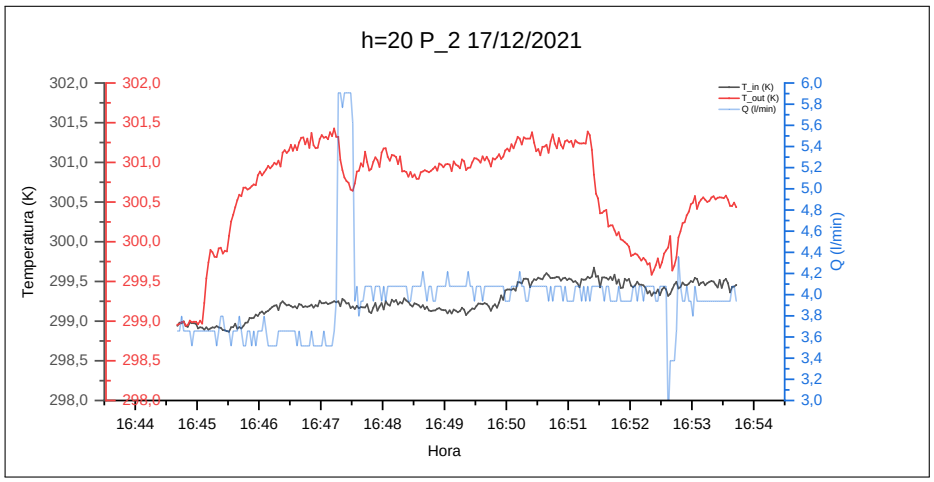


Figura 7.21: *Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 2 a través del tiempo.*

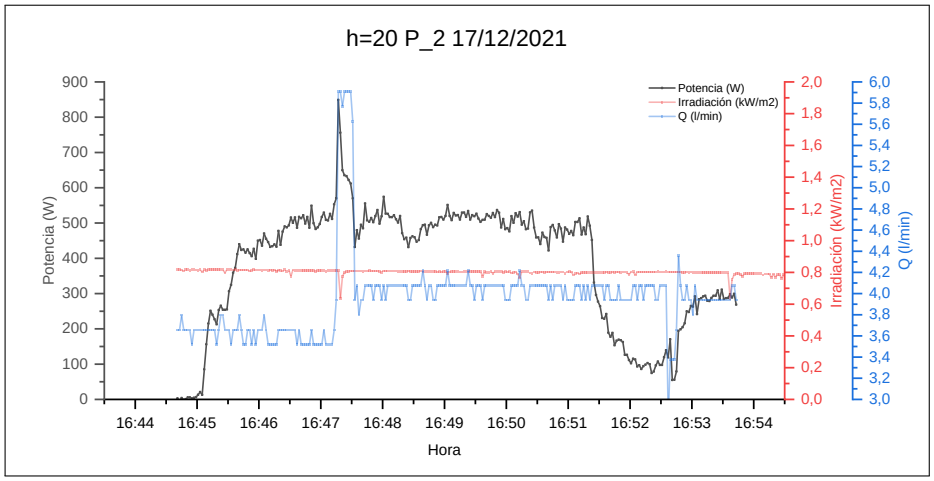


Figura 7.22: *Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 2 a través del tiempo.*

Los datos fueron registrados el 17 de diciembre de 2021 entre las 16:45 y las 16:54 horas. Se definió un caudal de 3,4 [l/min] que luego aumentó a 4 [l/min] y se obtuvo una irradiancia global promedio de 804 $[W/m^2]$. El aumento del caudal fue provocado por un cambio manual en la llave de agua, provocando una disminución en la temperatura de salida en 16:47:30 y el preak de potencia de 850 [W] observado en el gráfico. Durante el período que se estabilizó la curva de potencia térmica del sistema, se alcanzaron valores cercanos a los 500 [W]. Al igual que en los registros anteriores, la gran variabilidad existente en las gráficas se debe al movimiento manual del heliostato.

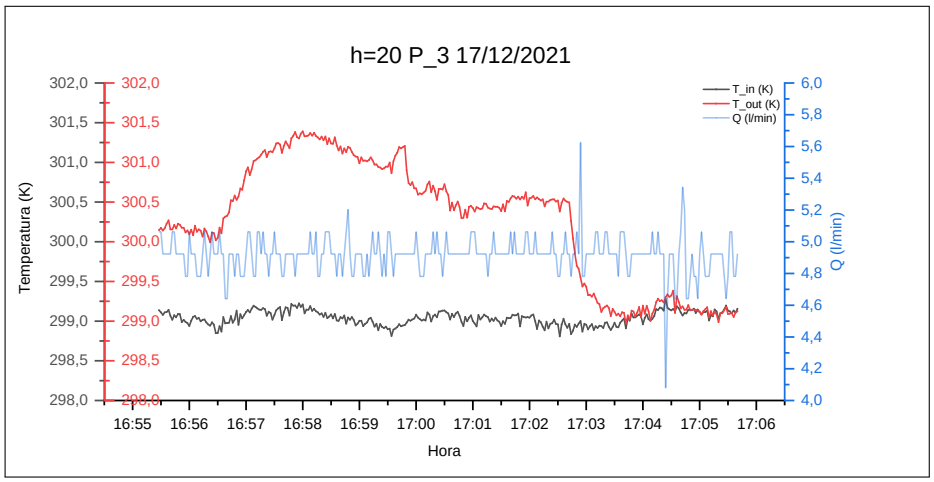


Figura 7.23: *Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 3 a través del tiempo.*

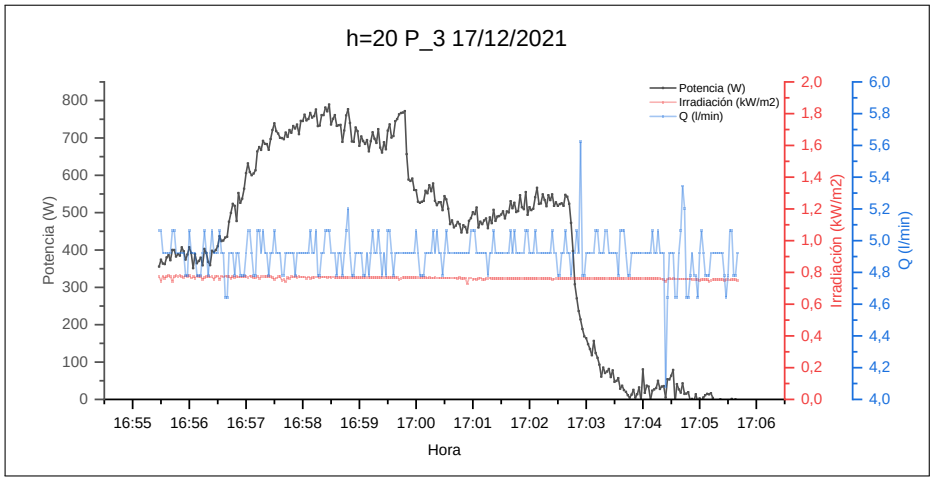


Figura 7.24: *Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 3 a través del tiempo.*

Esta medición se registró el día 17 de dociembre de 2021 entre las 16:56 y las 17:05 horas. Se definió un caudal de 4,9 [l/min] y se obtuvo una irradiancia promedio de 765 $[W/m^2]$ durante este período de tiempo. Se aprecia que al inicio del registro existe una diferencia de temperatura cercana a 1 [K], que crece luego de reflejar la imágen del heliostato hacia el concentrador alcanzando una diferencia de 2,5 [K], la cual provoca el peak de potencia térmica producido a las 16:58:30 aproximadamente. A las 17:01 se logra estabilizar la temperatura registrada por el termopar ubicado a la salida del agua del calorímetro, obteniendo valores de potencia alrededor de los 500 [W]. Al apuntar el reflejo del heliostato hacia fuera del concentrador parabólico, se produce el equilibrio de temperaturas a la entrada y salida del agua, confirmando la hipótesis

de que al inicio de la medición el termopar de salida de agua no registraba los valores reales de temperatura.

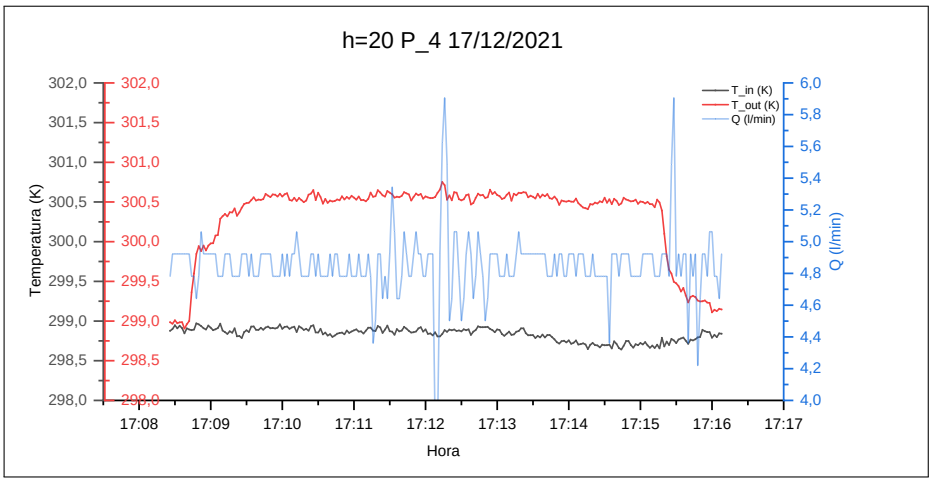


Figura 7.25: *Temperatura y caudal en h=20,8 [mm] posición 4 a través del tiempo.*

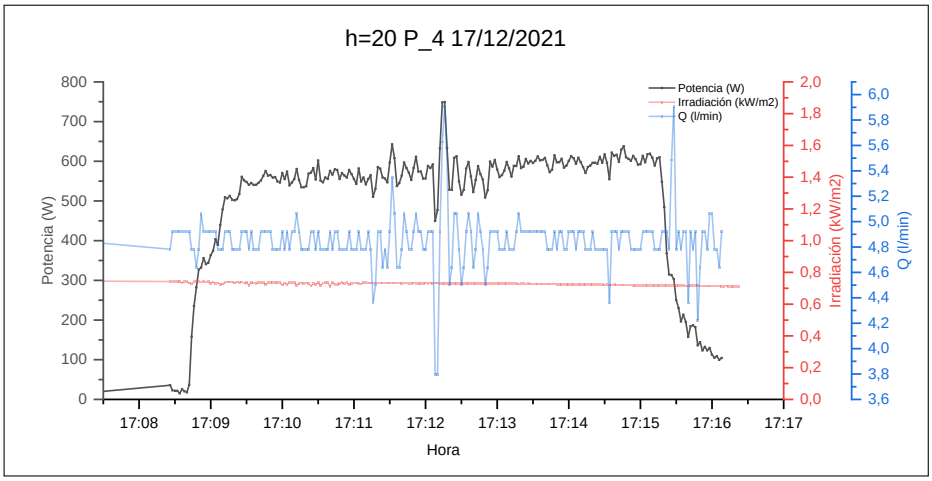


Figura 7.26: *Potencia, irradiancia y caudal en h=20,8 [mm] posición 4 a través del tiempo.*

Estos datos fueron registrados el día 17 de diciembre de 2021 entre las 17:08 y 17:16 horas. Se definió un caudal de 4,8 [l/min] y se obtuvo una irradiancia global promedio de 728 $[W/m^2]$. Se puede apreciar el momento exacto en el que se apunta el heliostato hacia el concentrador solar, produciendo un aumento inmediato en la temperatura de salida del agua al igual que en la potencia térmica del sistema. Entre las 17:11 y las 17:13 se producen cambios considerables en el caudal medido, produciendo variaciones en la potencia térmica instantánea del sistema llegando a un peak de 800 [W]. Durante el resto de tiempo la potencia se encuentra en un

valor cercano a los 600 [W]. La disminución de la temperatura de salida al final del tramo de medición se debe a que en ese instante se dejó de apuntar el heliostato hacia el concentrador parabólico.

