



universidad  
de león



# Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

## MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Fin de Máster

ESTUDIO E INVESTIGACIÓN SOBRE PARÁBOLAS  
TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR

STUDY AND RESEARCH ABOUT THERMOSOLAR DISHES  
WITH DOBLE REFLECTOR

Autor: Jorge Candanedo Moral  
Tutor: Carlos López Díaz

Julio de 2022

# RESÚMENES

**UNIVERSIDAD DE LEÓN**

**Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial**

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Trabajo de Fin de Máster**

**ALUMNO:** Jorge Candanedo Moral

**TUTOR:** Carlos López Díaz

**TÍTULO:** Estudio e investigación sobre parábolas termosolares con doble reflector

**TITLE:** Study and research about thermosolar dishes with doble reflector.

**CONVOCATORIA:** julio, 2022

**RESUMEN:**

La investigación realizada ha constado de dos partes principales: por un lado, diseño de un sistema de seguimiento de la posición solar y orientación, y por otro, diseño de un sistema de doble reflector para captar y concentrar la luz solar en un punto fijo. Para comprobar la idoneidad de los diseños realizados, se ha construido primero un prototipo de panel solar orientable en un eje y se le ha dotado de un sistema de orientación y posicionamiento; cuando se ha comprobado el buen funcionamiento del sistema, se ha construido a mayores un sensor de dirección de luz apto para su uso en exteriores. Una vez comprobado que el sistema de orientación funciona, éste se ha aplicado a un prototipo de concentrador solar de pequeñas dimensiones, el cual es escalable a un tamaño comercial. Analizando los resultados del funcionamiento de los prototipos

# ÍNDICES

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CONTENIDO

Resúmenes .....	2
Índices .....	4
Índice de contenidos .....	4
Índice de figuras .....	7
Índice de cuadros y tablas .....	10
Glosario de abreviaturas, acrónimos y términos .....	11
1. Introducción .....	12
1.1. Objetivos .....	15
2. Metodología seguida .....	16
2.1. Material utilizado .....	18
3. Antecedentes .....	20
4. Estado del arte .....	21
4.1. Geotermia solar .....	21
4.2. Placas térmicas y tubos de vacío .....	23
4.3. Reflectores Fresnel .....	26
4.4. Campos de heliostatos con torre central .....	28
4.5. Concentradores parabólicos longitudinales .....	29
4.6. Concentradores parabólicos circulares (paraboloides) .....	32
5. Investigación y desarrollo .....	34
5.1. Orientación .....	34
5.1.1 Concentración de luz mediante parábolas (teoría) .....	34
5.1.2 Necesidad de orientación de una parábola .....	37

## Parábolas termosolares con doble reflector

## Índices y glosario

5.1.3 Diseño de un sensor de dirección de luz (prototipo) .....	39
5.1.4 Aplicación del sensor a la orientación en un eje .....	42
5.1.5 Sistema de control de la orientación con microprocesador .....	52
5.1.7 Diseño de un sensor aplicable en exteriores.....	54
5.1.8. Orientación en dos ejes.....	59
5.2. Paraboloide con reflector secundario.....	62
5.2.1. Diseño del reflector principal .....	62
5.2.2. Diseño y colocación del reflector secundario .....	65
5.2.3. Colocación y forma del captador .....	72
5.2.4. Mejora con un tercer reflector .....	75
5.2.5. Construcción de un prototipo para prueba y demostración .....	80
5.2.6. Carencias del prototipo .....	84
5.3. Conclusiones .....	90
5.3.1. Ventajas del sistema ideado .....	90
5.3.2. Inconvenientes (no subsanables) del sistema ideado .....	90
5.3.3. Recomendaciones de cara a un sistema operativo real.....	91
5.3.4. Aplicaciones del sistema ideado .....	93
6. Agradecimientos.....	95
7. Referencias bibliográficas .....	96
8. Anexos .....	99
8.1. Anexo I – Programas de Arduino.....	99
8.1.1. Orientación de panel solar en un eje.....	99
8.1.2. Orientación de concentrador parabólico en dos ejes .....	103
8.2. Anexo II – Planos de los diseños realizados en Inventor.....	112
8.2.1. Prototipo de panel fotovoltaico orientable en un eje.....	112
8.2.2. Sensor de dirección de luz apto para exteriores .....	112
8.2.3. Prototipo de concentrador parabólico orientable en dos ejes.....	112

Parábolas termosolares con doble reflector  
Índices y glosario

8.3. Anexo III – Esquemas eléctricos.....	113
8.3.1. Sistema de orientación de un prototipo de panel fotovoltaico .....	113
8.3.2. Sistema de orientación de un prototipo de concentrador parabólico.	113

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 - Cocina termosolar [1].....	12
Figura 2 - Ejemplos de diferentes tecnologías de captadores termosolares [2] ...	13
Figura 3 - Esquema de funcionamiento de un sistema geotérmico solar .....	22
Figura 4 - Representación a escala de un sistema de calefacción geotérmica....	22
Figura 5 - Placas solares térmicas instaladas sobre el tejado de una vivienda [3]24	
Figura 6 - Funcionamiento de un captador solar de tubos de vacío [4].....	25
Figura 7 - Partes de un captador solar de tubos de vacío pasivo [5].....	26
Figura 8 - Explicación gráfica del diseño de una lente Fresnel [6] .....	26
Figura 9 - Ejemplo de funcionamiento de un campo de reflectores Fresnel [7]....	27
Figura 10 - Primera central solar termoeléctrica de campo de heliostatos instalada en el mundo [8].....	28
Figura 11 - Esquema de funcionamiento de una central eléctrica termosolar [9].	28
Figura 12 - Funcionamiento de un captador parabólico longitudinal [10] .....	29
Figura 13 - Sistema de estructura reflectora móvil con tubería captadora fija [11]30	
Figura 14 – Reflector parabólico con tubería captadora móvil [12] .....	30
Figura 15 - Sistema patentado de captador parabólico longitudinal con doble reflector [13] .....	31
Figura 16 – Concentradores solares parabólicos circulares [14].....	32
Figura 17 - Partes de una parábola [15].....	34
Figura 18 - Recta tangente a una parábola.....	35
Figura 19 - Recta perpendicular a la tangente de una parábola .....	35
Figura 20 - Esquema explicativo de la reflexión de la luz [16].....	36
Figura 21 - Rayos de luz reflejados en una parábola hacia su foco .....	36
Figura 22 - Concentración de luz mediante una parábola.....	37
Figura 23 - Haz de luz orientado (rojo) y desorientado (verde) .....	38
Figura 24 - Reflexión de rayos de luz no paralelos al eje de la parábola .....	39
Figura 25 - Ángulos de las resistencias LDR del sensor de dirección de luz .....	40
Figura 26 - Incidencia de un haz de luz orientado sobre el sensor .....	41
Figura 27 - Resistencias LDR incrustadas en el sensor.....	42
Figura 28 - Sensor de luminosidad impreso en 3D .....	43
Figura 29 - Servomotor utilizado para el movimiento del panel.....	43

Parábolas termosolares con doble reflector

Índices y glosario

Figura 30 – Prototipo de panel solar orientable construido .....	44
Figura 31 - Modelización de una LDR con 1/3 de su superficie en sombra .....	47
Figura 32 - Resistencias LDR de un sensor y resistencias limitantes de corriente .....	49
Figura 33 - Ejemplo de cálculo de la caída de tensión en dos sensores en paralelo .....	50
Figura 34 - Detalle de uno de los sensores de dirección de luz instalados .....	52
Figura 35 - Placa de vidrio cubriendo la resistencia LDR.....	55
Figura 36 - Placa electrónica y conductores soldados, visto desde su parte inferior .....	56
Figura 37 - Cables del sensor .....	56
Figura 38 - Prensaestopas utilizado .....	57
Figura 39 - Carcasa vista desde su parte inferior.....	57
Figura 40 - Base del sensor .....	58
Figura 41 - Sensor de luz completamente montado.....	58
Figura 42 - Ejemplo de sistema orientable en dos ejes.....	60
Figura 43 - Esquema de conexión de cuatro sensores de orientación.....	61
Figura 44 - Relación de distancias en la parábola utilizada en el diseño .....	63
Figura 45 - Zona en sombra en el reflector principal .....	65
Figura 46 - Rayos interior y exterior .....	66
Figura 47 - Dispersión de rayos tras concentrarse en el foco .....	66
Figura 48 - Demostración gráfica del paralelismo de las tangentes de reflexión..	67
Figura 49 - Construcción de una parábola conocidas dos tangentes y sus puntos de tangencia [18].....	68
Figura 50 - Distancias de cada rayo al eje de la parábola.....	69
Figura 51 - Opciones de reflectores secundarios cóncavo y convexo.....	70
Figura 52 – Construcción gráfica de la parábola reflectora secundaria.....	71
Figura 53 - Parábola del reflector principal y de las dos opciones de reflectores secundarios.....	72
Figura 54 - Giro del sistema de reflectores en planta.....	73
Figura 55 – Giro del sistema de reflectores en perfil .....	73
Figura 56 - Forma óptima para el captador térmico .....	74
Figura 57 - Captador cilíndrico .....	75

Parábolas termosolares con doble reflector

Índices y glosario

Figura 58 - Reflector terciario en planta .....	76
Figura 59 - Reflector terciario en perfil .....	77
Figura 60 - Aplicación de una lente convergente para rectificar el haz de luz.....	78
Figura 61 - Lentes convergente y divergente para disminuir el grosor del haz ....	79
Figura 62 - Prototipo de concentrador parabólico durante la construcción .....	80
Figura 63 - Sensores de dirección de luz utilizados .....	81
Figura 64 - Raíl y rueda instalados.....	81
Figura 65 - Motor de pasos utilizado sobre su base.....	82
Figura 66 - Servomotor instalado en el prototipo.....	82
Figura 67 - Interruptor de fin de carrera instalado en el prototipo.....	83
Figura 68 - Reflectores principal y secundario con sus sensores.....	83
Figura 69 - Motor de pasos 28BYJ-48 y controlador ULN2003 [19].....	85
Figura 70 - Sujeción diseñada originalmente para el motor de pasos.....	85
Figura 71 - Pieza de adaptación para sujetar el servomotor .....	86
Figura 72 - Nueva piza diseñada para sujetar el motor de pasos .....	86
Figura 73 - Superficie reflectora del reflector principal .....	87
Figura 74 - Vista de las capas en una pieza de pendiente constante .....	88
Figura 75 - Vista de las capas en una pieza curvada.....	88
Figura 76 – Símbolo de válvula 4/3 con centros cerrados [20].....	93

**Nota:** todas aquellas imágenes que se encuentran sin referenciar, son de autoría propia. Se prohíbe su uso y reproducción total o parcial sin la correspondiente y adecuada referencia a este trabajo.



Parábolas termosolares con doble reflector  
Índices y glosario

## ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS

Tabla 1 - Resistencia de una LDR en función de la luminosidad ..... 45

Tabla 2 - Diferencia de tensión en el sensor medida por el controlador..... 50

Gráfica 1 - Resistencia en función de la luminosidad incidente en una LDR ..... 46

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS

**3D:** referencia a las impresoras en tres dimensiones (fabricación aditiva) o a piezas obtenidas por este proceso.

**ACS:** Agua Caliente Sanitaria.

**CA:** corriente alterna

**CC:** corriente continua.

**Distancia focal:** en una parábola, se refiere a la distancia entre el vértice y el foco de la misma.

**Fluido caloportador:** es aquel elemento en estado líquido que hace de captador térmico calentándose gracias a la acción del sol, y transporta la energía térmica hasta su lugar de consumo. Generalmente es agua o aceite.

**GND:** tierra física (abreviatura de “ground” en inglés).

**Hz:** hercio/hercios.

**Latitud:** distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado del planeta (distancia hacia el polo norte o el polo sur).

**LDR:** Light Dependent Resistor (resistencia dependiente de la luminosidad).

**Longitud:** distancia angular entre el meridiano base (Greenwich) y un punto determinado del planeta (distancia hacia el este o el oeste).

**mm:** milímetro/milímetros.

**ms:** milisegundo/milisegundos.

**PLA:** PolyLactic Acid (ácido poliláctico).

**PWM:** Pulse Wave Modulation (modulación por ancho de pulso).

**rpm:** revoluciones por minuto.

# 1. INTRODUCCIÓN

Cada vez se utilizan más aplicaciones que requieren del sol para su funcionamiento, ya sea a nivel fotovoltaico o térmico, y globalmente consumimos más energía, lo que se está convirtiendo en un problema. Aunque en principio el uso de energías renovables y más limpias que las fósiles supone una solución al aumento de la demanda energética, la implantación del aprovechamiento de la energía solar en sustitución de otras convencionales avanza a un ritmo muy lento, inferior al que avanza el aumento del consumo de energía; un ejemplo lo tenemos en las cocinas solares, las cuales existen desde hace ya bastantes años pero su uso no está extendido, a pesar del ahorro que suponen comparadas con cocinas eléctricas o de gas.

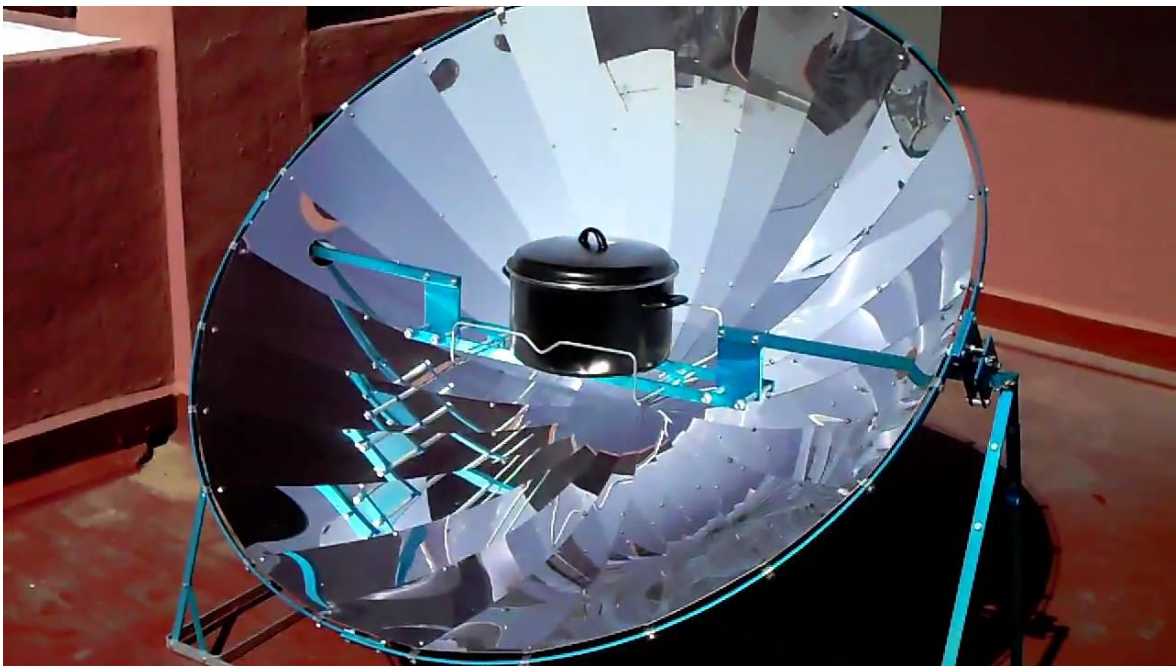


Figura 1 - Cocina termosolar [1]

Una solución básica y general a este problema generalizado del aumento de la demanda de energía sería aumentar el rendimiento de los equipos, tanto de aquellos que consumen energía (para disminuir el consumo) como de aquellos que la extraen de la naturaleza (para aumentar la generación), pero esto implica dos cosas: i) aumento de la complejidad de los equipos y, por lo tanto, ii) aumento del

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 1 - Introducción

coste de los mismos (tanto el coste de la inversión inicial como el coste de mantenimiento).

Desde un punto de vista tanto industrial como doméstico, cada vez hay una mayor conciencia del cuidado del medioambiente, pero el objetivo principal aún sigue siendo maximizar los beneficios económicos de la actividad realizada (o minimizar los gastos), lo que conlleva que en general la sociedad no esté dispuesta a asumir grandes inversiones, y menos aún si encima ello va a provocar un aumento de los gastos de mantenimiento o de la probabilidad de fallos.

En definitiva, necesitamos aumentar el rendimiento de los equipos generadores y consumidores de energía, pero sin crear sistemas demasiado complejos o caros, ¿es esto posible? La respuesta es sí, con un rediseño adecuado de los sistemas ya existentes.