7.3. Factores que afectan el rendimiento del sistema

En esta sección se detallarán los factores más importantes que afectan el rendimiento del sistema de concentración solar, reduciendo así los valores de potencia térmica del concentrador parabólico.

7.3.1. Sistema de seguimiento

En las pruebas realizadas para el sistema de concentración solar se observó gran variabilidad en la toma de datos, atribuible principalmente al dispositivo de seguimiento solar. Como primer punto a considerar, la transmisión del heliostato encargado de mover el espejo en dirección azimutal presentó fallas debido a problemas mecánicos entre el motor stepper (Paso a paso) y la caja reductora, impidiendo que el espejo pudiese mantener su posición debido a la acción del viento o de su propio peso.

Un segundo factor que indujo a errores fue el sistema de seguimiento incorporado al heliostato. El código basado en una serie de comandos arduino realizado por un alumno de Ingeniería Civil Electrónica de la Universidad no fue capaz de seguir la trayectoria esperada y fue necesario realizar modificaciones tanto en el eje cenital como azimutal, ya que se perdía el objetivo a medida que avanzaba el tiempo, por lo que en ningún momento se pudo obtener una reflexión que llegara en dirección paralela al eje focal de la parábla, impidiendo que los rayos del sol fueran reflejados al foco en todo momento.

Teniendo este sistema de seguimiento solar incorporado, es imposible realizar pruebas con un disco hiperbólico posicionado delante del concentrador parabólico que cumpla la función de reflejar la radiación hacia la parte posterior del sistema, ya que se requiere gran precisión para esto y los factores descritos anteriormente suponen problemas permanentes para la toma de datos reales.

7.3.2. Imperfecciones geométricas

El disco parabólico utilizado en el sistema de concentración solar fue rescatado del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad, el cual se encontraba abandonado sin ser utilizado mucho tiempo. Durante este período no se le realizó ningún tipo de mantención, además de presentar en varios sectores grandes protuberancias que evitan que la totalidad de los rayos del sol que llegan a él de forma paralela a su eje focal puedan ser redirigidos hacia el foco.

Además, al posicionar el disco parabólico dentro del octágono fabricado y fijarlo, pudo existir una flexión involuntaria de este, produciendo un cambio en la geometría de la parábola.

7.3.3. Imperfecciones ópticas

Debido a que el espejo parabólico utilizado presentaba una calidad superficial deficiente incluso después de realizarle un proceso de pulido, se tomó la decisión de pegar material reflectante en forma de gajos sobre su superficie, manteniendo la geometría deseada y aumentando su reflectividad. Al realizar este procedimiento, gran parte de las secciones de film reflectante presentaron problemas al reaccionar con el material del espejo, reduciendo de manera significativa la reflexión de los rayos del sol que chocan contra la superficie parabólica.

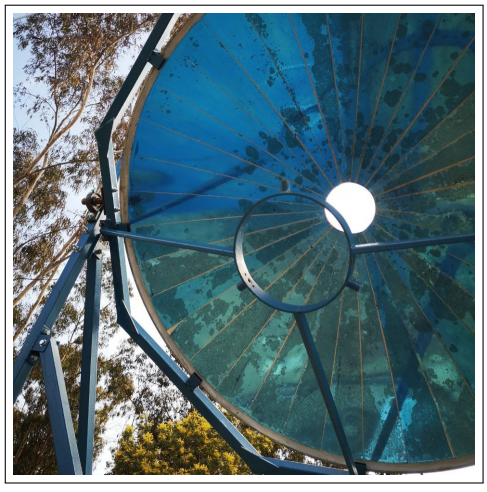


Figura 7.27: *Manchas en la superficie de reflexión debido a reacción del film reflectante con el disco parabólico.*

7.3.4. Factor climático y horario

Como se puede observar en los gráficos de irradiancia en los días que se realizaron las pruebas, este valor varía dependiendo de la hora a la que se realice la medición, afectando directamente el rendimiento del sistema. Entre las 13:00 y las 14:00 es donde el valor de irradiancia global en el lugar de medición alcanza los valores más altos.

El clima también representa un factor a considerar al momento de evaluar la potencia térmica del concentrador solar, ya que si nos encontramos en un ambiente nuboso, parte de esta radiación se refleja en dirección opuesta a las nubes, provocando una disminución en la irradiancia global que llega a la Tierra.

Capítulo 8

Conclusiones

Se logró definir el estado del arte de los tipos de concentradores solares existentes, además de su uso en procesos industriales como el aporte a la desalinización de agua, producción de electricidad a través de un motor stirling y participar en procesos de recuperación de petróleo.

Mediante un software de modelado 3D se diseñó una estructura de soporte para posicionar un concentrador solar de disco parabólico, que a su vez permite acoplar un reactor rotatorio sobre su parte posterior para la obtención de gas de síntesis. A continuación de la etapa de diseño, se construye la estructura utilizando en gran parte materiales reciclados de proyectos anteriores y en desuso que se encontraban en el Laboratorio de Energías Renovables, los cuales fueron mecanizadas para obtener las piezas usadas en el armado del sistema, alcanzando una altura desde la base hasta el centro del disco parabólico de 4,7 [m].

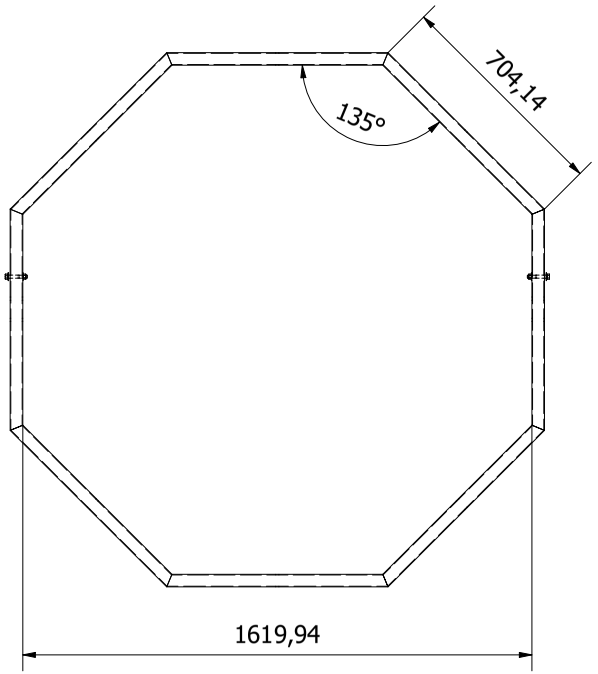
Para evaluar el funcionamiento del concentrador solar, se realizaron pruebas de concentración en conjunto con un heliostato programado para seguir una trayectoria que permita reflejar los rayos del sol en todo momento hacia el espejo parabólico. Fue importante definir una inclinación de 10,5° del disco parabólico con respecto a la vertical antes de poner en funcionamiento el sistema, ya que de esto depende que los rayos reflejados desde el heliostato lleguen en dirección paralela al eje focal de la parábola, permitiendo que converjan al foco de esta.

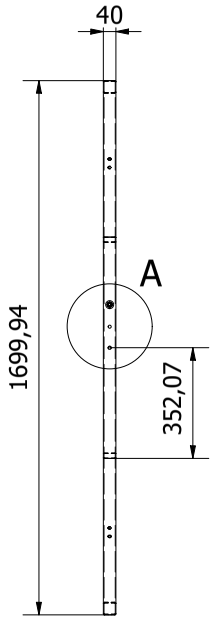
Gracias a la construcción del sistema de concentración solar, y utilizando el prototipo de

heliostato con seguimiento solar en 2 ejes, además de un prototipo de calorímetro de flujo radial entre placas paralelas fue posible obtener un primer acercamiento a la potencia térmica que es capaz de entregar el concentrador, detectando además los factores que afectan de manera negativa al rendimiento de este, siendo el sistema de seguimiento solar el más importante, ya que de la precisión en el movimiento del espejo con respecto al objetivo depende el funcionamiento del sistema cassegrain con el uso de un espejo hiperbólico como segunda fase de concentración. Otro parámetro analizado fue la irradiancia global registrada en el recinto, la cual se comporta, según los datos obtenidos, de acuerdo a una función parabólica, obteniendo sus valores máximos entre las 13:10 y 13:40 horas.

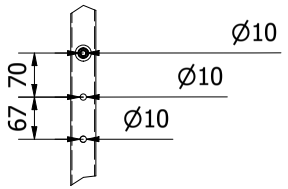
Con respecto a la fabricación de un disco hiperbólico según la geometría propuesta para permitir que la radiación reflejada por el concentrador parabólico se dirija hacia el reactor rotarorio, el material utilizado en la impresión 3D (ácido poliláctico o PLA) no fue capaz de soportar las altas temperaturas cercanas a los 100°C, al igual que el film reflectante utilizado para cubrir el prototipo, ya que presentó notorias quemaduras a minutos de iniciado el ensayo utilizando el máximo caudal de refrigeración posible desde la red de distribución de agua del recinto.

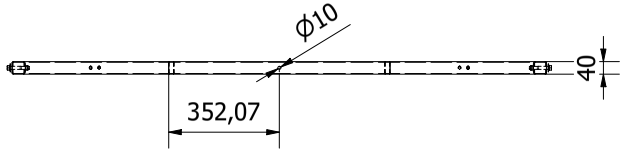
Anexos

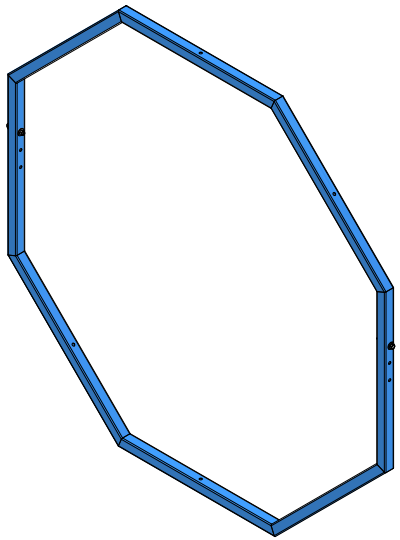




A (1 : 8)

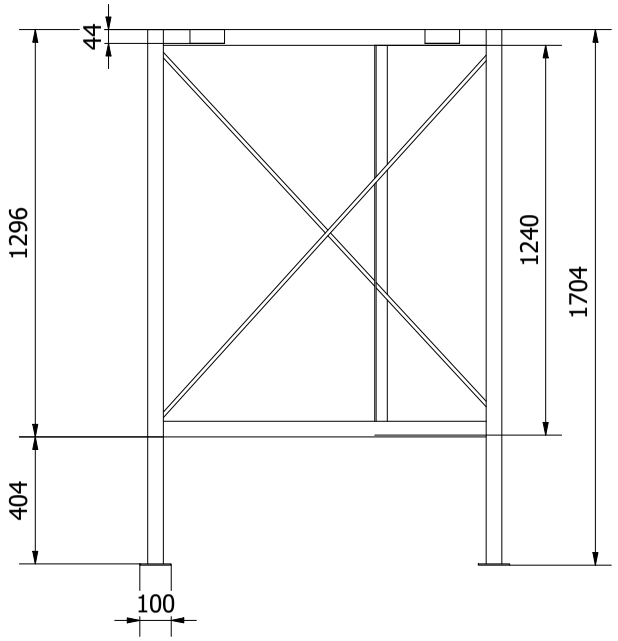


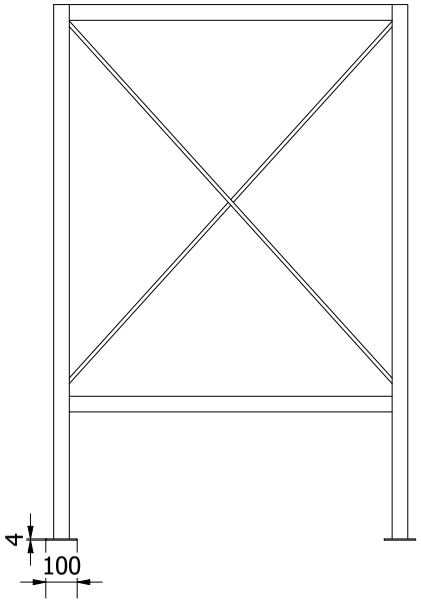


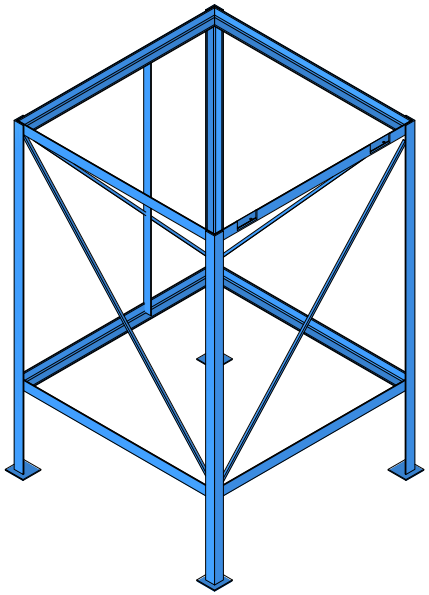


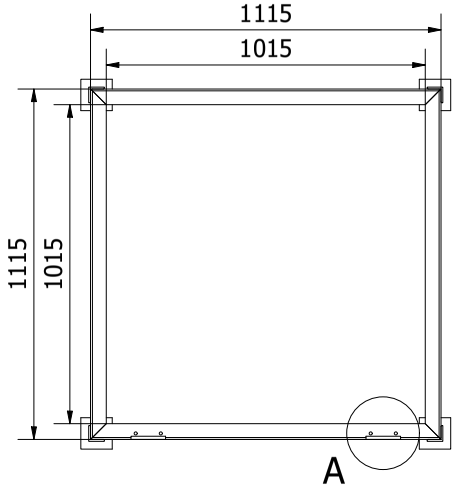
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					01-02-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Octágono		
	Octágono	Escala 1 : 16	Hoja 1 / 1

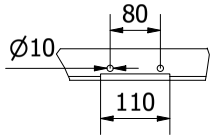






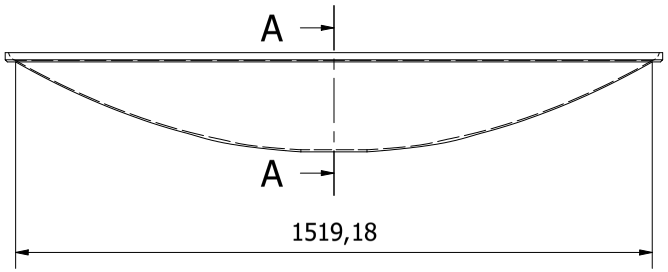


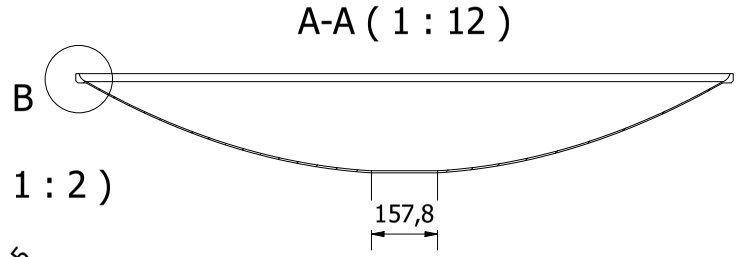
A (1 : 8)

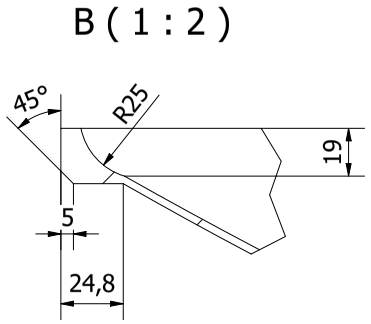


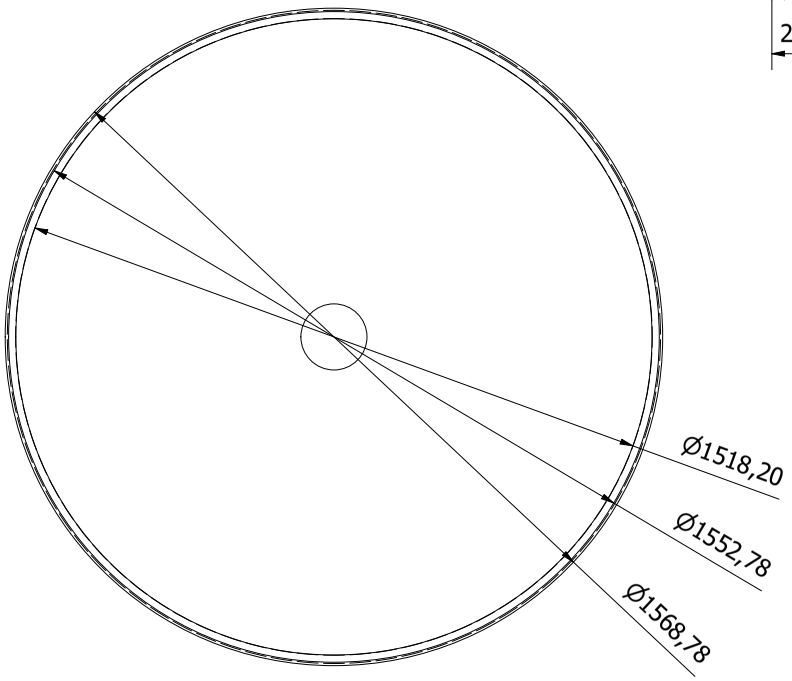
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					01-02-2022	

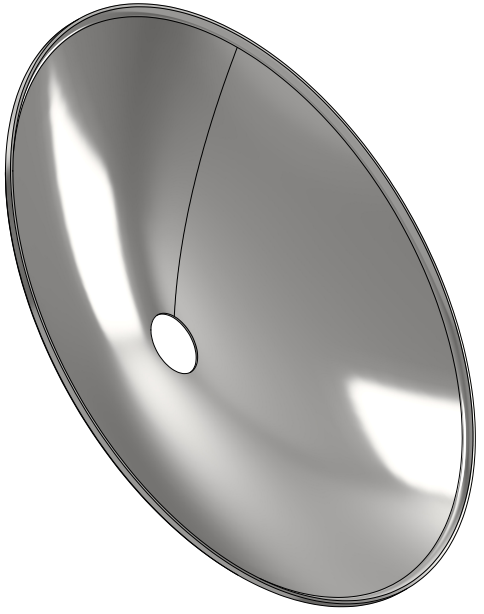
Concentrador solar tipo Cassegrain	Base disco parabólico		
	Base disco parabólico	Escala 1 : 16	Hoja 1 / 1