En este caso nos centramos solamente en los sistemas generadores de energía, en concreto los que aprovechan la energía solar térmica mediante captadores parabólicos.

A día de hoy existen diferentes tecnologías termosolares: campos de heliostatos concentradores de luz en una torre central, captadores parabólicos longitudinales (ambos a nivel industrial), placas o tubos termosolares (a nivel doméstico) y captadores parabólicos circulares o paraboloides (aptos para uso doméstico o industrial, en función del tamaño).

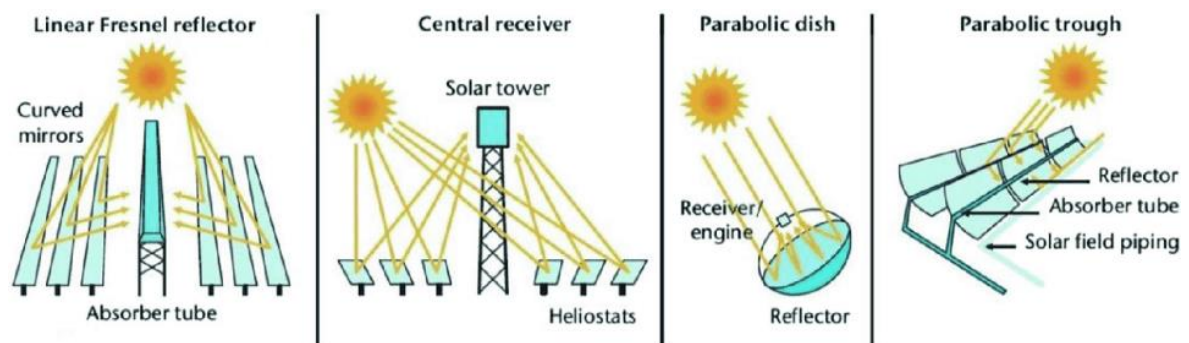


Figura 2 - Ejemplos de diferentes tecnologías de captadores termosolares [2]

En este estudio nos centraremos en aquellos menos utilizados: los paraboloides, los cuales también pueden ser aquellos que ofrecen un abanico más amplio de posibilidades de utilización.

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 1 - Introducción

Los captadores paraboloides son los menos utilizados porque presentan dos problemas principalmente:

- ✚ Orientación: una parábola concentra los rayos que inciden sobre ella en su foco, siempre que sean **paralelos a su eje**; esto implica que, si se pretende utilizar dicha parábola para concentrar luz solar, ésta **siempre** debe estar orientada al sol, y dado que el sol respecto de la tierra es un elemento en movimiento, el sistema completo de parábola y foco siempre deberá estar en movimiento (ver subapartado 5.1.2. "Necesidad de orientación de una parábola").

Como la luz se concentra en el foco, el elemento captador de energía deberá estar también en ese punto, ya sea una caldera, un motor Stirling, etc., y dado que el foco se ha de mover con la parábola, el elemento captador deberá moverse también, aumentando el consumo de energía al aumentar el peso general de la estructura.

- ✚ Limitación de captación: este sistema presenta una doble limitación de la captación energética, por un lado debido a que se ha de crear una estructura reflectora móvil, lo que limita el tamaño de la misma (por mucho que avance la tecnología nunca se podrá crear una estructura de varias hectáreas de superficie y así poder generar de manera similar a un campo de heliostatos), pero por otro lado, debido a que el captador ha de estar en el foco y moverse con la estructura, éste solo podrá recibir la energía de un único reflector, con lo que nunca podrá igualar la generación de un captador parabólico longitudinal, sistema en el cual se pueden conectar varios captadores en serie.

Es por estas razones que los paraboloides no se utilizan y dejan lugar a los heliostatos y a las parábolas longitudinales (más sencillos y baratos), sin embargo, **solucionar estos problemas supondría poder ampliar muy significativamente el uso de paraboloides a pequeña escala**, campo en el que actualmente la única tecnología termosolar utilizada son las placas o tubos captadores, los cuales ni alcanzan grandes temperaturas ni ofrecen grandes rendimientos.

Parábolas termosolares con doble reflector

1 - Introducción

## 1.1. OBJETIVOS

Se pretende aprender y entender el funcionamiento de los sistemas existentes actualmente, para así poder mejorarlos y optimizarlos de cara a ampliar sus posibles aplicaciones, tanto en el ámbito industrial como doméstico.

Con la realización de esta memoria se busca:

- ✚ Primero, que los resultados obtenidos puedan ser útiles a la sociedad, con una contribución a la ciencia y la tecnología.
- ✚ Y segundo, que todo el proceso realizado sea comprobable y reproducible por cualquiera con los materiales adecuados, de cara a una verificación del mismo.

## 2. METODOLOGÍA SEGUIDA

La metodología seguida ha constado de las siguientes fases:

- ✚ Comprensión teórica de los principios de funcionamiento de los sistemas actuales.
- ✚ Identificación de problemas.
- ✚ Investigación y diseño para hallar una solución teórica.
- ✚ Construcción de un prototipo para probar la solución adoptada.
- ✚ Evaluación de resultados.
- ✚ Rediseño del prototipo con las mejoras oportunas.
- ✚ Anotación de los resultados definitivos de cara a un diseño operativo.

El primer paso ha sido una revisión bibliográfica sobre los reflectores parabólicos para conocer qué sistemas existen actualmente, entender su funcionamiento y los problemas que presentan; con esto se han propuesto diferentes soluciones a los mismos.

Puesto que uno de los problemas es la orientación, se ha diseñado un sensor y un sistema de control que maximizan el balance coste-efectivo, además de que pueden aplicarse a diferentes elementos orientables.

Para probar la efectividad de dicho diseño, se ha construido un prototipo de manera muy básica utilizando materiales reciclados, en el cual se orienta un panel solar fotovoltaico simulado, gracias a un servomotor que regula su orientación y un sensor de dirección de luz.

Se ha probado el funcionamiento de este primer prototipo y se ha comprobado que es correcto, pero mejorable, por lo que se ha dado por bueno el sistema de control y posicionamiento diseñado, pero se le han aplicado mejoras.

Con las mejoras tenidas en cuenta se ha diseñado y construido un nuevo prototipo impreso en 3D. Una vez se ha probado el funcionamiento, se ha visto que las soluciones a los problemas del anterior han sido efectivas y no entrañan nuevos problemas a mayores.

Parábolas termosolares con doble reflector  
2 - Metodología

Con esto, se ha dado por finalizada la obtención de un sistema de orientación sencillo, con un buen balance coste-efectivo y una funcionalidad óptima.

Ya que los sensores de dirección de luz utilizados en esta investigación están preparados para un uso en prototipos y no en sistemas reales a la intemperie, se ha diseñado un sensor aislado (equivalente a una IP66) apto para aplicaciones reales, el cual podría ser perfectamente comercial.

Una vez solucionado el problema de la orientación, se ha procedido a diseñar un prototipo de reflector circular con dos parábolas, de manera que se refleje la luz concentrada por la primera parábola hacia un punto externo **fijo**.

Para esto, en primer lugar se ha realizado una revisión bibliográfica sobre las parábolas y sus propiedades a nivel de curva cónica, para determinar el diseño de los dos reflectores, su forma y dimensiones así como su colocación. El diseño se ha hecho en dos dimensiones y posteriormente se ha aplicado una revolución al mismo para obtener ya una forma tridimensional. En el proceso de diseño se ha comprobado la reflexión de los rayos de luz gráficamente en el software AutoCAD, el cual ofrece total precisión y fiabilidad, de manera que se ha podido determinar teóricamente que el diseño realizado es correcto para la reflexión y concentración de la luz solar.

Una vez tenido el diseño de las parábolas adecuado, se han buscado sus variables matemáticas y relaciones entre ellas para así poder extrapolarlo a diferentes escalas, con lo que este diseño se ha podido implementar en un prototipo realizado en este trabajo y de igual manera se podría aplicar a un sistema real completamente funcional.

En el prototipo realizado se ha evaluado su funcionamiento y a partir de ello se han anotado los resultados y conclusiones obtenidos del proceso, para poder aplicarlos en un diseño funcional.



Parábolas termosolares con doble reflector  
2 - Metodología

## 2.1. MATERIAL UTILIZADO

Realización de este documento y diseño de piezas:

- ✚ Hardware (portátil Asus, ordenador de sobremesa construido por cuenta propia y los presentes en el laboratorio del Maker Club León).
- ✚ Microsoft Word 2016
- ✚ Autodesk AutoCAD 2018
- ✚ Autodesk Inventor 2018
- ✚ Ultimaker Cura 4.12.1
- ✚ Pspice Schematics 9.1
- ✚ Arduino IDE 1.8.19

Obtención de las piezas para los prototipos:

- ✚ Impresora 3D – Creality CR10 (laboratorio Maker Club León)
- ✚ PLA (filamento de impresión)
- ✚ Taladro de columna (laboratorio Maker Club León)
- ✚ Sierra de banda (laboratorio Maker Club León)

Construcción y montaje de los prototipos:

- ✚ Cinta de aluminio adhesiva
- ✚ Soldador de estaño
- ✚ Conductores
- ✚ Resistencias LDR
- ✚ Motor de pasos 28BYJ-48
- ✚ Controlador ULN2003
- ✚ Motor de pasos 17HS13-0404S
- ✚ Controlador L298N
- ✚ Servomotor MG996R
- ✚ Resistencias eléctricas fijas (1 y 2k $\Omega$ )
- ✚ Potenciómetros (10k $\Omega$ )
- ✚ Diodos LED

Parábolas termosolares con doble reflector  
2 - Metodología

Control de los prototipos:

- ✚ Microcontroladores (Arduino UNO y Arduino MEGA)

Sensor de dirección de luz apto para exteriores:

- ✚ Prensaestopas (16 mm)
- ✚ Manguera (3 x 1,5 mm<sup>2</sup>)
- ✚ Resistencias LDR
- ✚ Placa electrónica
- ✚ Placa de cristal (3mm de espesor)
- ✚ Cortador de cristal
- ✚ Silicona

### 3. ANTECEDENTES

Esta investigación se basa en un proyecto anterior realizado como trabajo de fin de grado por el alumno Sandro García Sanz (de tutor, igual que en este caso, Carlos López Díaz). Dicho trabajo fue titulado “Desarrollo y construcción de un concentrador parabólico solar”.

En dicho proyecto, primeramente se ha realizado una revisión bibliográfica sobre el sol y la energía solar térmica, junto con investigaciones parciales sobre más temas necesarios para el proyecto.

El objetivo fue diseñar y construir un prototipo de concentrador solar con doble reflector, así que en el trabajo se desarrollaron todos los pasos del proceso seguido en cuanto a diseño y simulación.

El presupuesto superó los 2.000 euros, lo cual es muy superior al disponible para esta investigación, y permitió la construcción de un prototipo de mucho mayor tamaño y con mejores materiales.

De cara a esta investigación, el trabajo de Sandro proporciona la idea principal de colocar un segundo reflector en una parábola, así como el sistema de movimiento consistente en una estructura rotativa (con la diferencia de que el prototipo de Sandro utiliza raíles para desplazar la parábola, y el realizado en esta investigación utilizará dos brazos elevadores).

Para continuar con lo diseñado por Sandro, en esta investigación se aportan dos elementos básicos:

- ✚ Un nuevo sistema de seguimiento solar, el cual simplifica y abarata los ya existentes.
- ✚ Un nuevo sistema de posicionamiento de los reflectores, basado en brazos en vez de raíles.

## 4. ESTADO DEL ARTE

Tal y como se ha explicado en la introducción, a día de hoy existen diferentes tecnologías para aprovechar la energía térmica que el sol genera en nuestro planeta, las cuales se desarrollan a continuación:

### 4.1. GEOTERMIA SOLAR

Se basa en aprovechar el calor del suelo debido a la irradiación en él de los rayos solares (no tiene nada que ver con la geotermia convencional, la cual aprovecha el calor del subsuelo procedente del magma terrestre).

Se colocan captadores subterráneos a poca profundidad en una gran superficie, en los cuales se calienta un fluido; ese fluido circula y calienta un intercambiador, del cual una bomba de calor extrae la energía térmica y la concentra en otro intercambiador a más temperatura, que calienta un fluido secundario el cual ya reparte el calor por las diferentes aplicaciones del hogar.

La bomba de calor funciona como un refrigerador pero al revés: comprime un gas el cual se licua en un intercambiador, y por las propiedades de los gases cede calor al circuito de uso (a mayor presión, mayor temperatura), para posteriormente volver a evaporarse en otro intercambiador en el cual absorbe la energía necesaria para conseguir el cambio de fase del circuito captador, el cual se encuentra a menor temperatura pero cuenta con un mayor caudal de fluido.

Se puede ver el sistema en modo esquemático en la siguiente imagen, tomada en el Aula de la Geotermia y la Biomasa de la Cátedra de Hunosa en la Universidad de Oviedo, campus de Mieres:

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 4 - Estado del arte

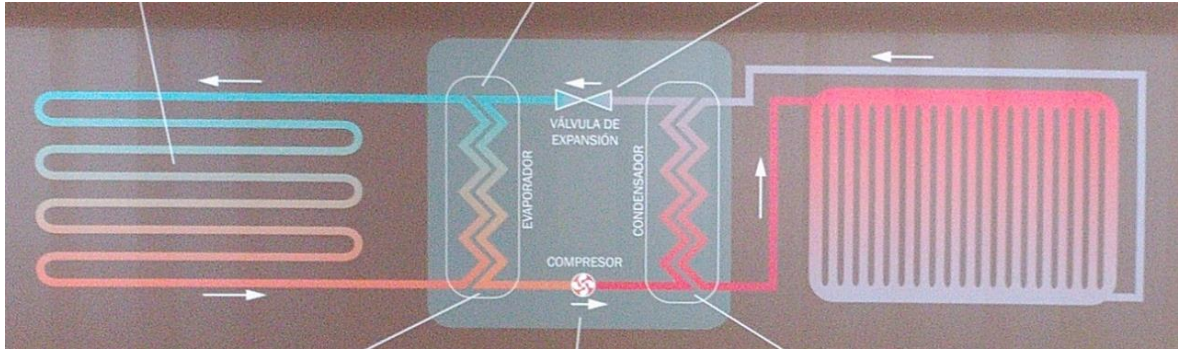


Figura 3 - Esquema de funcionamiento de un sistema geotérmico solar

Y de igual manera, pero en representación escalada de un sistema real, se puede ver un ejemplo de aplicación con un captador instalado en un jardín y un sistema de calefacción por suelo radiante:



Figura 4 - Representación a escala de un sistema de calefacción geotérmica

Este sistema permite un aprovechamiento del calor solar incidente en una superficie sin limitar su uso, ya que dicha superficie se puede seguir utilizando (como jardín o zona de ocio, por ejemplo) siempre que no se evite en ella la irradiación de la luz solar. Además, es un sistema sencillo que solamente consume una pequeña proporción de energía eléctrica.

Parábolas termosolares con doble reflector  
4 - Estado del arte

Por otro lado, tiene varios inconvenientes:

- ✚ El fluido captador se encuentra a poca profundidad, por lo que es susceptible de congelarse si la temperatura ambiental baja por debajo de 0 °C, lo que obliga a utilizar anticongelante.
- ✚ Dado que se capta la energía del suelo, no se van alcanzar altas temperaturas, lo que obliga a utilizar entre el circuito captador y el de uso final una bomba de calor, lo cual provoca dos gastos de energía a mayores: uno en la bomba que fuerza la circulación del fluido captador exterior, el cual ha de tener un gran caudal (la bomba de calor concentra la energía, así que para poder tener una alta temperatura en el circuito secundario, se ha de tener un mayor caudal en el primario), y otro en el motor eléctrico que ha de mover el compresor de la bomba de calor. La energía eléctrica invertida en el compresor se añade al sistema como energía térmica y es un porcentaje menor que la solar, pero hace que el sistema dependa también de una fuente externa de energía eléctrica.

Este sistema es utilizado a nivel doméstico, pero no en grandes edificios ni a nivel industrial.

## 4.2. PLACAS TÉRMICAS Y TUBOS DE VACÍO

Estos dos sistemas, muy similares, se basan en captar la energía de la luz solar incidente sobre una superficie, sin concentración alguna de la luz ni orientación variable de la superficie.

El hecho de que no dispongan de orientación hace disminuir el rendimiento a primera y última hora del día (el captador se encuentra desorientado en latitud y en longitud), pero esto también permite que el sistema sea más simple, esté prácticamente libre de mantenimiento y el coste inicial no sea excesivamente alto.