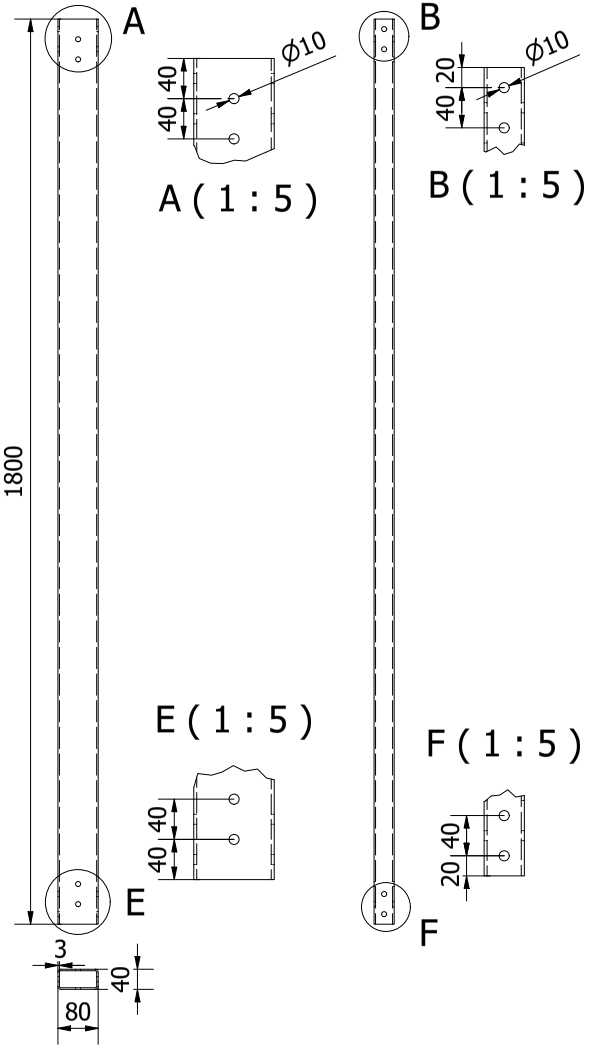




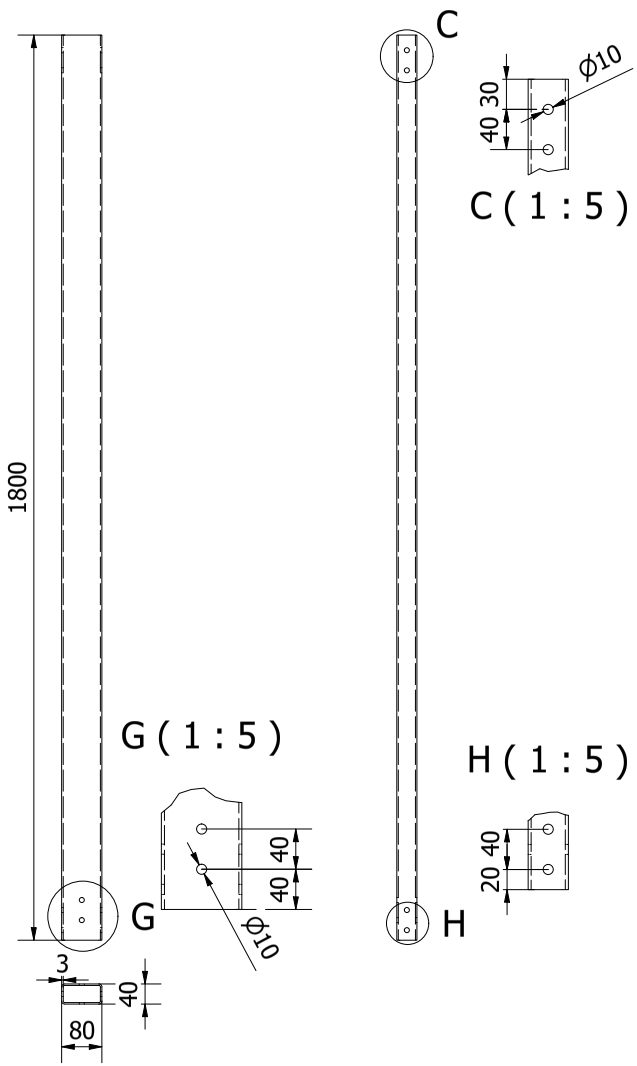
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					01-02-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Disco Parabólico		
	Disco Parabólico	Escala 1 : 12	Hoja 1 / 1

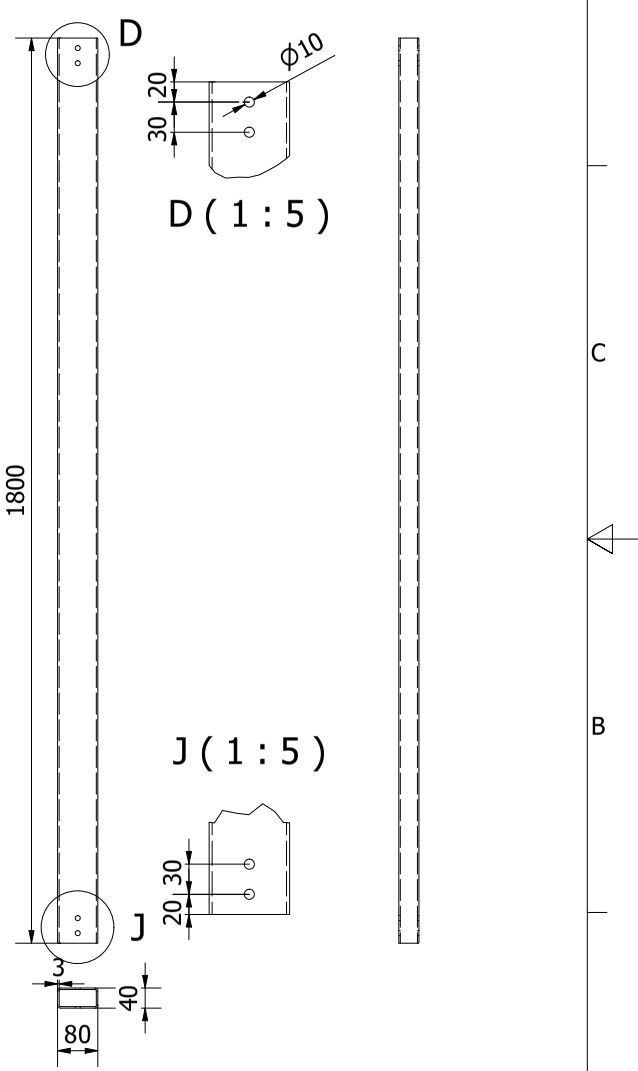
Pilar esquina 1



Pilar esquina 2

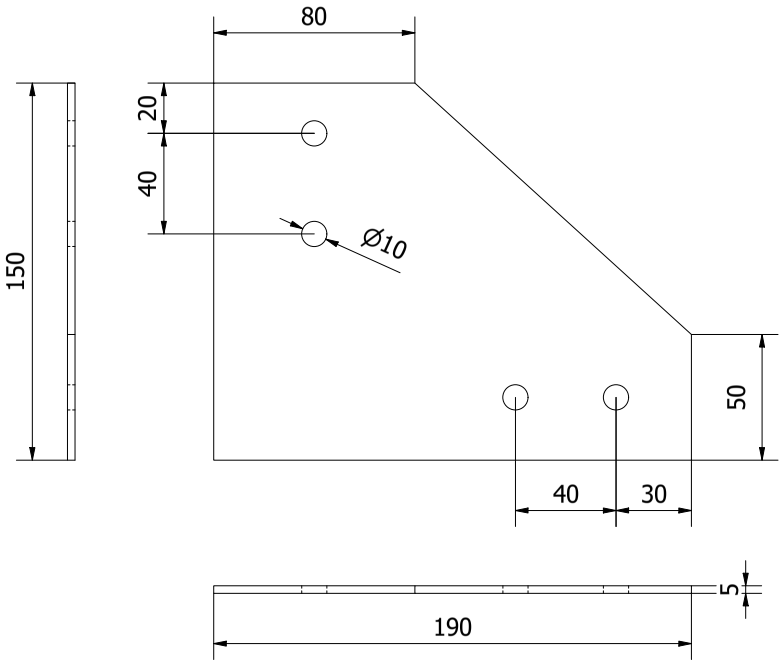


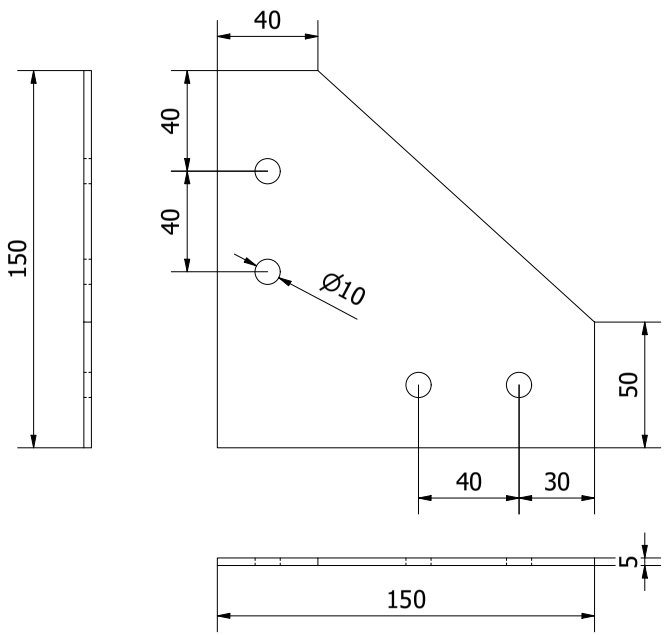
Pilar central

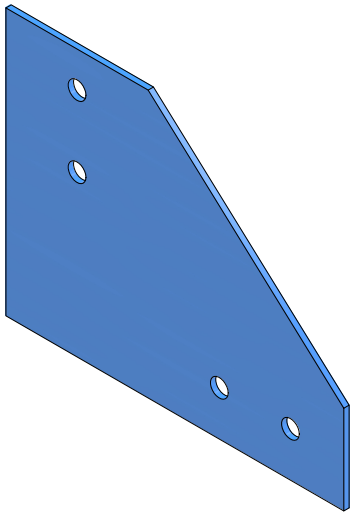


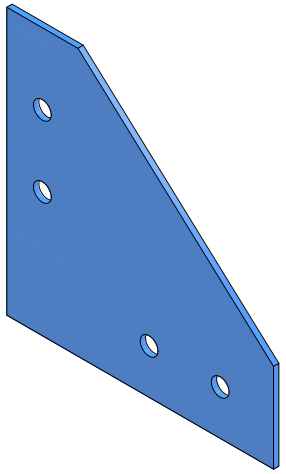
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					15-06-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Pilares verticales		
	Pilares verticales	Escala 1 : 10	Hoja 1 / 1



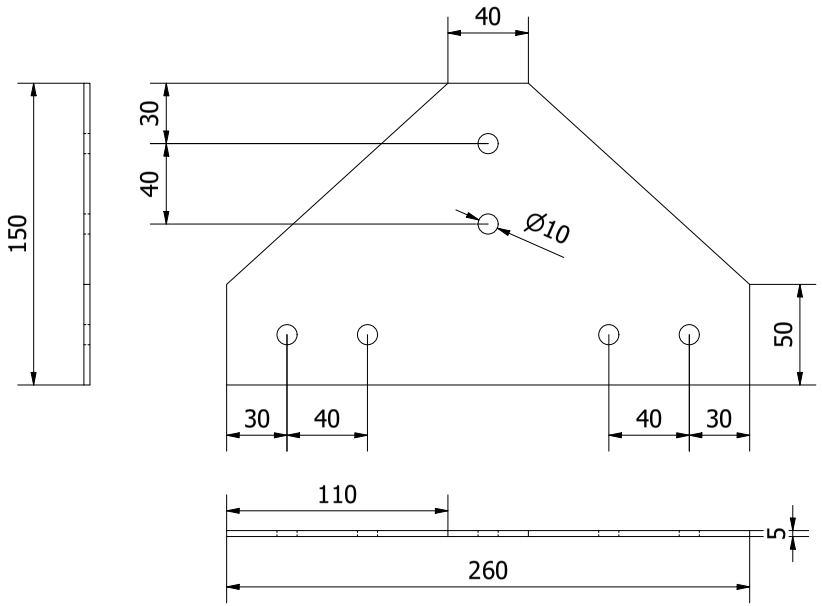


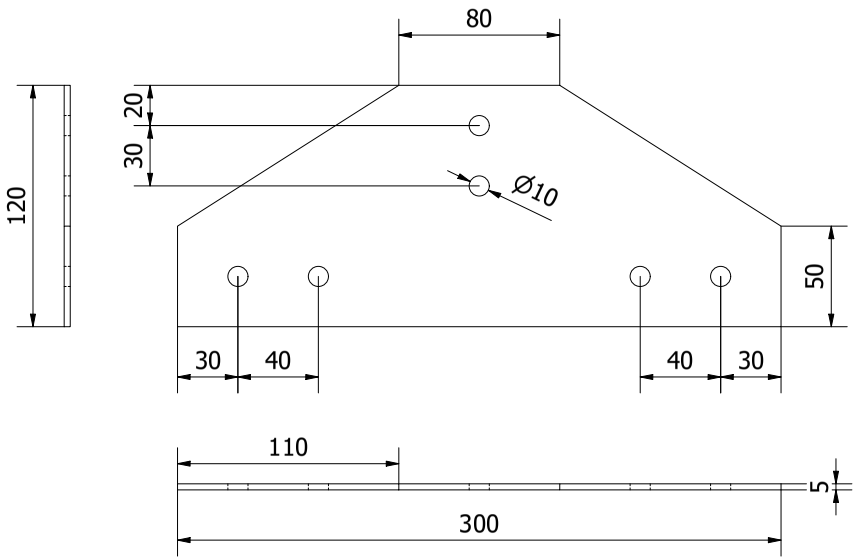


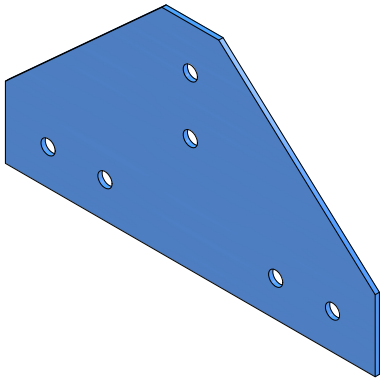


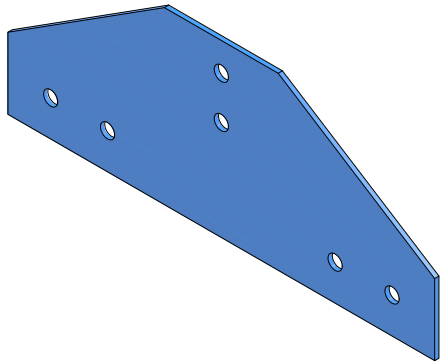
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					14-06-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Soportes 90°		
	Soportes 90°	Escala 1 : 2	Hoja 1 / 1





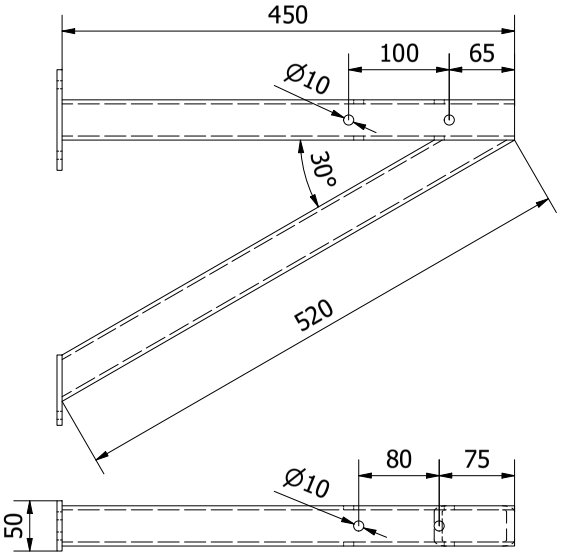


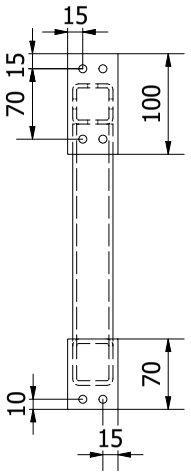


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					14-06-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Soportes 180°		
	Soportes 180°	Escala 2:5	Hoja 1 / 1

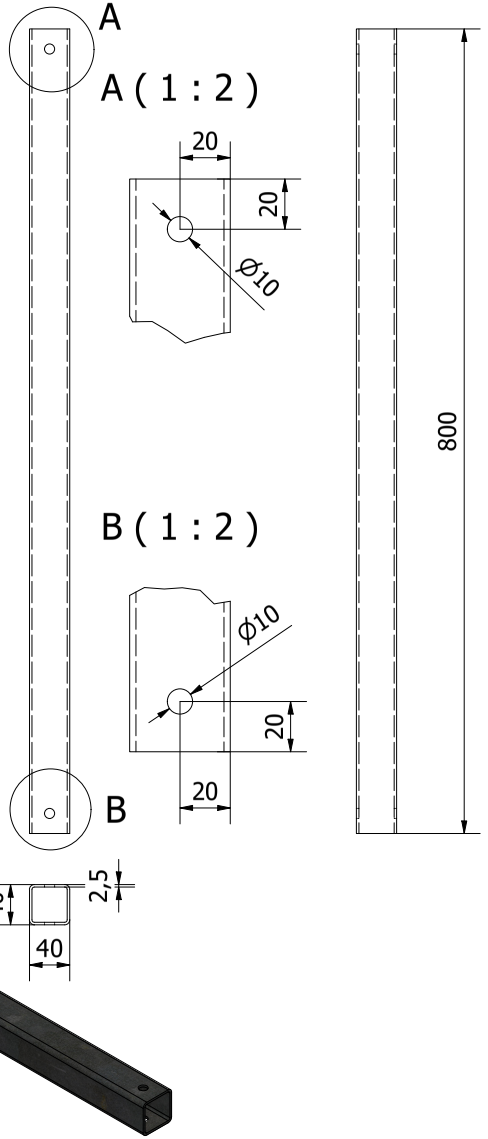
Soporte tipo escuadra

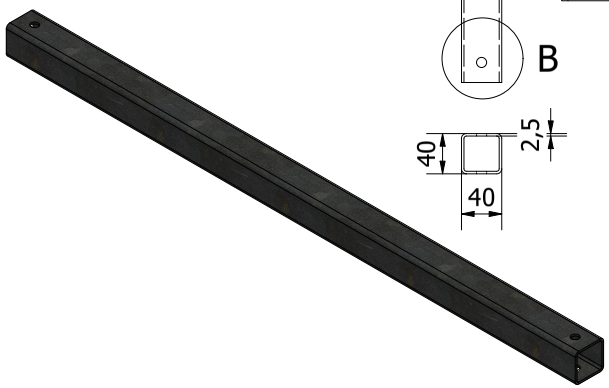






Diagonal lateral

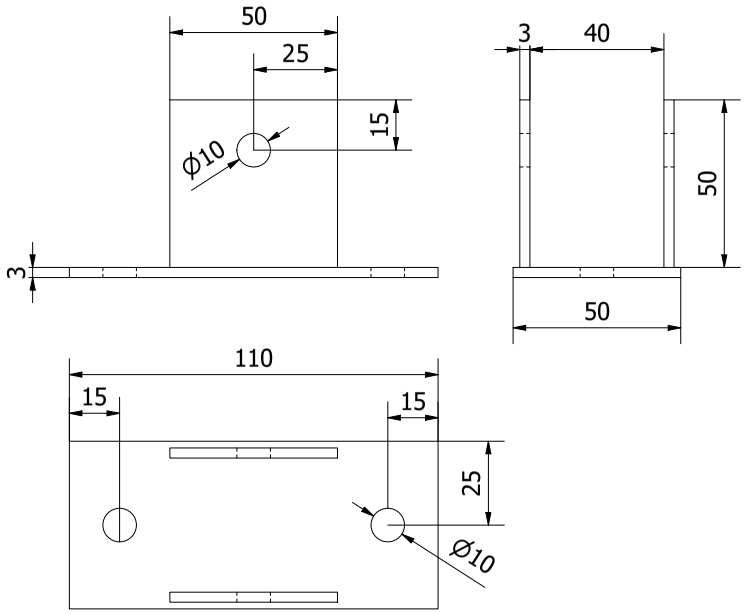




Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					17-06-2022	

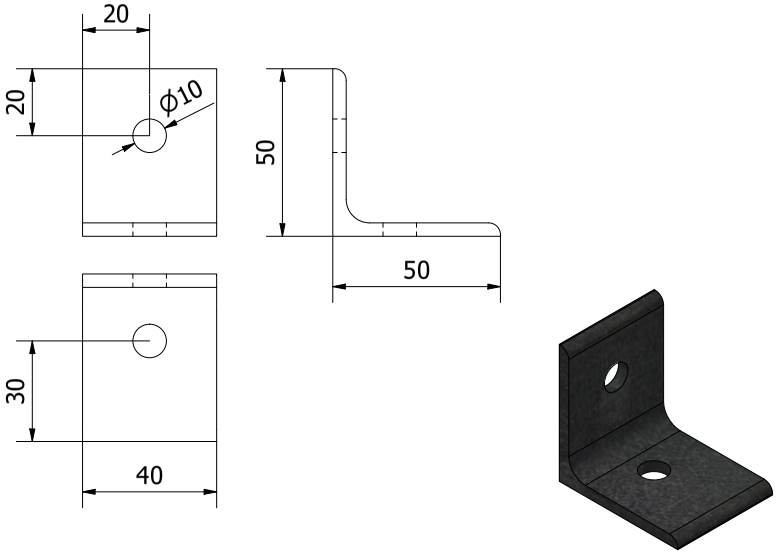
Concentrador solar tipo Cassegrain	Soportes		
	Soportes	Escala 1 : 5	Hoja 1 / 3