En cambio, al no concentrarse la luz de ninguna manera, la temperatura alcanzada no puede ser muy alta, por lo que las aplicaciones de estos sistemas serán únicamente el suministro de ACS o la calefacción de espacios.



## Parábolas termosolares con doble reflector 4 - Estado del arte

Al igual que sucede con los paneles fotovoltaicos, con lo que ha disminuido el precio de estos sistemas actualmente, se pueden sobredimensionar las instalaciones para conseguir la misma captación de energía sin tener una orientación óptima, de cara a una plena integración estética en el edificio que se instalen.

Las **placas termosolares** constan de una superficie plana de color oscuro, construida con un material buen conductor del calor, por la cual circulan tuberías soldadas a ella, también de un material que sea buen conductor térmico (aunque es menos frecuente, la propia superficie puede ser directamente hueca y por su interior, a modo de caldera, circula el fluido caloportador). Esta superficie ha de estar aislada térmicamente por su parte inferior, evitando así pérdidas de calor, pero también por su parte superior, con la diferencia de que el aislamiento superior ha de ser transparente (normalmente, vidrio doble con cámara de aire intermedia).

En su parte superior pueden tener o no un depósito acumulador, el cual se calienta por convección y permite que el fluido caloportador (agua o aceite) no alcance temperaturas excesivas en caso de que falle la bomba de circulación forzada.



*Figura 5 - Placas solares térmicas instaladas sobre el tejado de una vivienda [3]*

Los tubos de vacío funcionan de manera muy similar a las placas, pero en este caso el captador es una tubería por la que circula el fluido caloportador, la cual está dentro de un segundo tubo de cristal o un material transparente, dentro del cual se

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 4 - Estado del arte

ha realizado el vacío, para evitar que el calor de la tubería se pierda hacia el exterior.

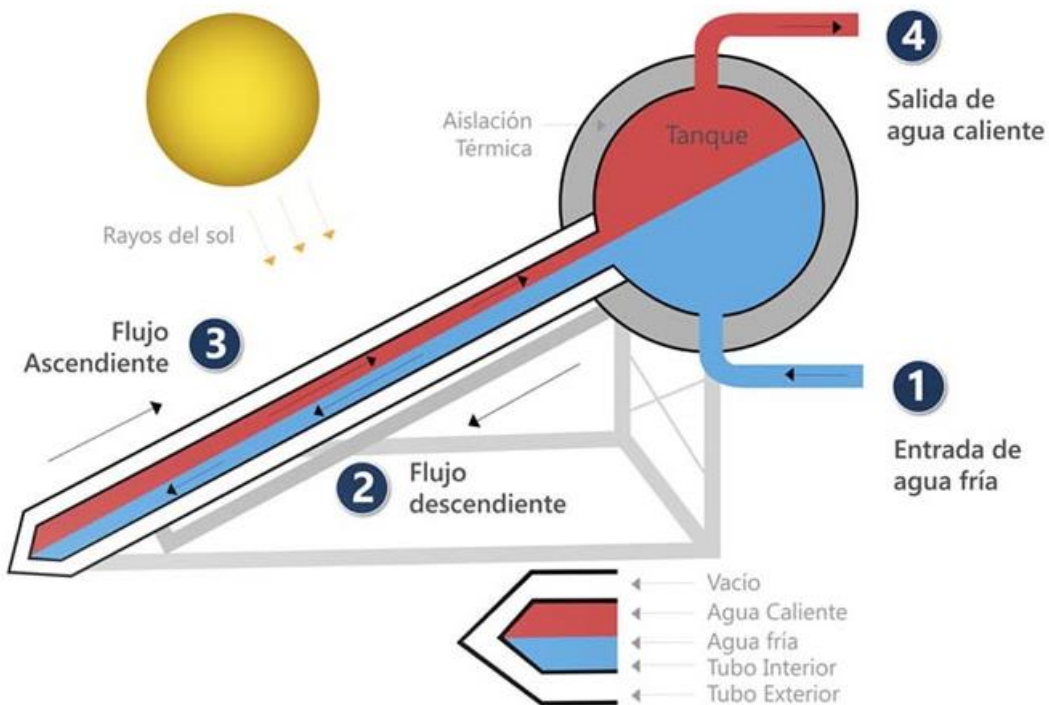


Figura 6 - Funcionamiento de un captador solar de tubos de vacío [4]

En otro sistema algo más complejo (sistema pasivo) pero con mejores rendimientos, el agua no circula por los tubos de vacío, sino que en el interior de éstos se encuentra un fluido de bajo punto de ebullición, el cual se evapora por acción de la luz solar y asciende hasta el condensador, donde se condensa de nuevo. El hecho de que el fluido del interior de los tubos cambie de fase, hace que sea capaz de absorber y ceder una cantidad de energía mucho mayor, lo que aumenta el rendimiento del equipo.



Parábolas termosolares con doble reflector  
4 - Estado del arte

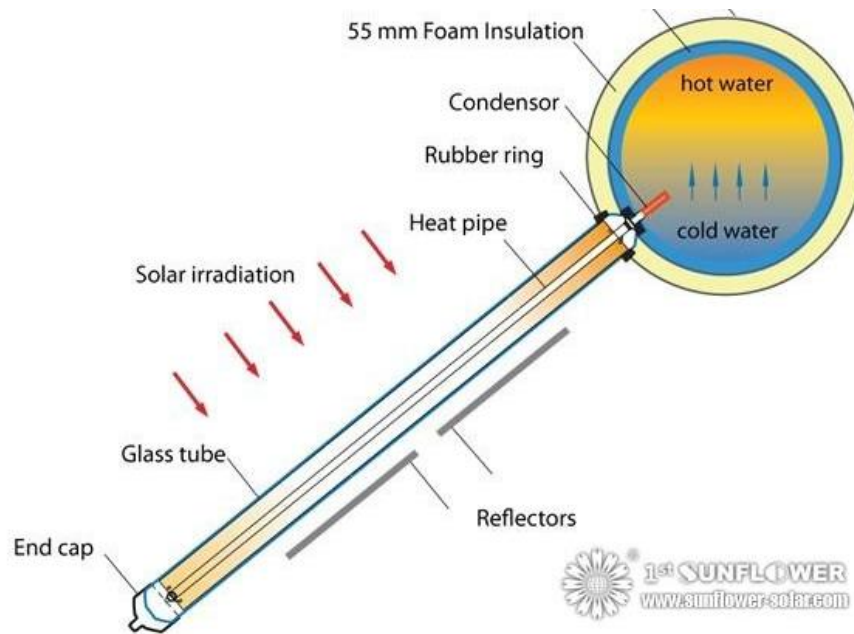


Figura 7 - Partes de un captador solar de tubos de vacío pasivo [5]

### 4.3. REFLECTORES FRESNEL

Se basan en la concentración de luz utilizando el principio de funcionamiento de las lentes Fresnel, el cual establece que se puede reducir el tamaño de una lente (el grosor, no su superficie) y, por lo tanto, su volumen y peso, si se divide la misma en secciones conservando la curvatura en cada una de ellas.

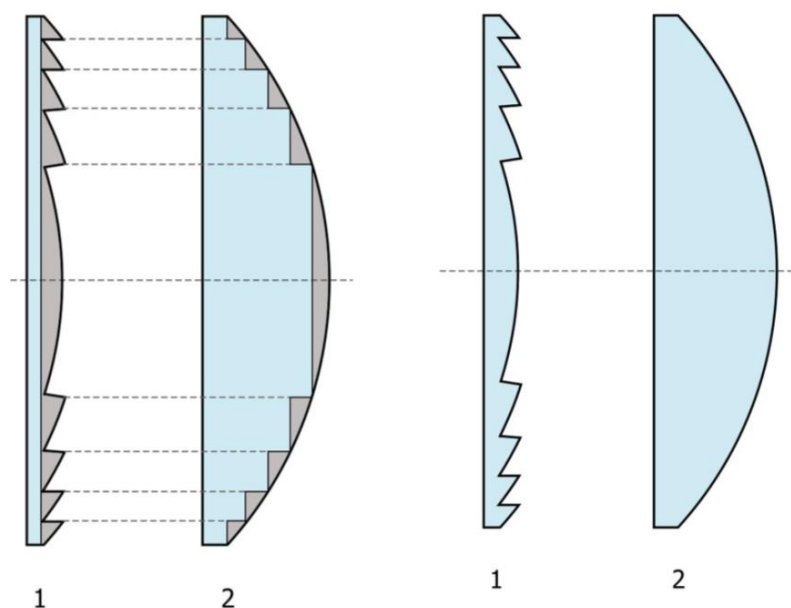


Figura 8 - Explicación gráfica del diseño de una lente Fresnel [6]

## Parábolas termosolares con doble reflector 4 - Estado del arte

Utilizando este mismo principio, se puede dividir una superficie reflectora en varias más pequeñas orientadas adecuadamente, para dirigir los rayos de luz incidentes hacia un mismo punto. Con esto, se puede concentrar la radiación solar incidente sobre una zona en otra de menor tamaño, utilizando pequeñas estructuras reflectoras orientables en vez de una sola mayor.

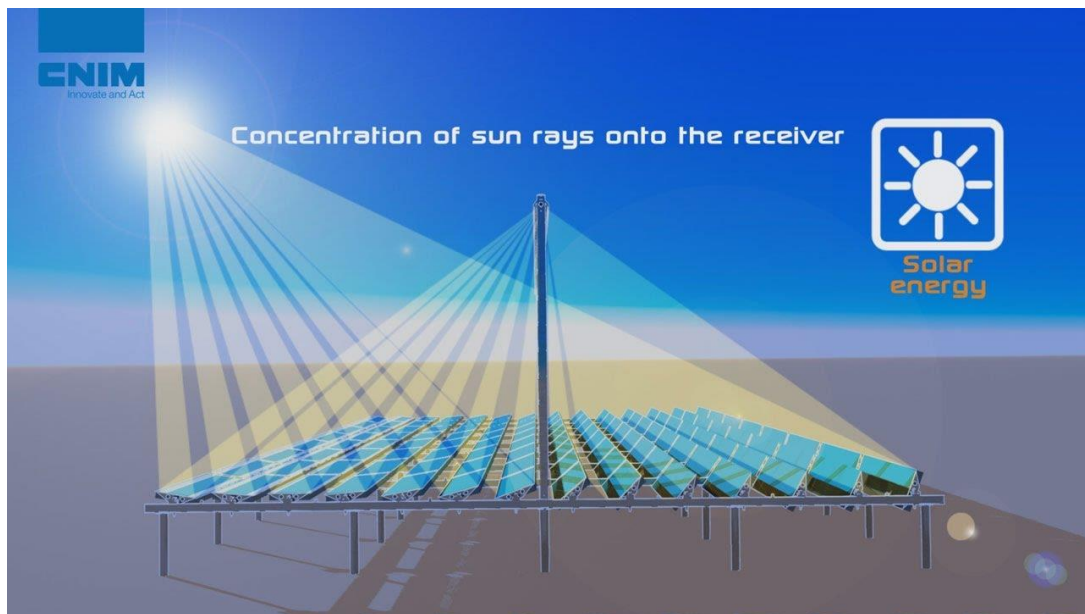


Figura 9 - Ejemplo de funcionamiento de un campo de reflectores Fresnel [7]

Este sistema tiene la ventaja de que simplemente ha de mover pequeñas estructuras para orientarlas en vez de una sola de mayor tamaño, con lo que se ahorra la energía que supondría tener en movimiento una sola pero pesada. Además, al ser los reflectores más bajos y pequeños, se evita que estén sometidos a las fuerzas que podría crear el viento sobre los mismos si fueran de mayor altura.

Como desventaja tiene que se ha de disponer de una tubería captadora de energía suspendida a una altura considerable, lo que obliga a tener una estructura alta y sometida a las fuerzas del viento; además de que al ser considerablemente larga la tubería, no podrá alcanzarse una alta temperatura en su interior debido a las pérdidas térmicas de la misma a lo largo del recorrido.

Además, en los reflectores también se cuenta con otra desventaja importante: que éstos han de estar en constante movimiento, ya que han de orientarse constantemente hacia el sol en un eje (en función de la altura del mismo respecto del horizonte).

Parábolas termosolares con doble reflector  
4 - Estado del arte

#### 4.4. CAMPOS DE HELIOSTATOS CON TORRE CENTRAL

Se basan en la aplicación del mismo principio que los reflectores Fresnel, pero perfeccionándolo; en este caso los reflectores no son longitudinales y se orientan en un eje (latitud), sino que son rectangulares de menores dimensiones y se orientan en dos ejes, para reflejar toda la luz en un mismo punto y no una línea.

A efectos prácticos, se aplica el principio de Fresnel doblemente sobre los reflectores, en el eje X y en el eje Y, lo que permite concentrar la luz muchísimo más y así alcanzar temperaturas mucho mayores, haciendo posible el aprovechamiento de la energía solar para la generación eléctrica a gran escala.



Figura 10 - Primera central solar termoeléctrica de campo de heliostatos instalada en el mundo [8]

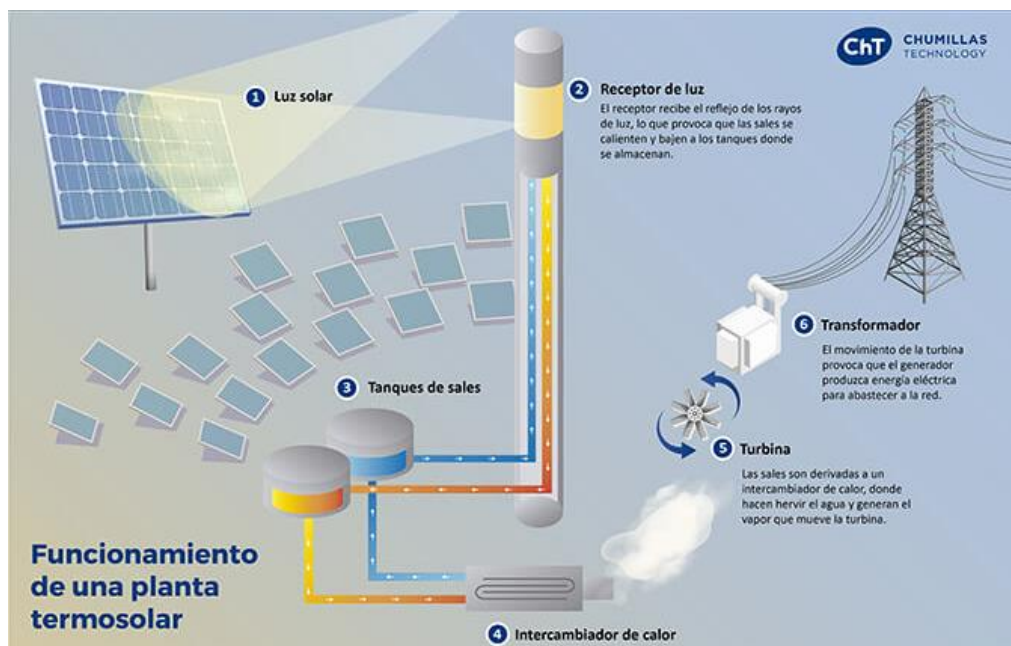


Figura 11 - Esquema de funcionamiento de una central eléctrica termosolar [9]

#### 4.5. CONCENTRADORES PARABÓLICOS LONGITUDINALES

En este tipo de captación se concentra la luz solar mediante espejos curvos, los cuales describen la forma de una parábola a lo largo de un cilindro y, por lo tanto, toda la luz incidente en ellos se refleja hacia una línea paralela al eje de dicho cilindro, la cual se encuentra en el foco de la parábola.

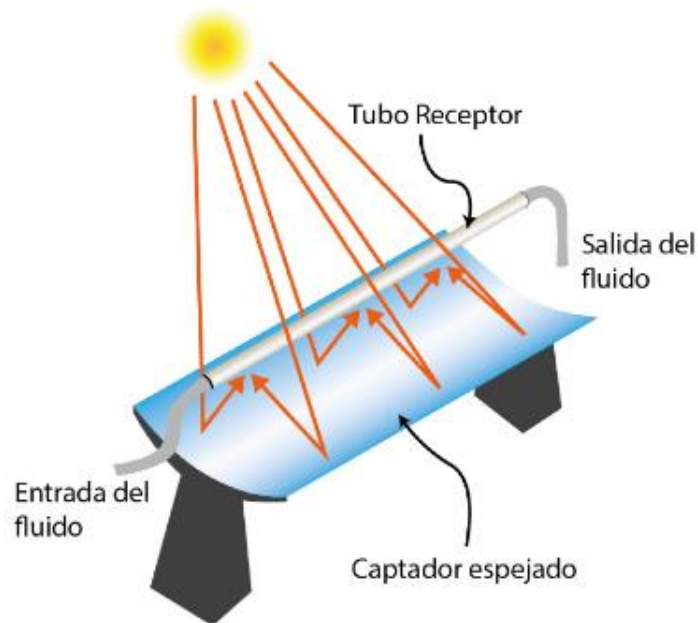


Figura 12 - Funcionamiento de un captador parabólico longitudinal [10]

Este sistema concentra la luz parcialmente, ya que los rayos incidentes se reflejan hacia una línea y no un punto, por lo que la temperatura obtenida no es ni tan baja como la de un captador no concentrador (como las placas termosolares), ni tan alta como la de una torre con campo de heliostatos, lo que permite disponer de un alto caudal de trabajo pero a una temperatura media.

A mayores, este sistema tiene el problema de la orientación, pero más grave que en el caso de los heliostatos: los heliostatos simplemente deben reflejar la luz solar hacia la torre captadora, pero no importa su situación ni posición mientras su ángulo respecto a los rayos solares sea el adecuado; aquí la situación y posición sí que importan, lo que da lugar a dos situaciones:

- 1) La tubería captadora es fija, por lo que el espejo parabólico debe moverse alrededor de ella, lo que obliga a **desplazar** constantemente toda la

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 4 - Estado del arte

estructura reflectora una distancia proporcional a la distancia focal de la parábola.

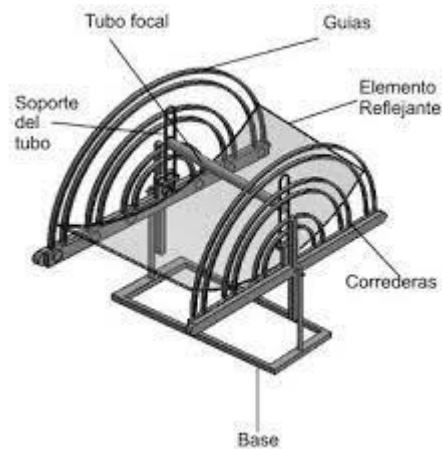


Figura 13 - Sistema de estructura reflectora móvil con tubería captadora fija [11]

En este caso, cuanto menor sea la distancia focal, menor será la distancia de movimiento necesaria, pero a la vez será mayor la apertura de la parábola para una misma superficie reflectora y, por lo tanto, menor la precisión de la misma enfocando el haz reflejado hacia la tubería.

- La tubería captadora es **móvil**, por lo que la estructura reflectora se mueve en conjunto con la tubería captadora y deja de importar la situación de las mismas (siempre va a ser la misma de una respecto a la otra), derivando toda la responsabilidad del funcionamiento del sistema únicamente hacia la orientación del conjunto, la cual se puede conseguir simplemente haciendo **pivotar** la estructura completa respecto de un eje, evitando así desplazamientos y, consecuentemente, consumo de energía.

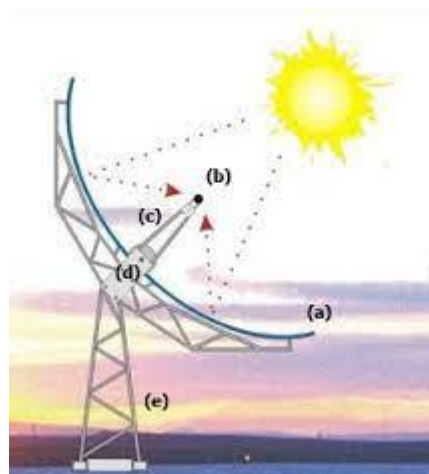


Figura 14 – Reflector parabólico con tubería captadora móvil [12]



## Parábolas termosolares con doble reflector

### 4 - Estado del arte

Por contra, este sistema tiene el problema de que la tubería móvil en algún momento debe unirse (por dos puntos) a una tubería fija que transportará el fluido de trabajo hacia donde sea necesario, lo que obliga a disponer o de un tramo de tubería flexible o de una junta rotativa móvil, ambas capaces de soportar las temperaturas y presiones de trabajo, además de situarse a la intemperie; al implicar ambos sistemas materiales que se desgastan o degradan con relativa rapidez, esto conllevará un incremento del coste de instalación y del mantenimiento necesario.

Los problemas derivados de estas dos situaciones se pueden solucionar situando un reflector secundario en el foco, y la tubería captadora en un punto fijo externo a la parábola; de manera que el sol, el foco de los dos reflectores y la tubería captadora estén siempre alineados (y superpuestos con el eje de las dos parábolas).

Con esto, la tubería captadora será fija, lo que evita la necesidad de uso de tramos flexibles o juntas rotativas por un lado; pero por otro, además posibilita que la estructura reflectora no tenga que desplazarse para orientarse, sino que simplemente deba pivotar sobre un eje, el cual se encontrará a la misma altura que la tubería captadora.

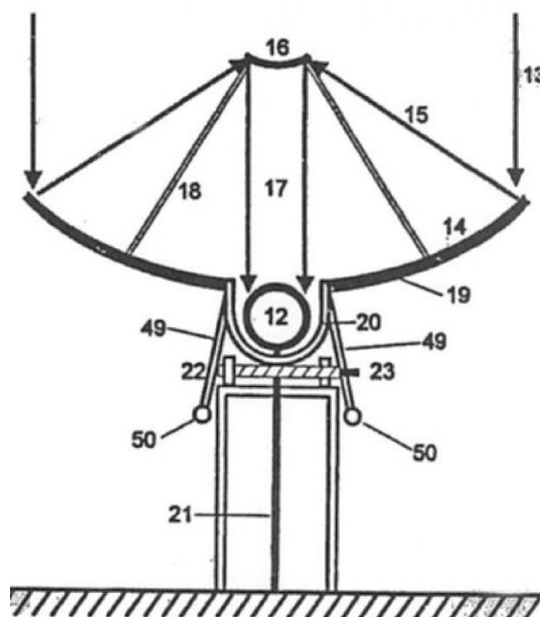


Figura 15 - Sistema patentado de captador parabólico longitudinal con doble reflector [13]

Parábolas termosolares con doble reflector  
4 - Estado del arte

## 4.6. CONCENTRADORES PARABÓLICOS CIRCULARES (PARABOLOIDES)

Este sistema utiliza de nuevo espejos parabólicos para concentrar la luz solar, pero en este caso son de revolución (paraboloides). Es un término medio entre un campo de heliostatos con torre y un captador parabólico longitudinal, por lo que ofrece parte de las ventajas de cada uno, pero a su vez, acarrea parte de los inconvenientes de ambos.

Se trata de una superficie reflectora, generalmente circular en su perímetro (forma más sencilla), pero de perfil parabólico; es decir, se ha creado a partir de una parábola a la que se le ha aplicado una revolución. Con esto, la luz solar incidente en la superficie reflectora es concentrada hacia un único punto situado en el foco de la parábola, en el cual se encuentra el captador térmico.

Este sistema debe estar siempre orientado hacia el sol tanto en latitud como en longitud, ya que de no estarlo no es que concentre menos luz, sino que directamente no concentra nada (ver apartado 5.1.2. “Necesidad de orientación de una parábola”).



Figura 16 – Concentradores solares parabólicos circulares [14]

Con este tipo de concentradores se pueden conseguir altas temperaturas de trabajo, pero debido a que se ha de disponer de una estructura móvil en dos ejes y

Parábolas termosolares con doble reflector  
4 - Estado del arte

ello limita su tamaño, no se pueden conseguir grandes caudales (en caso de utilizar un fluido caloportador).

A mayores, su gran desventaja es que debido a que toda la estructura ha de moverse para orientarse, es muy complejo y costoso disponer de un foco fijo y hacer desplazarse a la estructura reflectora alrededor de él, por lo que el captador situado en el foco se ancla a la estructura reflectora y se mueve en conjunto con ella; esto limita enormemente el tamaño y peso del captador, además de que reduce la generación de energía debido al coste que tiene el movimiento a mayores del foco y el captador que en él se encuentra.

Si se desea calentar un fluido, además de tener que colocar una caldera en el foco (con lo que ello conlleva en cuanto a peso), se ha de disponer de tramos flexibles de tubería o de juntas rotativas, en este caso doblemente, ya que el sistema se mueve en dos ejes, y todos esos elementos han de soportar, igual que en el caso de los captadores parabólicos longitudinales, las presiones y temperaturas de trabajo.



## 5. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

### 5.1. ORIENTACIÓN

Uno de los objetivos de este trabajo es el de conseguir un adecuado sistema de orientación, simplificando todo lo posible los ya existentes de cara a reducir tanto su coste de instalación como su mantenimiento.

En este apartado se trata todo lo relativo a la orientación hacia fuentes de luz a nivel general, y además se particulariza para captadores solares parabólicos.

#### 5.1.1 Concentración de luz mediante parábolas (teoría)

Una parábola es una curva matemática que contiene los puntos equidistantes entre una recta externa llamada directriz (**d**) y un punto interno llamado foco (**F**). A mayores, existe otra recta perpendicular a la directriz llamada eje (**e**), la cual divide a la parábola en dos mitades simétricas, y la corta en su punto medio llamado vértice (**V**).

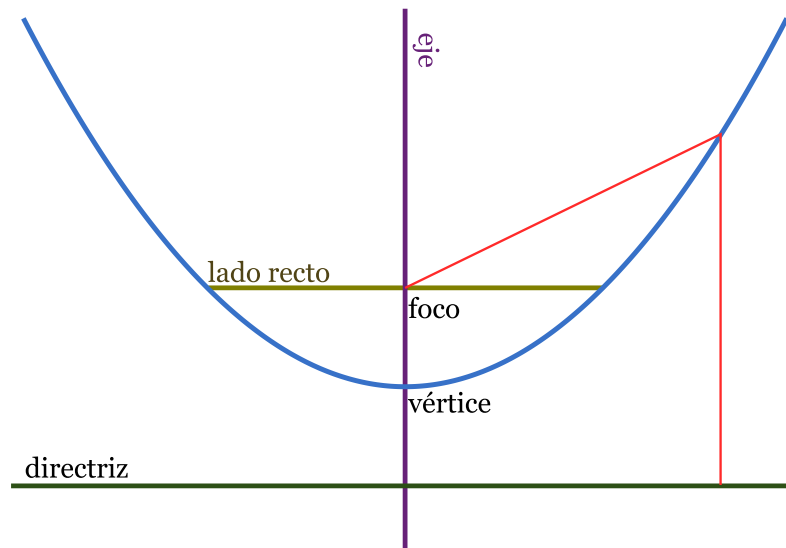


Figura 17 - Partes de una parábola [15]

Como en cualquier otra curva matemática, se denomina tangente a aquella recta que comparte con la curva un único punto. En la parábola, dadas las propiedades de su construcción, se da el hecho de que la recta tangente (**t**) hace de bisectriz en

Parábolas termosolares con doble reflector

5.1 – Orientación

el ángulo que forman la recta (a) entre el foco y el punto de tangencia (T), y la línea (b) que une el punto de tangencia con su proyección sobre la directriz (T').

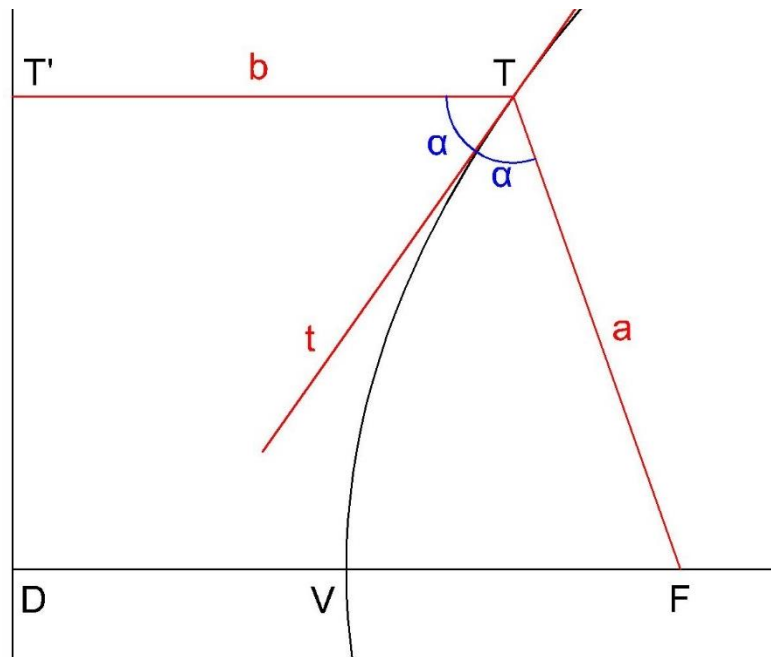


Figura 18 - Recta tangente a una parábola

Por razonamiento gráfico, si se prolonga la recta (b) hacia la parte convexa de la curva, se obtiene un ángulo agudo entre la recta (b) y la recta (a); dicho ángulo es bisecado por una recta perpendicular (p) a la recta tangente (t).

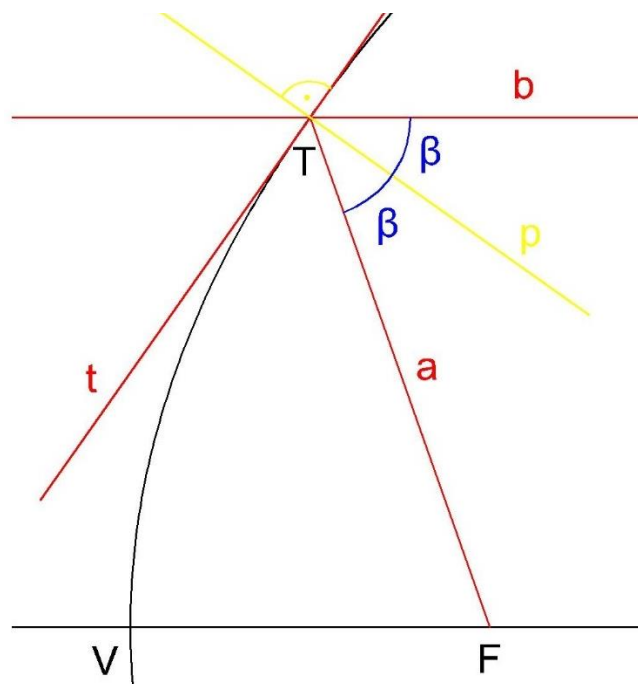


Figura 19 - Recta perpendicular a la tangente de una parábola

Parábolas termosolares con doble reflector

5.1 – Orientación

La luz tiene la propiedad de que al chocar contra un medio diferente al que se desplaza, es devuelta con un ángulo respecto del medio reflector igual a aquel con el que incide ( $\alpha = \beta$ ).

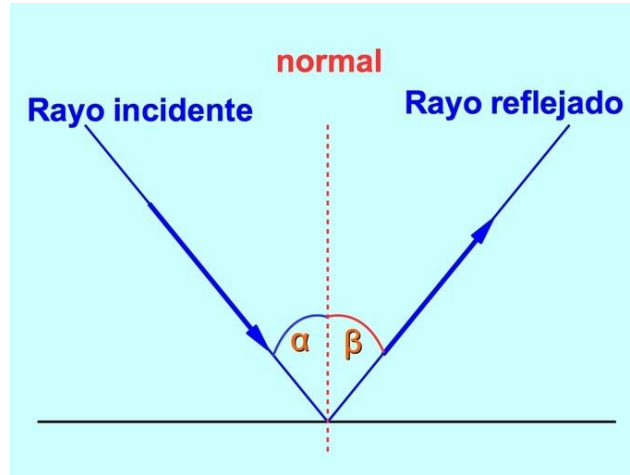


Figura 20 - Esquema explicativo de la reflexión de la luz [16]

Volviendo a las parábolas y teniendo la reflexión en cuenta, tomando la recta (**b**) como rayo incidente, la recta (**p**) como normal y la recta (**t**) como superficie reflectora, se obtiene que un rayo de luz paralelo al eje de una parábola (**b<sub>1</sub>**, **b<sub>2</sub>**) e incidente sobre ella, será reflejado (**a<sub>1</sub>**, **a<sub>2</sub>**) siempre hacia el foco (**F**) de la misma, independientemente de en qué zona de la parábola incida.