Soporte tipo T

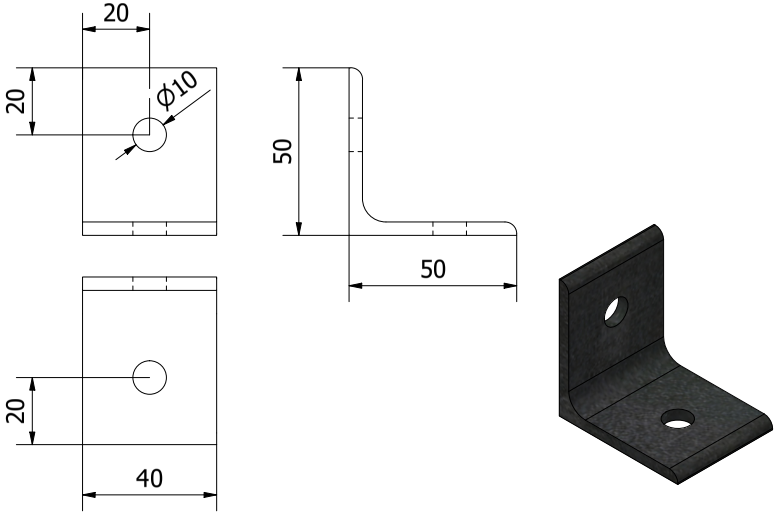




Soporte tipo L1



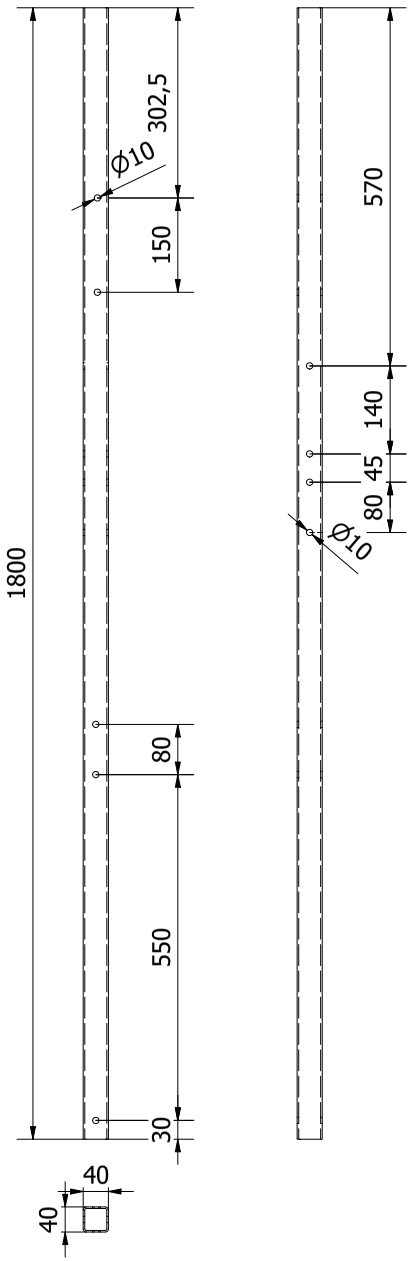
Soporte tipo L2



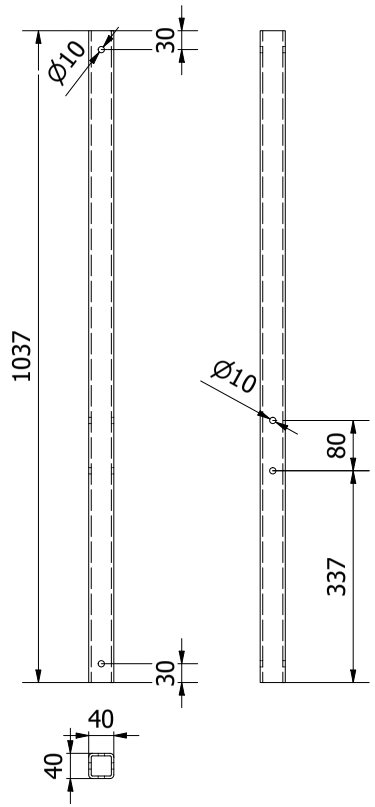
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					17-06-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Soportes		
	Soportes	Escala 2:3	Hoja 2 / 3

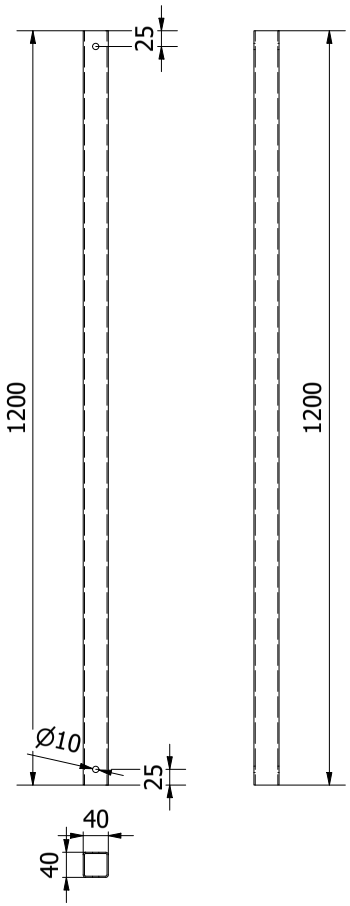
Soporte vertical



Soporte horizontal

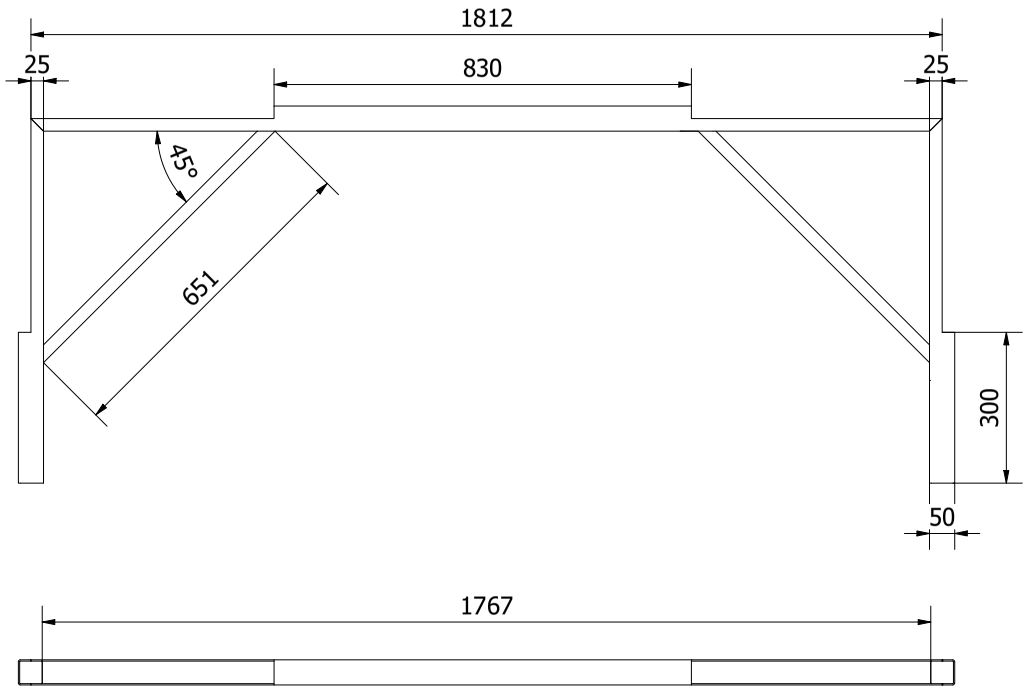


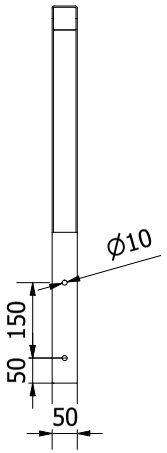
Diagonal trasera

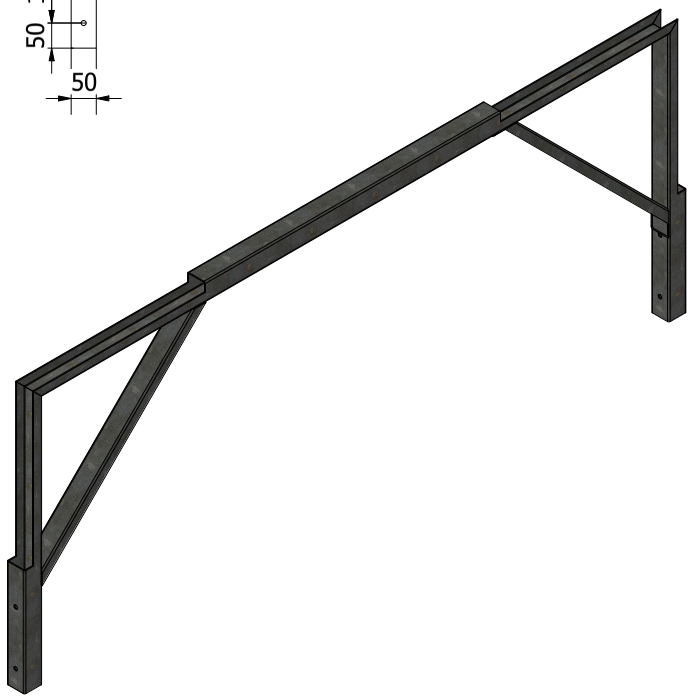


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					17-06-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Soportes		
	Soportes	Escala 1 : 8	Hoja 3 / 3



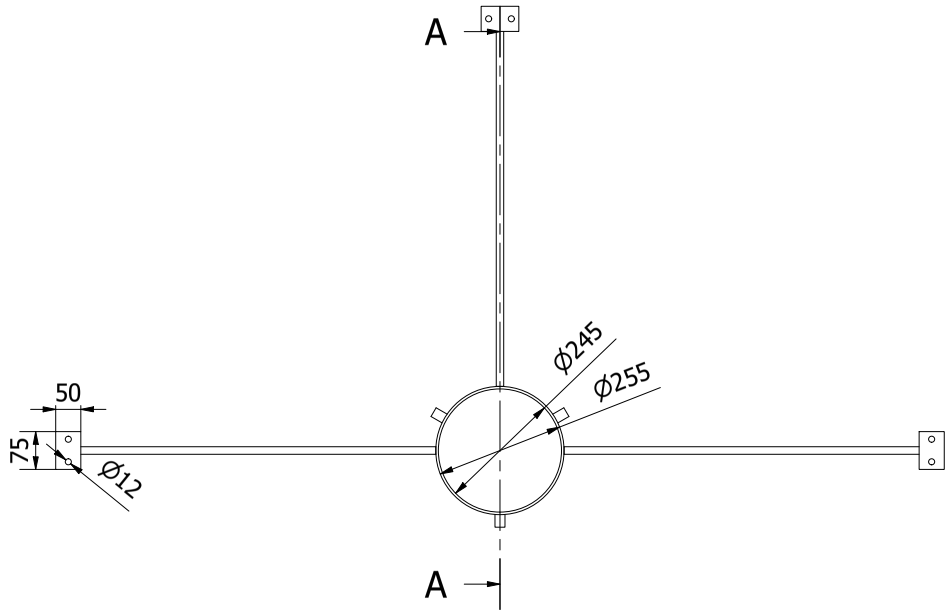


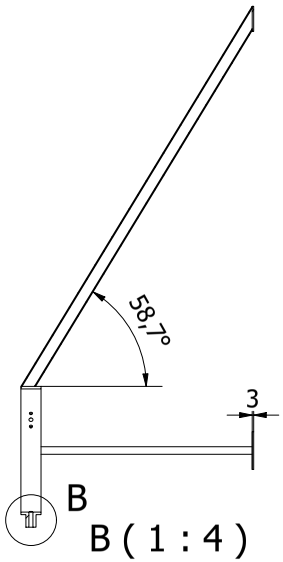


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					21-06-2022	

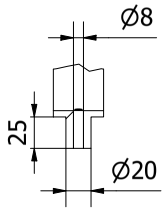
Concentrador solar tipo Cassegrain	Conjunto superior		
	Conjunto superior	Escala 1 : 10	Hoja 1 / 1

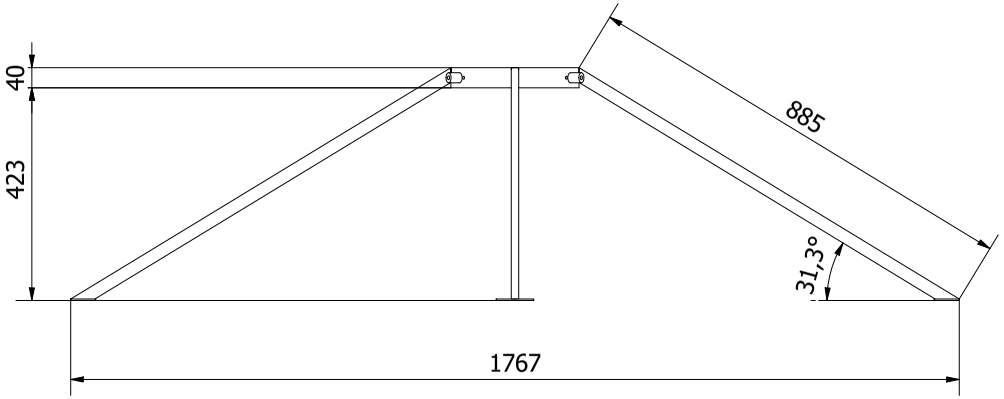
A-A3(1 : 10)





B (1 : 4)