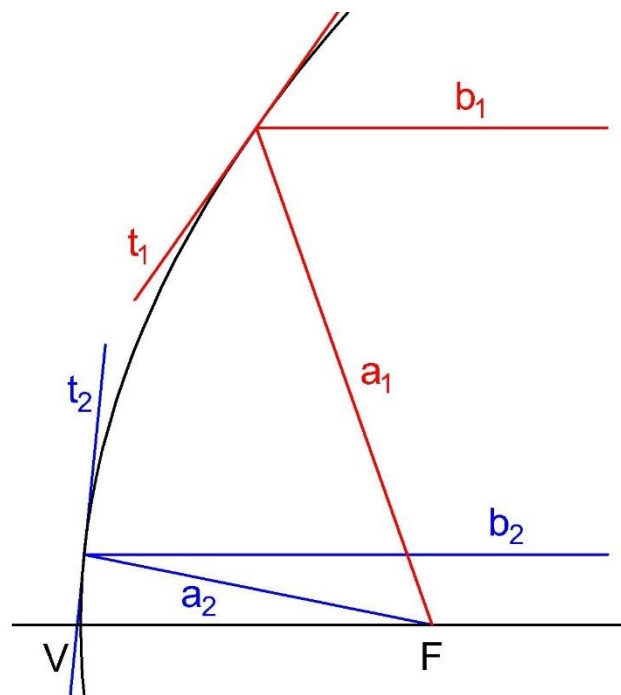


Figura 21 - Rayos de luz reflejados en una parábola hacia su foco

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

Basándonos en lo anteriormente expuesto y suponiendo un espejo parabólico (longitudinal o de revolución), toda la luz incidente sobre la superficie del espejo será reflejada hacia un mismo punto, el foco, lo que supone que en el foco se concentra toda la luz incidente en la superficie parabólica.

Viendo de perfil el espejo anteriormente supuesto, este se muestra como una parábola en dos dimensiones; y reduciendo el haz de luz incidente a sus dos rayos más externos, se puede ver gráficamente como la luz incidente se refleja hacia el foco y a continuación se vuelve a expandir, en este caso hacia el infinito.

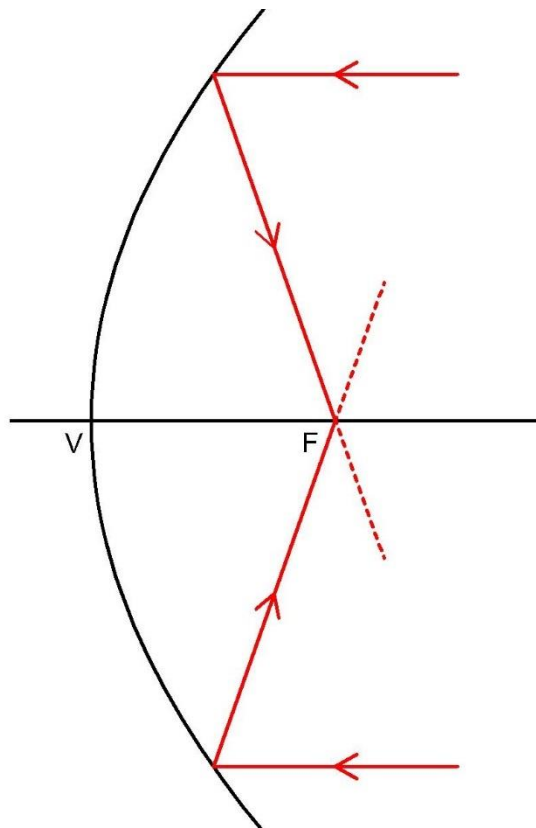


Figura 22 - Concentración de luz mediante una parábola

#### 5.1.2 Necesidad de orientación de una parábola

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, una parábola concentra en su foco la luz que la llega **paralela a su eje**; esto implica que cualquier sistema de concentración de luz basado en una forma parabólica solo concentrará la luz en su foco si ésta incide de manera **perpendicular a la directriz**. Se puede ver en la

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

siguiente imagen como un haz de luz no paralelo al eje (**verde**), no es concentrado en el foco ni en ningún otro sitio.

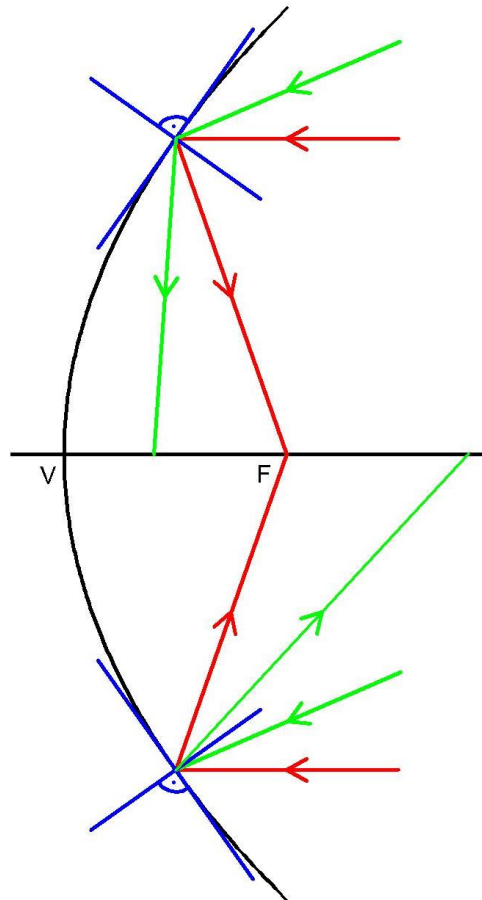


Figura 23 - Haz de luz orientado (rojo) y desorientado (verde)

Para llegar a esta conclusión, se ha tomado una tangente a la parábola y una normal a dicha tangente en el punto de incidencia del rayo de luz, aplicando las propiedades anteriormente explicadas de reflexión de la luz.

Si en vez de dos rayos desorientados aplicamos varios (paralelos), se puede comprobar como no se crea ningún otro foco o focos diferentes al original (zonas de concentración de luz parcialmente), por lo que queda demostrado que la luz no es concentrada eficientemente de ninguna manera.

Se ha aplicado el mismo procedimiento gráfico anterior para hallar los ángulos de reflexión de la luz en la siguiente imagen.

**Verde** → rayos incidentes, **morado** → rayos reflejados.

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

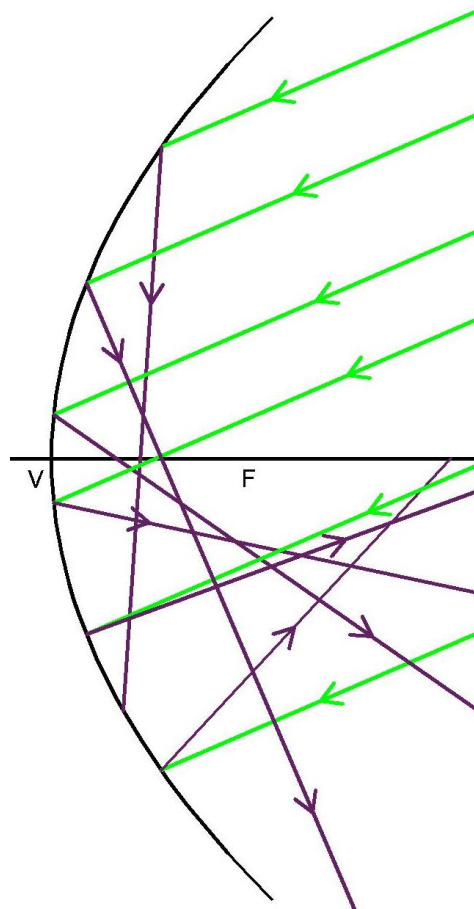


Figura 24 - Reflexión de rayos de luz no paralelos al eje de la parábola

A diferencia de un panel fotovoltaico el cual al estar desorientado genera menos energía, un sistema reflector parabólico no disminuye su rendimiento, sino que directamente no funciona. La respuesta de una parábola desorientada es, simplemente, no útil.

#### 5.1.3 Diseño de un sensor de dirección de luz (prototipo)

Una vez visto que la orientación de una parábola es imprescindible, es necesario diseñar un sistema apropiado para conseguirla. El sistema tiene tres elementos principales: sensor de dirección de luz (determina en qué dirección se encuentra la fuente de luz), controlador (decide hacia dónde se ha de mover el reflector) y actuador (mueve el sistema reflector para orientarlo, de acuerdo a las órdenes del controlador).

El actuador dependerá de muchos y muy diversos factores (tamaño del sistema, situación, disponibilidad de electricidad o aire comprimido, etc.), por lo que su

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

diseño deberá adaptarse a cada situación, lo que hace que carezca de sentido realizar un diseño exacto en este trabajo.

El controlador será también diferente en cada caso, dependerá básicamente del presupuesto con el que se cuente para la construcción del sistema, pero todos los diferentes modelos de controladores tendrán dos cosas en común:

- Se van a basar en dos datos de entrada: i) si el sistema está orientado o no, y ii) en caso de no estarlo, hacia dónde se encuentra la fuente de luz.
- Van a dar dos datos de salida: i) si el actuador ha de mover el reflector, y ii) hacia dónde ha de moverlo.

Esto hace que, independientemente del presupuesto, calidad o tamaño del controlador, todos van a utilizar las mismas entradas, mismas salidas, y mismo programa de control. Más adelante se desarrollará dicho programa y sistema.

En cada sistema, el actuador será diferente y el controlador similar, pero el sensor de luminosidad va a ser igual, por lo que en este caso sí que se ha decidido realizar y comprobar un diseño adecuado.

Este elemento cuenta con dos sensores diferenciados, los cuales son dos resistencias LDR que varían su resistencia interna en función de la luz que incida sobre cada una de ellas. Ambas están colocadas a 45 grados de inclinación sobre el sistema que se ha de orientar y, a su vez, a 90 grados entre ellas.

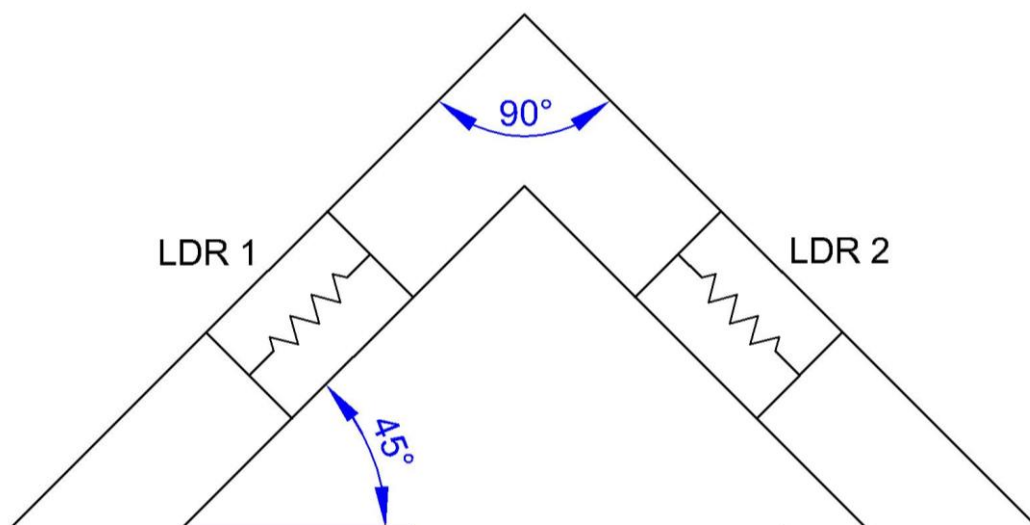


Figura 25 - Ángulos de las resistencias LDR del sensor de dirección de luz

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

Estos ángulos se han determinado óptimos ya que proporcionan un buen funcionamiento al sensor y, a su vez, simplifican en gran medida tanto el diseño como la construcción del mismo.

El funcionamiento del sensor se basa en que, al tener ambas resistencias la misma inclinación respecto del sistema a orientar, ambas recibirán la misma cantidad de luz si ésta incide de manera perpendicular, pero no será la máxima que pueden recibir (para eso tendrían que estar planas respecto del captador solar); como la inclinación de cada una es simétrica respecto de la otra, en caso de que la incidencia de la luz se desvíe de la normal (supuesta línea perpendicular al sistema a orientar), la misma cantidad de luminosidad que ganará una resistencia será la que perderá su opuesta, por lo que la diferencia entre ambas será doble y el funcionamiento del sensor más efectivo.

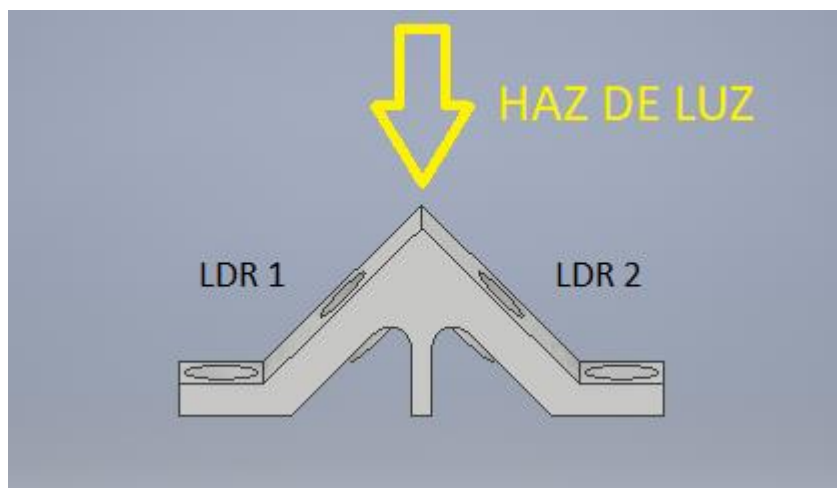


Figura 26 - Incidencia de un haz de luz orientado sobre el sensor

A mayores, dado que por encima de las resistencias hay una parte sólida del sensor, en caso de que la desviación del haz de luz respecto de la normal sea mayor de 45 grados, esa parte sólida (acabada en punta a propósito) dará sombra completamente al lateral de la resistencia correspondiente, provocando un aumento brusco de su resistencia interna y una actuación más rápida del sensor.

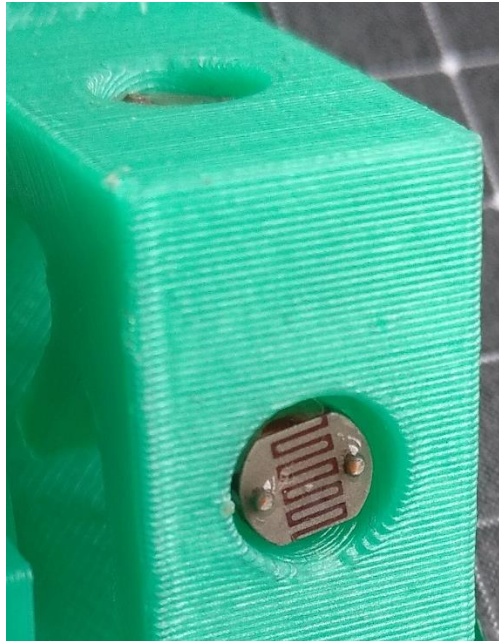
Para causar el mismo efecto pero no de manera brusca, sino proporcionada a la desviación del haz incidente, ambas LDR están 2 mm por debajo del nivel del sensor, de manera que cuando el sistema está desorientado, el borde del cilindro en el que están incrustadas las da sombra, una sombra que será directamente



Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

proporcional a la desviación sufrida, y acelerará la respuesta del sistema igualmente de manera proporcional a la desviación que tenga en cada momento.



*Figura 27 - Resistencias LDR incrustadas en el sensor*

Si se aumentase la inclinación de ambas LDR respecto del plano del sistema a orientar o su profundidad respecto del nivel del sensor, se obtendría una respuesta más rápida del sensor y con menos margen de error, pero también sería una respuesta más sensible a cambios puntuales de luminosidad (provocados, por ejemplo, por aves o insectos) y, sobre todo, más brusca, por lo que no se ha considerado necesario aumentar ni la inclinación ni la profundidad de las resistencias.

#### **5.1.4 Aplicación del sensor a la orientación en un eje**

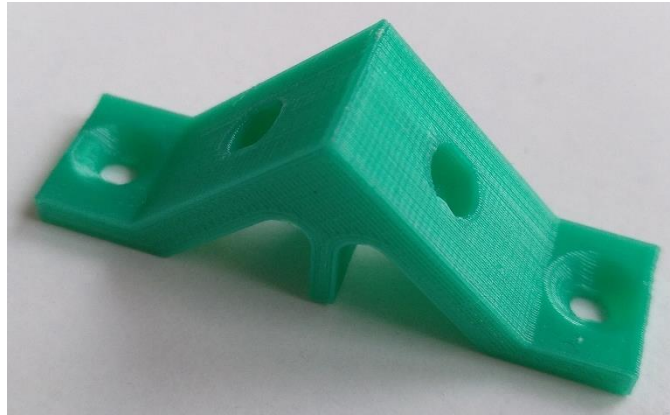
Una vez definido el funcionamiento y diseño del sensor de dirección de luz, se ha construido uno para probar su funcionamiento.