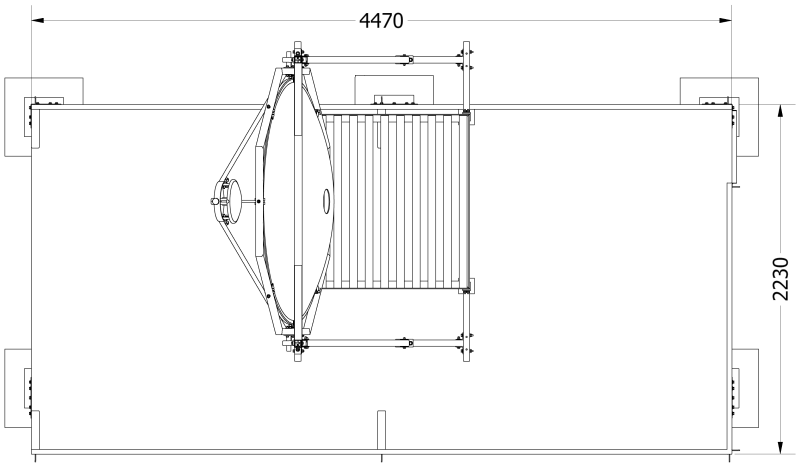


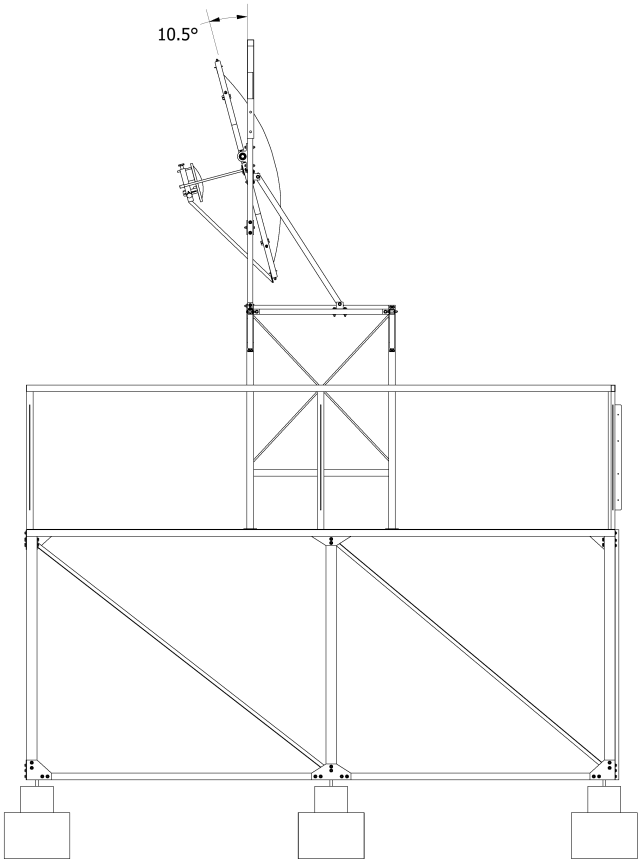


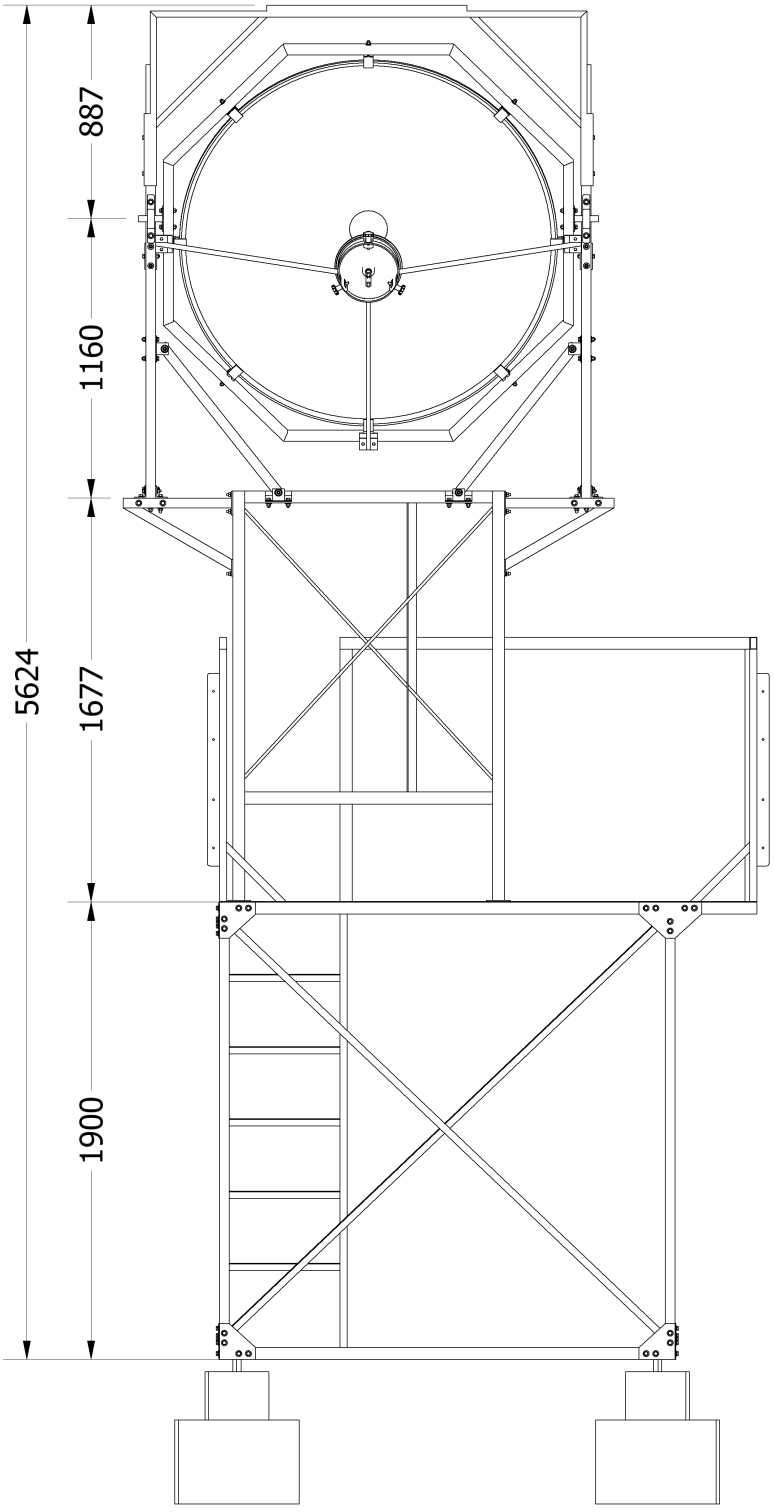


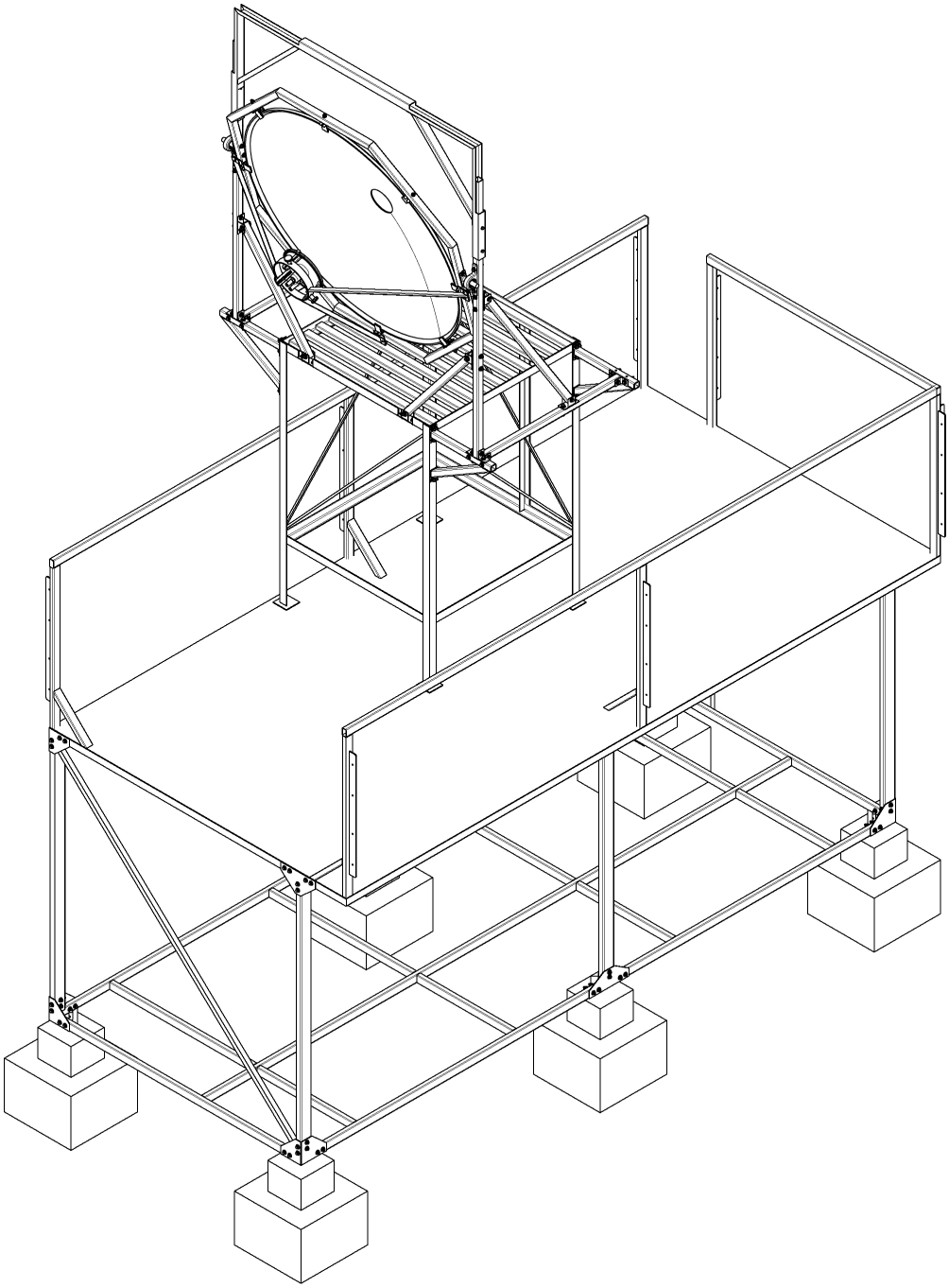
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		Fecha	
Felipe Cisternas					20-06-2022	

Concentrador solar tipo Cassegrain	Trípode		
	Trípode	Escala 1 : 10	Hoja 1 / 1


4470
2230


10.5°


887
1160
5624
1677
1900



Bibliografía

[1] "Data & Statistics - IEA." [Online]. Available: https://www.iea.org/data-and-statistics?country=CHILE{&}fuel=Energysupply{&}indicator=Totalprimaryenergysupply(TPES)bysource

[2] "E N E R G Í A S R E N O V A B L E S Biomasa Gasificación Biomasa Gasificación Energía de la Biomasa GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO," Tech. Rep.

[3] V. K. Mathur, R. W. Breault, and S. Lakshmanan, "Coal gasification using solar energy," *Solar Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 433–440, 1983.

[4] ".:: Portal - GascoEduca ::." [Online]. Available: http://www.gascoeduca.cl/Contenido/Contenido.aspx?Cod=11

[5] "Balance nacional de energía, Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía." [Online]. Available: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/

[6] Comisión Nacional de Energía, "Anuario Estadístico De Energía 2020," Santiago, Tech. Rep., 2020.

[7] "Energía Zero Carbon | Ministerio de Energía." [Online]. Available: https://www.energia.gob.cl/iniciativas/plan-de-descarbonizacion-de-la-matriz-electrica

[8] Ministerio de Energía, "Energia 2050," Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: http://eae.mma.gob.cl/uploads/D03{_}Politica{_}Energetica{_}de{_}{_}Chile{_}2050{_}Anteproyecto2.pdf

[9] "Estadísticas Generación de energía - ACERA - AG." [Online]. Available: https://acera.cl/estadisticas-generacion-de-energia/

[10] "Global Solar Atlas." [Online]. Available: https://globalsolaratlas.info/map

[11] "Planta fotovoltaica El Romero Solar | ACCIONA." [Online]. Available: https://www.acciona.com/es/lineas-de-negocio/energia/proyectos-emblematicos/planta-fotovoltaica-romero-solar/

[12] "PRIMER PLANTA TERMOSOLAR DE AMERICA LATINA CERRO DOMINADOR COMERCIALIZARA BONOS DE CARBONO. ENERGIA LIMPIA XXI." [Online]. Available: https://energialimpiaparatodos.com/2020/06/17/primer-planta-termosolar-de-america-latina-cerro-dominador-comercializara-bonos-de-carbono/

[13] "Instalación de captadores cilindro-parabólicos con seguimiento solar | AGRIFICIENTE." [Online]. Available: https://www.agrificiente.cl/instalacion-captadores-cilindro-parabolicos-seguimiento-solar/

[14] "Plataforma Solar de Almería - Discos Parabólicos." [Online]. Available: https://www.psa.es/es/instalaciones/discos/agingtestbed.php

[15] "Plataforma Solar de Almería - Cilindroparabólicos y Fresnel Lineal." [Online]. Available: https://www.psa.es/es/instalaciones/fresnel/fresdemo.php

[16] H. O. (GIZ), "Energía Solar Térmica para Procesos Industriales en México. Estudio base de mercado," CONUEE, ANES, GIZ, Ciudad de México, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: www.gob.mx/conueewww.anes.org{%}0Ahttps://mexiko.ahk.de/fileadmin/AHK{_}Mexiko/Events/Solar{_}15{_}Nov{_}2018/20181115{_}1.{_}Estudio{_}de{_}mercado{_}calor{_}solar.pdf

[17] I. Sanchez and R. Torres, "Calor solar para procesos industriales: Estudio de potencial en la industria de conservas alimenticias en México," Ciudad de México, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: https://calorsolar.mx/wp-content/uploads/2020/06/GIZ-Estudio-potencial-CANAINCA-2020.pdf

[18] IEA-ETSAP and IRENA, "Solar heat for industrial processes -Technology Brief," no. January, p. 37, 2015. [Online]. Available: www.irena.org/Publications

[19] "Tecnologías para Calor Solar de Proceso y Colectores Solares." [Online]. Available: https://www.solar-payback.com/tecnologia/?lang=es

[20] "Carbon-neutral fuel made from sunlight and air | ETH Zurich," 2019. [Online]. Available: https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/06/pr-solar-mini-refinery.html

[21] D. Rodriguez-Sanchez and G. Rosengarten, "Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror," *Applied Energy*, vol. 159, pp. 620–632, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.106

[22] N. Bushra and T. Hartmann, "A review of state-of-the-art reflective two-stage solar concentrators: Technology categorization and research trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, no. July, 2019.

[23] X. long Meng, X. lin Xia, C. Sun, Y. Li, and X. lei Li, "A novel free-form Cassegrain concentrator for PV/T combining utilization," *Solar Energy*, vol. 135, pp. 864–873, 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.034

[24] C. Y. Tsai, "Improved irradiance distribution on high concentration solar cell using free-form concentrator," *Solar Energy*, vol. 115, pp. 694–707, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.032

[25] M. U. David G. Freier, St. Paul, MN (US);Timothy L. Quinn, Maplewood, MN (US);); Thomas R. Corrigan, St. Paul, (US);); Byron E. Trotter, St. Paul, "OFF-AXIS CASSEGRAIN SOLAR COLLECTOR," pp. 1–24, 2015. [Online]. Available: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/047710311/publication/US2015009567A1?q=US2015009567A1

[26] H. Helmers and K. Kramer, "Multi-linear performance model for hybrid (C)PVT solar collectors," *Solar Energy*, vol. 92, pp. 313–322, 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.003

[27] M. Sánchez, I. G. Martínez, E. A. Rincón, and M. D. Duran, "Design and thermal-optic analysis of an ultra-solar Concentrator," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 311–320, 2014. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.036

[28] F. Dähler, M. Wild, R. Schäppi, P. Haueter, T. Cooper, P. Good, C. Larrea, M. Schmitz, P. Furler, and A. Steinfeld, "Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles," *Solar Energy*, vol. 170, no. May, pp. 568–575, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.085

[29] O. N. Obianuju and K. K. Chong, "High Acceptance Angle Optical Fiber Based Daylighting System Using Two-stage Reflective Non-imaging Dish Concentrator," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 498–504, 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.347

[30] X. Meng, X. Xia, C. Sun, and G. Dai, "Optimal design of symmetrical two-stage flat reflected concentrator," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 334–344, 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.020

[31] D. Canavarro, J. Chaves, and M. Collares-Pereira, "A novel Compound Elliptical-type Concentrator for parabolic primaries with tubular receiver," *Solar Energy*, vol. 134, pp. 383–391, 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.027

[32] ——, "New second-stage concentrators (XX SMS) for parabolic primaries; Comparison with conventional parabolic trough concentrators," *Solar Energy*, vol. 92, pp. 98–105, 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.02.011

[33] C. S. Lim and L. Li, "Flux distribution of solar furnace using non-imaging focusing heliostat," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1200–1210, 2009. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.002

[34] K. K. Chong, C. Y. Lim, and C. W. Hiew, "Cost-effective solar furnace system using fixed geometry Non-Imaging Focusing Heliostat and secondary parabolic concentrator," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 1595–1602, 2011. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.010