En una primera prueba bastante precaria, se construyó tanto un sensor como un pequeño panel solar simulado utilizando materiales reciclados tales como el cartón, y se pudo comprobar que la forma y el tamaño del sensor, así como su sistema de control, eran adecuados para conseguir la orientación del panel. No obstante, este primer prototipo tenía bastantes limitaciones debido a los materiales utilizados, por

Parábolas termosolares con doble reflector

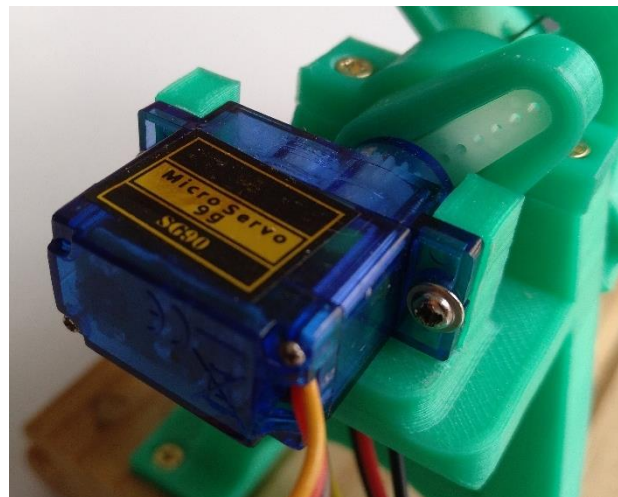
### 5.1 – Orientación

lo que se construyó un nuevo prototipo, esta vez ya imprimiendo todas las piezas con una impresora 3D, utilizando PLA como material de impresión.



*Figura 28 - Sensor de luminosidad impreso en 3D*

Dado que el único objetivo de este prototipo era comprobar el sistema de orientación y para ello no importa el tamaño del elemento a orientar, se ha decidido hacer un panel de 60 x 140 mm, de manera que es lo suficientemente grande como para ser visual y lo suficientemente reducido como para que se pueda mover con un pequeño servo (SG90).



*Figura 29 - Servomotor utilizado para el movimiento del panel*

El acople del servo con el eje del panel no es rígido, sino que tiene una pequeña holgura para evitar crear sobreesfuerzos debidos a un alineamiento no perfecto entre todas las piezas.

Se han diseñado y construido unas patas para soportar la estructura, las cuales en su parte inferior se han anclado a una madera que hace de base, y en su parte

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

superior hacen de cojinetes (junto con otra pieza a modo de tapa) para los ejes que soportan el panel móvil. A mayores, una de las patas dispone en su parte superior de una plataforma y unos orificios donde se ancla el servomotor.

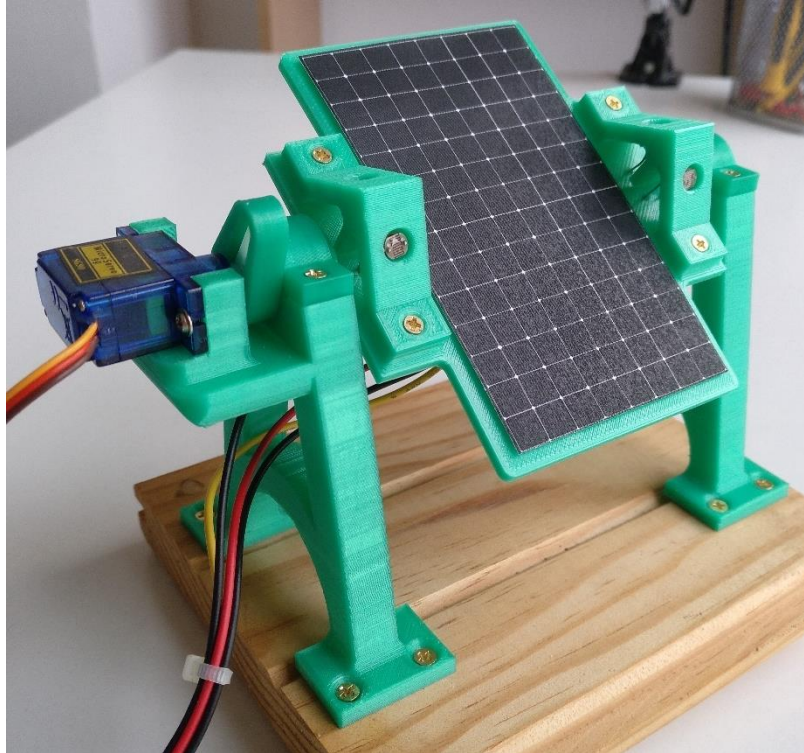


Figura 30 – Prototipo de panel solar orientable construido

El panel solar se ha equilibrado y pivota sobre su eje central por dos motivos:

- I) Facilitar el movimiento del servo, ya que al estar equilibrado solo debe vencer el rozamiento de los ejes y la inercia del panel, la cual no es apenas significativa debido al poco peso de las piezas móviles.
- II) Aumentar la vistosidad del sistema, ya que de esta manera, aparte de verse mejor su movimiento, puede describir un ángulo de  $180^\circ$  en vez de  $90^\circ$  solamente, lo cual nunca será necesario en un panel fotovoltaico real, pero ayuda a comprobar su funcionamiento.

Por otro lado, en el primer prototipo se comprobó que un solo sensor de luminosidad no proporciona una buena respuesta si el haz de luz incidente no está orientado en la misma dirección de longitud, esto es debido a que la inclinación y profundidad de las LDR que con incidencia recta aumentan la respuesta del sistema, la disminuyen con una incidencia lateral.

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

Con una incidencia lateral se crean sombras en las dos LDR del sensor, proporcionales a la desviación lateral del haz incidente (la cual no se va a corregir porque la orientación es solamente en latitud), pero dichas sombras son de igual tamaño en ambas LDR, lo que además de no aportar nada a la orientación, disminuye la superficie efectiva de cada resistencia en gran medida.

Una resistencia LDR tiene una respuesta exponencial decreciente, de tal manera que la relación entre la luz que recibe y su resistencia interna no es lineal; esto se puede comprobar en la siguiente tabla de elaboración propia:

Tabla 1 - Resistencia de una LDR en función de la luminosidad

Medida Luxómetro (Lúmenes)	Resistencia LDR (k $\Omega$ )	Lugar
0	<i>Fuera de rango</i>	Debajo armario
0	135	Dentro cajón
20	105	Chaqueta negra
30	33,8	Pasillo sin luz
50	22,3	Debajo mesa
60	14	Pasillo normal
140	11	Pasillo con luz
200	5,56	Ambiente clase
600	2,7	Fondo clase
2.330	1	Ventana pasillo
4.310	0,8	Ventana clase

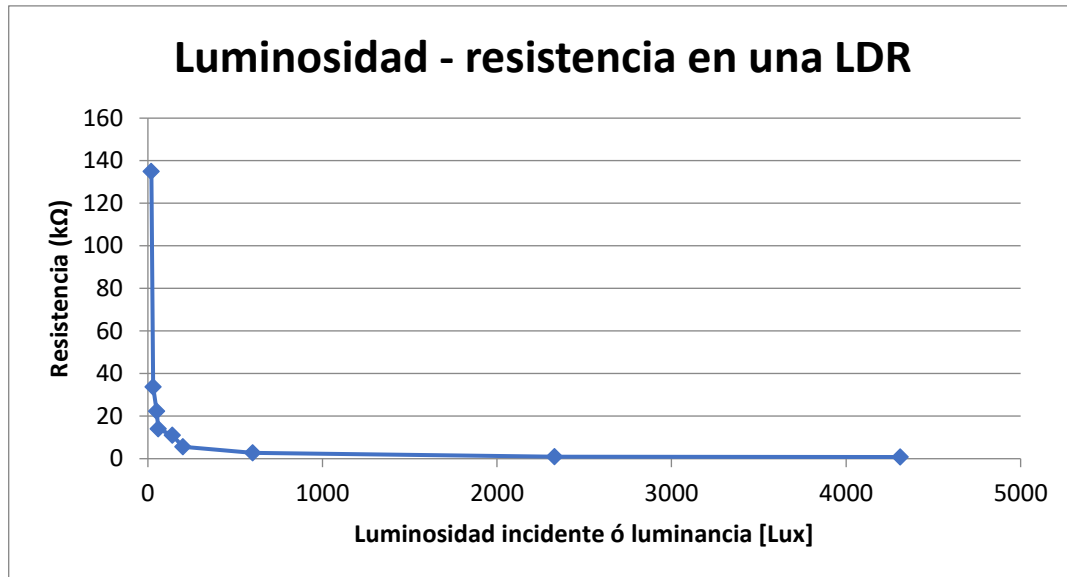
Estas medidas se han tomado en el laboratorio B2 de electrónica de la Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial, con el luxómetro presente en dicho laboratorio, el cual está calibrado.

Se han buscado diferentes emplazamientos con diferentes niveles de luminosidad para ir comprobando la luminosidad de cada emplazamiento a la vez que la resistencia interna de una LDR situada junto al sensor del luxómetro.

De esta manera, se comprueba que una resistencia LDR **disminuye su resistencia** interna cuanto más **umenta la luz** externa que recibe.

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación



Gráfica 1 - Resistencia en función de la luminosidad incidente en una LDR

Volviendo al sensor de dirección de luz, la respuesta que éste nos da es analógica, ya que lo que mide el controlador es la diferencia de resistencia entre las dos (o más) LDR; pero el programa de control no necesita saber cuánta desviación tiene el haz de luz incidente, sino solamente si está desorientado o no. Esto implica que, aunque tengamos una respuesta analógica (0 -  $\infty$ ), el tratamiento de la señal es digital (0 – 1), por lo que el sistema de control deberá leer la respuesta del sensor y decidir que, a partir de un determinado valor analógico, debe tomarlo como un 1 digital y actuar.

El hecho de que la respuesta del sensor de luz sea exponencial provoca un problema y un beneficio:

- Como problema, que la resistencia aumenta en una escala muy grande con la oscuridad, lo que provoca que si una parte de las dos resistencias queda en sombra (aunque no llegue a ser ni la mitad de la superficie de la LDR), su resistencia aumenta lo suficiente como para ser más significativa que lo que pueda variar por la parte que está en luz, haciendo ineficiente el sensor.
- Como beneficio, que es mucho más sencillo tomar la respuesta del sensor como digital, ya que la resistencia pasa de un nivel alto a un nivel bajo con mucha facilidad.

Pero en este caso, el beneficio permite solucionar el problema colocando más de un sensor.



## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

En función de la configuración que se adopte para la conexión de varios sensores, las respuestas serán más o menos efectivas:

Tomando como valores de ejemplo la luminosidad de un “pasillo sin luz”, **33'8 kΩ**, y del “fondo de la clase”, **2'7 kΩ** (ver tabla 1), ya que son valores distantes pero no extremos que representan cada lado del sensor respectivamente (suponiendo la incidencia de un haz de luz desorientado), la diferencia de resistencia en una LDR entre uno y otro es de **31'1 kΩ**. Como lo importante no es el valor absoluto, sino el relativo, se debe tener en cuenta que la diferencia será del **92,01 %**.

Si en vez de una LDR tenemos dos conectadas en **serie**, la diferencia de resistencia será de  $67'6 - 5'4 = 62'2 \text{ k}\Omega$ . En este caso, un **92,01 %**.

En cambio, en el caso de conectarlos en **paralelo**, la diferencia será de  $15'55 - 1'35 = 14'2 \text{ k}\Omega$ . Diferencia del **91,31 %**.

Se puede comprobar como en serie la diferencia de resistencia relativa es igual que con una sola LDR y en paralelo es algo menor, pero con una oscilación despreciable, por lo que, para un funcionamiento normal, no importa si la conexión de varios sensores se hace en serie o paralelo.

Pero si se tuviera el caso de una incidencia lateral del haz de luz y, por lo tanto, una parte de las resistencias LDR quedase en sombra (p. ej. 1/3 de la superficie de la resistencia), habría que tomar cada LDR como dos resistencias independientes: una **fija** y de alto valor (parte en **sombra**) y otra **variable** (parte **funcional**).

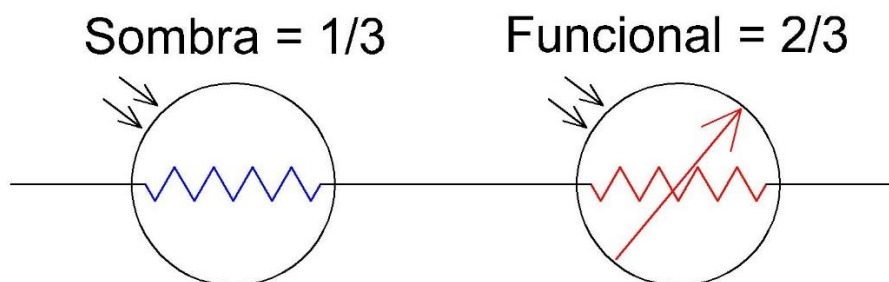


Figura 31 - Modelización de una LDR con 1/3 de su superficie en sombra

Tomando los mismos valores de ejemplo anteriores, la parte en sombra tendría un valor fijo de  $33,8 \cdot 1/3 = 11,26 \text{ k}\Omega$  y la parte funcional oscilaría entre  $33,8 \cdot 2/3 = 22,53 \text{ k}\Omega$  y  $2,7 \cdot 2/3 = 1,8 \text{ k}\Omega$ .

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

Tomando de nuevo del “pasillo sin luz” como zona oscura y el “fondo de clase” como zona iluminada, con una sola LDR habría una diferencia de  $(11,26 + 22,53) - (11,26 + 1,8) = 20,73 \text{ k}\Omega$ , es decir, un **61,34 %**.

Si en vez de una se tuvieran dos resistencias conectadas en serie a cada lado del sensor (o dos sensores), la diferencia sería:

Lado en sombra:  $(11,26 + 22,53) \cdot 2 = 67,6 \text{ k}\Omega$

Lado con luz:  $(11,26 + 1,8) \cdot 2 = 26,12 \text{ k}\Omega$

Diferencia en serie:  $67,6 - 26,12 = 41,48 \text{ k}\Omega \rightarrow \mathbf{61,36 \%}$

En cambio, en el caso de tener las resistencias o sensores en paralelo, la diferencia sería:

Lado en sombra:  $(11,26 + 22,53) \parallel (11,26 + 22,53) = 16,9 \text{ k}\Omega$

Lado con luz:  $(11,26 + 1,8) \parallel (11,26 + 1,8) = 6,53 \text{ k}\Omega$

Diferencia en paralelo:  $16,9 - 6,53 = 10,37 \text{ k}\Omega \rightarrow \mathbf{61,36 \%}$

De estos cálculos se obtienen dos conclusiones:

- Por un lado, si inutilizando una tercera parte de la resistencia por sombra la diferencia disminuye del 90 al 60 %, queda demostrado que el hecho de tener una parte en sombra en la resistencia LDR disminuye considerablemente la efectividad del sensor.
- Tanto en serie como en paralelo, las diferencias relativas de resistencia se pueden tomar como si fueran exactamente las mismas, ya que la diferencia que puede llegar a haber entre ellas es despreciable.

Si se tiene en cuenta únicamente la medida del valor de la resistencia de cada sensor, **es irrelevante colocar uno o más sensores**, de igual manera **que también lo es conectarlos en serie o en paralelo**.

Por otro lado, se ha de tener en cuenta que, como con altos niveles de luminosidad la resistencia disminuye hasta niveles bastante bajos ( $< 1 \text{ k}\Omega$ ), la corriente que circula por las resistencias del sensor puede elevarse hasta niveles que pueden poner en riesgo la integridad física de la propia LDR por calentamiento, por lo que



## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

se debe colocar una resistencia fija en serie con cada LDR para que en caso de que la resistencia variable disminuya, la fija compense dicha disminución y limite la corriente.

Para una tensión de alimentación de 5 voltios, se ha comprobado que una resistencia de 1 kΩ permite que la corriente no aumente demasiado y, a la vez, tampoco es lo suficientemente alta como para que haga despreciable la resistencia del sensor y anule así su funcionamiento.

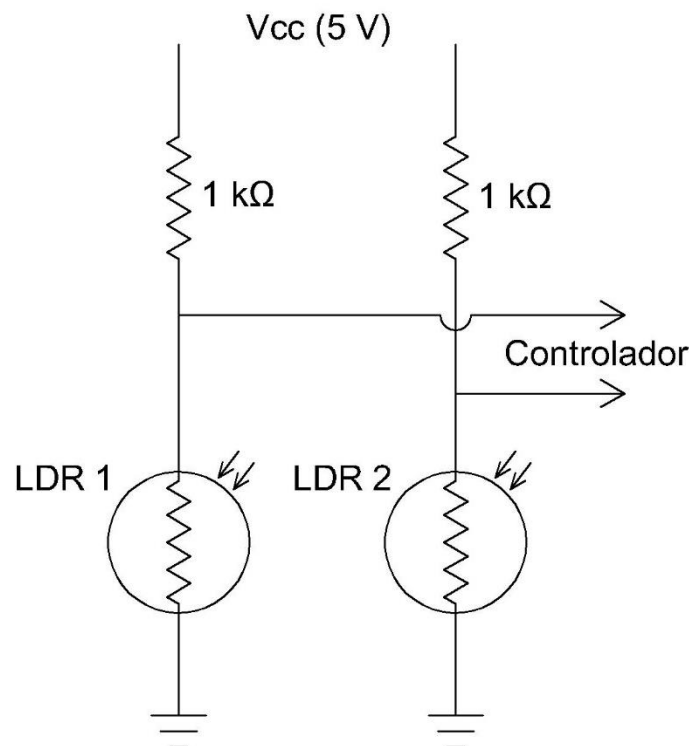


Figura 32 - Resistencias LDR de un sensor y resistencias limitantes de corriente

Suponiendo que la resistencia de la LDR llegase a ser nula (cortocircuito), ya fuera por exceso de luminosidad o por fallo de uno de los sensores, quedaría la resistencia limitante como única en el circuito. En este caso (peor posible), la corriente circulante sería:

$$i = \frac{v}{R} = \frac{5}{1.000} = 0,005 \text{ A} = \mathbf{5 \text{ mA}} \quad (5.1)$$

Y, por ende, la potencia disipada en la resistencia sería:

$$P = V \cdot i = 5 \cdot 0,005 = \mathbf{0,025 \text{ W}} \quad (5.2)$$

Parábolas termosolares con doble reflector

5.1 – Orientación

Las potencias de trabajo de las resistencias electrónicas van desde 1/8 W hasta varios vatios (a partir de 5 W ya son cerámicas), pero las más comunes son las de 1/8 y 1/4 de vatio; por lo que, para poder utilizar cualquier resistencia comercial en el circuito diseñado, cada una ha de disipar como mucho 0,125 W.

En el peor de los casos, las resistencias limitantes estarían disipando un 20% de su capacidad, por lo que el valor de **1 kΩ** es válido.

Ahora bien, teniendo en cuenta el circuito completo con la resistencia limitante, se puede calcular la diferencia de tensión que medirá el controlador entre la o las resistencias de un lado del sensor y del otro.

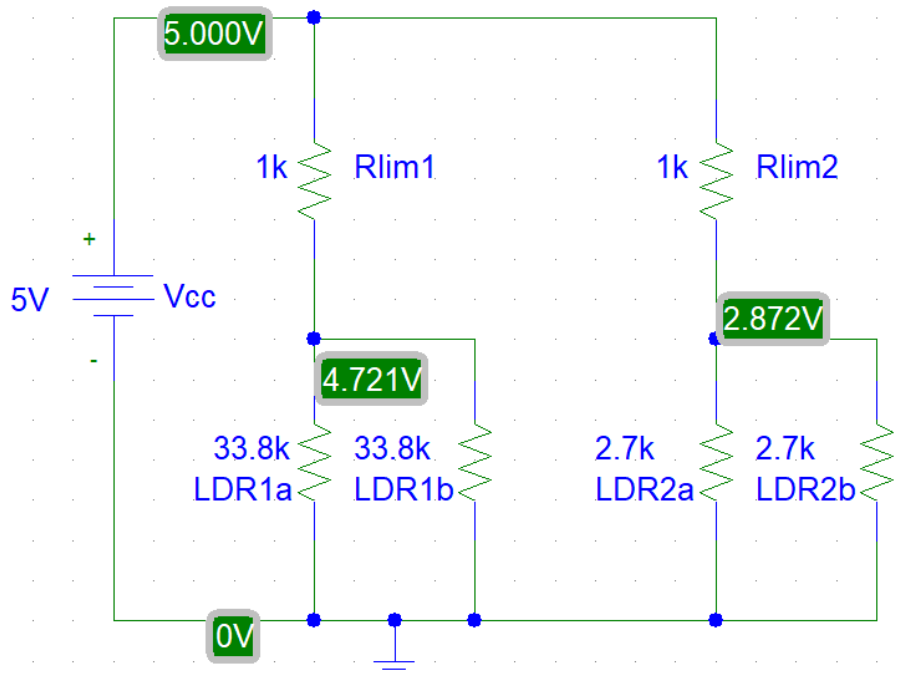


Figura 33 - Ejemplo de cálculo de la caída de tensión en dos sensores en paralelo

Para realizar los cálculos eléctricos de la tabla siguiente, se ha utilizado el software Pspice Schematics:

Tabla 2 - Diferencia de tensión en el sensor medida por el controlador

Sensores	Diferencia de tensión entre LDR [V]		
	Sin sombras	LDR con 1/3 de sombra	% Diferencia
<b>Un solo sensor</b>	1,207	0,212	82,43
<b>2 en serie</b>	0,708	0,111	84,32
<b>2 en paralelo</b>	1,849	0,385	79,17

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

Si del análisis de los supuestos anteriores, teniendo en cuenta únicamente la resistencia de las LDR, se obtenía que no importaba el hecho de colocar uno o varios sensores, ni conectarlos en serie o paralelo, ahora analizando la tensión que cae en cada sensor y que es la que va a medir el controlador, se pueden reformular las conclusiones anteriormente obtenidas:

- Teniendo un tercio de sombra en cada LDR, la diferencia de la medida de la tensión entre una y otra LDR no disminuye un tercio como hacía la resistencia, sino que oscila en torno al 80% (ver tabla 2), lo que da cuenta del problema que suponen las sombras parásitas en los sensores.
- El controlador mide una tensión analógica en un rango entre 0 y 5 voltios, por lo que cuanto más se acerque la diferencia de tensión medida en las resistencias a los 5V, mejor se aprovechará el rango y mayor precisión tendrá el controlador, es decir, interesa que la diferencia de tensión entre LDR sea lo más alta posible, y eso se consigue colocando los sensores en **paralelo** (ver tabla 2).
- En el caso de sufrir en los sensores sombras parásitas, si hay dos en paralelo el efecto es menor que si hay uno solo, y a su vez menor que si hay dos en serie.

Teniendo en cuenta la diferencia de tensión medida por el controlador, la **mejor opción** consiste en colocar dos o más sensores en **paralelo**; por otro lado, para nada es buena opción colocar sensores en serie.

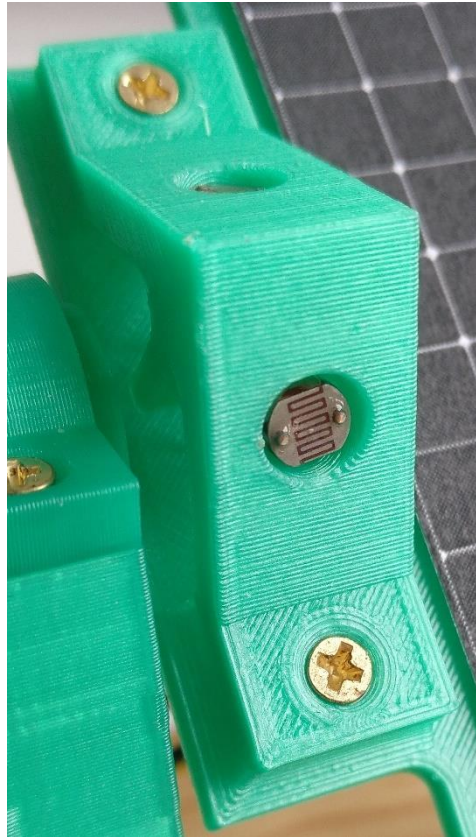
A mayores de los cálculos y razonamientos realizados, cabe destacar que **es mucho más sencillo conectar varios sensores en paralelo** (3 conductores por sensor directos al controlador) que en serie (4 conductores por sensor a conectar entre sensores), ya que se necesitan menos conductores y el negativo se puede sustituir en todos los sensores por la masa de la propia instalación, ahorrando incluso un conductor más por sensor. Esto, en instalaciones de gran tamaño, puede suponer un ahorro en conductores muy considerable.

Es por estos motivos que en el segundo prototipo realizado se ha decidido instalar **dos** sensores de dirección de luz (ver figura 30), uno a cada lado del panel; y tal y como se ha demostrado aquí teóricamente, se ha podido comprobar de manera

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

empírica que el funcionamiento del sistema mejora considerablemente, sin apenas aumentar la complejidad de las conexiones.



*Figura 34 - Detalle de uno de los sensores de dirección de luz instalados*

Con el objetivo de que esta investigación pueda ser reproducible, todas las medidas de todas las piezas diseñadas e impresas en 3D para la construcción del prototipo, se pueden ver en el **Anexo II – Apartado 1** (8.2.1).

#### 5.1.5 Sistema de control de la orientación con microprocesador

Como sistema de control de la orientación asequible y moderno, está el uso de un microprocesador, el cual es programable y, por lo tanto, modificable de manera sencilla en caso de que se necesite algún cambio.

Un microcontrolador va a trabajar con la diferencia de tensión entre las LDR de un lado y del otro del sensor (si hay varios sensores, éstas se conectarán en paralelo, pero la caída de tensión se medirá como si hubiera una sola), pero la electrónica interna del microcontrolador no puede leer dicha diferencia directamente, ya que

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

las entradas analógicas (al igual que las digitales) utilizan como referencia la masa de la alimentación, y la diferencia de tensión entre LDR utiliza una de ellas como diferencia. Esto obliga a elegir entre dos opciones:

- I) Por un lado, se puede utilizar un amplificador operacional con sus entradas inversora y no inversora conectadas a ambas LDR junto con más componentes electrónicos, para ofrecer al controlador una tensión que sí que tenga como referencia la masa general. Esta opción es poco apropiada si se está utilizando un microcontrolador, ya que el uso a mayores de componentes electrónicos complica y encarece el sistema, además de aumentar el consumo eléctrico.
- II) Por otro lado, se puede medir la tensión que cae en cada LDR independientemente (con referencia a masa en cada una de ellas), y restar una de la otra ya a nivel interno en el programa de control, de manera que solamente es necesario el uso del propio controlador. Esta será la opción elegida.

Tal y como se estableció en el anterior apartado, se pueden utilizar diferentes tipos de controladores, pero todos ellos van a compartir la misma estructura de programación:

- ✚ Lectura de la tensión de ambas LDR.
- ✚ Resta de una respecto de la otra.
- ✚ Si la diferencia supera la tolerancia establecida, el sistema se considera desorientado.
- ✚ En función de si la diferencia es positiva o negativa, el sistema se debe orientar hacia un lado u otro.
- ✚ Orden al actuador para que modifique la posición del sistema.

Con esto, se puede hacer el programa de control de orientación en cualquier tipo de controlador.

Dado que esta investigación se realiza en el ámbito educativo, se ha utilizado un controlador asequible, fácilmente adaptable a cualquier tipo de sistema y relativamente sencillo de utilizar: Arduino UNO.

En el **Anexo I – Apartado 1** (8.1.1) se encuentra el programa completo utilizado para el control de la orientación del prototipo.

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

Como entradas se han utilizado tres: dos para las LDR y una para un potenciómetro regulable manualmente, a través del cual se establece la tolerancia; ésta se ha decidido establecer de este modo ya que el prototipo se ha probado en diferentes entornos y en cada uno ha habido que ajustar la tolerancia; además, de cara a exhibiciones, es muy práctico poder regularla de manera manual para demostrar que si se reduce al mínimo, debido a las imperfecciones mecánicas del sistema y de los componentes electrónicos, la respuesta deja de ser fija y se vuelve oscilante, dejando así de ser útil.

Como salidas se ha utilizado solamente una, ya que el servomotor se alimenta a parte por seguridad. Esta salida proporciona una señal PWM de 50 Hz de frecuencia y ancho de pulso entre 0,5 y 2.5 ms de duración, rango que se corresponde con el rango de amplitud angular del movimiento del servomotor, el cual es 0 – 180° [17].

La alimentación del Arduino se realiza a través del puerto USB del ordenador, pero también se podría hacer con una tensión externa de entre 7 y 12 voltios por su entrada correspondiente. Para los sensores y el servomotor, la alimentación es externa a 5 voltios.

Se puede ver en el **Anexo III – Apartado 1** (8.3.1) el esquema eléctrico completo del sistema de control de la orientación del panel con microcontrolador.

#### **5.1.7 Diseño de un sensor aplicable en exteriores**

Hasta ahora, los sensores utilizados estaban preparados para un uso en prototipos con un fin únicamente investigador y expositor, ya que no soportan ni grandes cantidades de polvo ni humedad, lo que impide su uso continuado a la intemperie.

Como en esta investigación no se dispone ni del presupuesto ni del tiempo necesario, no se ha podido montar a escala real nada de lo diseñado, salvo un sensor de luz. Esta pieza es lo suficientemente pequeña como para ser manejable, y a la vez permite un montaje real con un bajo coste, por lo que se ha llevado a cabo.

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

Para minimizar los costes de fabricación y los tiempos de montaje, el sensor se compone únicamente de dos piezas: una **base** que permite sujetarlo a cualquier superficie, y una **carcasa** superior que en su interior contiene el resto de componentes, ésta se une a la base con dos tirafondos.

El objetivo principal ha sido aislar los conductores, los componentes electrónicos y las conexiones entre ellos de los agentes ambientales, para hacer posible un uso en exteriores. Se ha rediseñado la carcasa para poder encajar en ella dos placas de vidrio que protegen las resistencias LDR y, a su vez, permiten el paso de la luz sin dispersarla (por este motivo se ha buscado un material completamente transparente y no translúcido). Estas placas se han sellado a la carcasa con silicona.



*Figura 35 - Placa de vidrio cubriendo la resistencia LDR*

En el interior, para asegurar una buena sujeción de las resistencias y que nada pueda doblar o hacer contacto con las patillas de cada LDR (partes muy delicadas debido a que van desnudas y son muy endebles), las resistencias se han soldado a una placa electrónica, y a esa misma placa se la han soldado los conductores que posteriormente se conectarán a las comunicaciones con el controlador.



## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

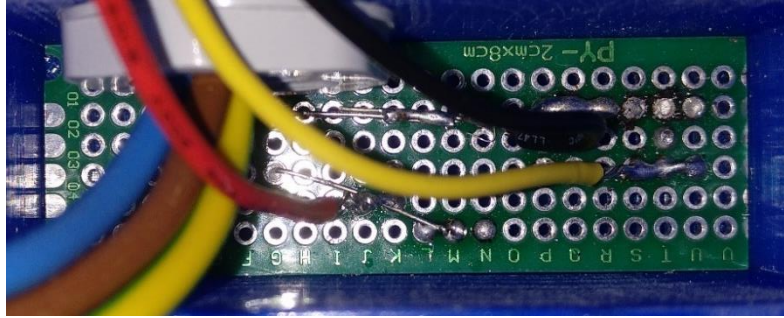


Figura 36 - Placa electrónica y conductores soldados, visto desde su parte inferior

La placa va simplemente asentada en la carcasa en un borde plano de 2 mm por su parte superior, y para evitar el uso de tirafondos, la sujeción completa se logra con dos “columnas” que desde la base sujetan la placa contra la carcasa. Por encima de la placa hay un espacio hueco, pero sellado por la propia placa, con lo que se evita que puedan introducirse accidentalmente los conductores por una mala colocación al montar el sensor.

Los conductores que van soldados al sensor tienen una longitud corta, la justa para permitir su conexión al cable externo con una clema u otro tipo de conector. Tal y como se puede apreciar en la anterior imagen, se cuenta con tres conductores: uno de color negro que es el conductor de masa, y dos de colores diferentes (en este caso, rojo y amarillo) que se corresponden con la conexión a cada LDR.

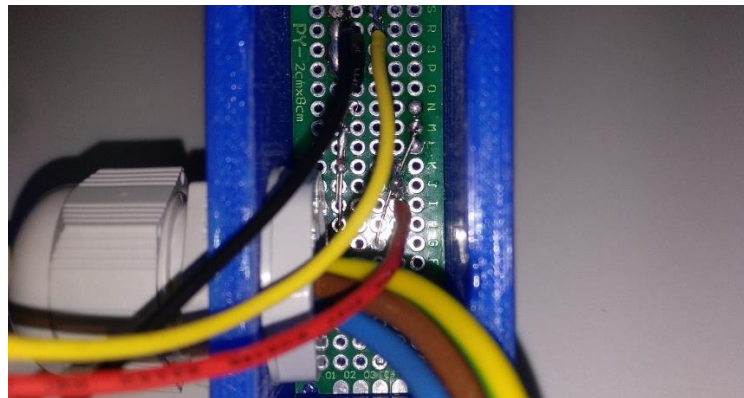


Figura 37 - Cables del sensor

Para que el acceso del cable de comunicaciones al sensor no sea una vía de entrada de polvo o humedad, la carcasa cuenta con un orificio de 16 mm de diámetro, medida normalizada para la colocación de un tubo corrugado apto para tres hilos de 1,5 mm<sup>2</sup> (necesitaría sellarse con algún material como silicona) o un prensaestopas apto para manguera de tres hilos de 1,5 mm<sup>2</sup> de sección (opción

Parábolas termosolares con doble reflector

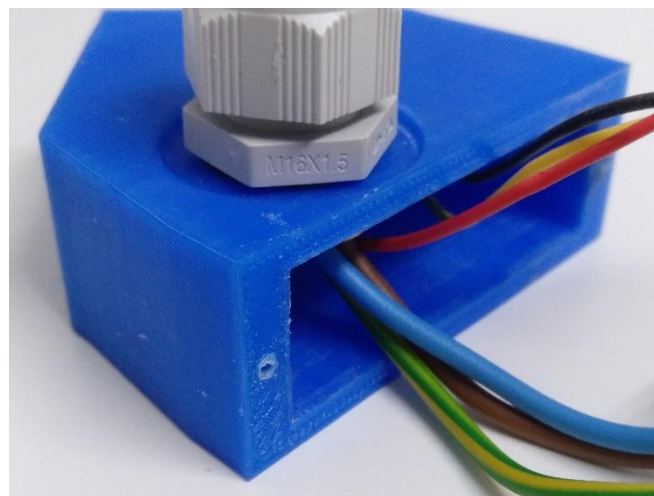
### 5.1 – Orientación

recomendada, ya que cuenta con una junta de goma y no necesita la aplicación a mayores de ningún material sellante).



*Figura 38 - Prensaestopas utilizado*

La carcasa cuenta con el suficiente hueco en su interior como para que se puedan recoger los conductores y su conexión una vez está montado el sensor.

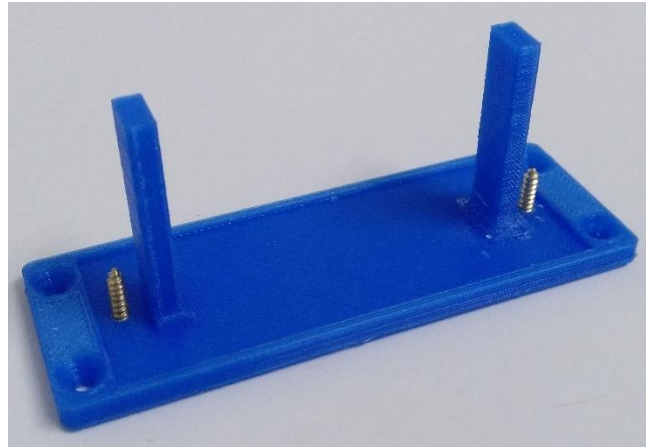


*Figura 39 - Carcasa vista desde su parte inferior*

Y, por último, la base del sensor cuenta con seis orificios: cuatro de ellos en sus extremos y avellanados por la parte superior, para sujetarla con tirafondos o tornillos al elemento que se vaya a orientar hacia el sol; y otros dos algo más centrados, avellanados por la parte inferior, para unir firmemente la base a la carcasa con dos tirafondos.

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación



*Figura 40 - Base del sensor*

Para asegurar una unión estanca, se debe colocar una junta de goma entre las dos piezas o aplicar un sellante tal como silicona, lo cual queda a elección del montador.

Cabe destacar que este sensor se ha construido en PLA ya que es el único material que se ha podido utilizar en esta investigación, pero un modelo real debería estar fabricado en materiales que sean igualmente baratos y fáciles de utilizar en moldes, y que a su vez sean capaces de soportar la irradiación continuada de la luz solar y los cambios de temperatura; esto se conseguiría con aluminio (más resistente) o calamina (aleación de zinc, plomo y estaño que permite su inyección en moldes).



*Figura 41 - Sensor de luz completamente montado*

Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.1 – Orientación

En el **Anexo II – Apartado 2** “Sensor de dirección de luz apto para exteriores” (8.2.2), se pueden consultar todas las medidas y dimensiones utilizadas en el diseño de este sensor.

### 5.1.8. Orientación en dos ejes

Tal y como se ha explicado en el apartado “5.1.2. Necesidad de orientación de una parábola”, cualquier sistema de captación de energía solar, basado en espejos parabólicos, necesita estar orientado hacia el sol para concentrar energía; si el espejo es parabólico en un eje y longitudinal en el otro (parabólico longitudinal), solo necesitará orientación en el eje longitudinal, pero si es parabólico de revolución (paraboloide), necesitará obligatoriamente orientación en dos ejes.

**La orientación en el segundo eje se consigue duplicando el sistema de orientación del primero, y manteniéndolo independiente.**

Dado que los sensores y el sistema de control de orientación diseñado son capaces de funcionar aunque el haz de luz incidente no sea paralelo al plano del sensor, cada sensor puede orientar el captador en un eje sin necesitar datos del otro, por lo que los sensores de cada eje pueden ser perfectamente independientes entre sí.

Teniendo en cuenta que los actuadores en cada eje son también independientes entre sí (se explicará con más detalle en el apartado “5.2.5 Construcción de un prototipo para prueba y demostración”), la única parte restante del sistema de orientación es el controlador, el cual si va a recibir datos de cada eje de manera independiente y va a tener que enviar órdenes a cada actuador también de manera individual, puede ser de igual manera único para cada eje, lo que permite utilizar dos controladores independientes o uno solo que ejecute dos programas (iguales) a la vez.

Los únicos elementos que pueden compartir ambos sistemas para disminuir la duplicidad son los cables de masa y de alimentación en cada sensor, los cuales pueden ser comunes a todos los sensores y, aún así, trabajar de manera independiente, ya que las tensiones de control se miden antes de las resistencias LDR y después de las limitantes, lo que hace que cada punto de medición no se vea afectado por el resto.

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.1 – Orientación

Si se tuviera un sistema a orientar como el siguiente (representado por el círculo negro), con dos sensores para la orientación en **longitud** y otros dos para la orientación en **latitud**:

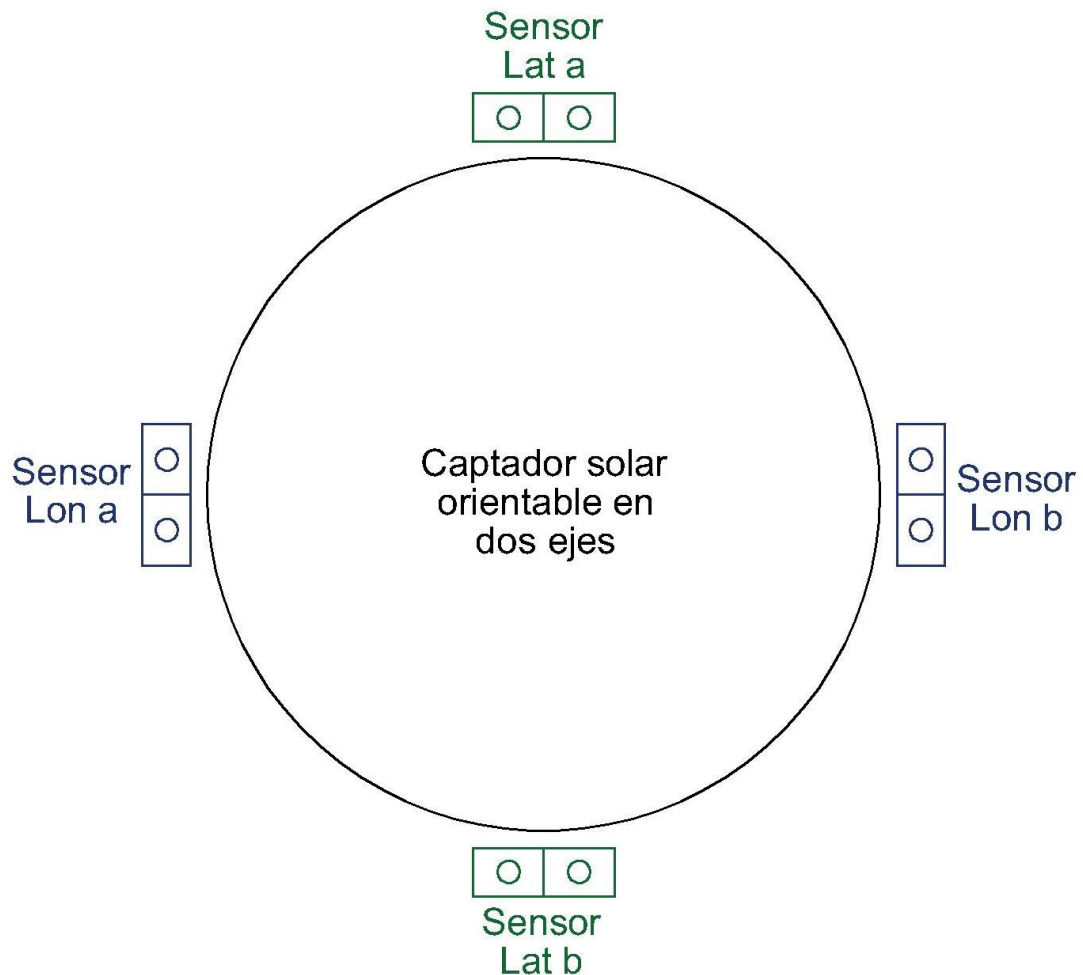


Figura 42 - Ejemplo de sistema orientable en dos ejes

El esquema de conexión de las resistencias LDR de los sensores de dicho sistema sería:

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.1 – Orientación

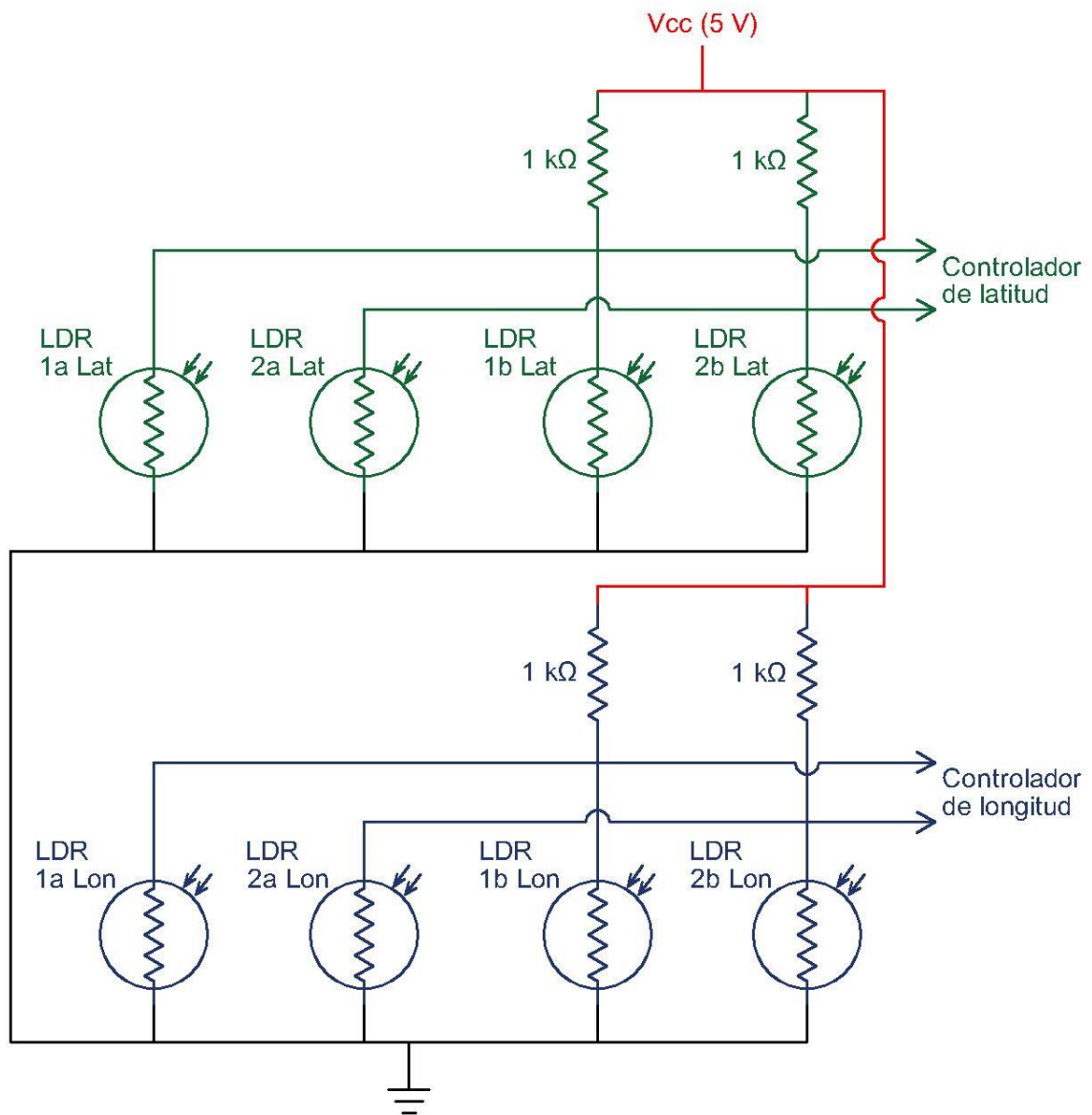


Figura 43 - Esquema de conexión de cuatro sensores de orientación

Están representados en **rojo** los conductores de alimentación de los sensores (5 voltios de corriente continua), en **verde** los sensores de orientación en latitud, en **azul** los de orientación en longitud y en **negro**, los conductores de masa.



## 5.2. PARABOLOIDE CON REFLECTOR SECUNDARIO

Tal y como se explicó en el apartado 4.6. “Estado del arte - Paraboloideos” , los concentradores parabólicos de revolución tienen el problema de que el sistema de captación de energía térmica (generalmente, bastante pesado) ha de situarse en el foco de la parábola, y como el sistema ha de estar en continuo movimiento para orientarse, el captador ha de moverse con él, lo que ocasiona un sobredimensionamiento de la estructura y pérdidas de energía en el movimiento.

Este problema se puede solucionar colocando un segundo reflector en el foco, el cual debe tener también forma parabólica (cóncava o convexa, es indiferente); este reflector secundario concentra el haz de luz incidente con forma de cono en uno con forma de cilindro, que es reflejado hacia la parte trasera del reflector principal, donde se encontrará el captador térmico. Con esto se consigue que el sistema de reflectores pueda moverse para orientarse, pero el haz de luz concentrada siempre incida en un punto **fijo**, con lo que ya no es necesario mover el sistema captador, lo que supone un gran ahorro en energía, en coste inicial y en mantenimiento.

### 5.2.1. Diseño del reflector principal

El reflector principal es un espejo cilíndrico parabólico, exactamente igual que cualquiera de los existentes y utilizados a día de hoy.

Únicamente, por comodidad en el diseño y después de comprobar que es una forma práctica para su construcción, se ha decidido que el reflector, en perfil, termine a la mitad de la distancia focal, de manera que el foco entonces quede situado por delante del reflector en toda su superficie.

Para facilitar la toma de decisiones en cuanto a las dimensiones del reflector principal, mediante geometría se han obtenido las relaciones entre las variables que definen la forma de la parábola, de manera que éstas son escalables a cualquier dimensión que el sistema reflector pueda tener.



Parábolas termosolares con doble reflector  
 5.2 - Paraboloides

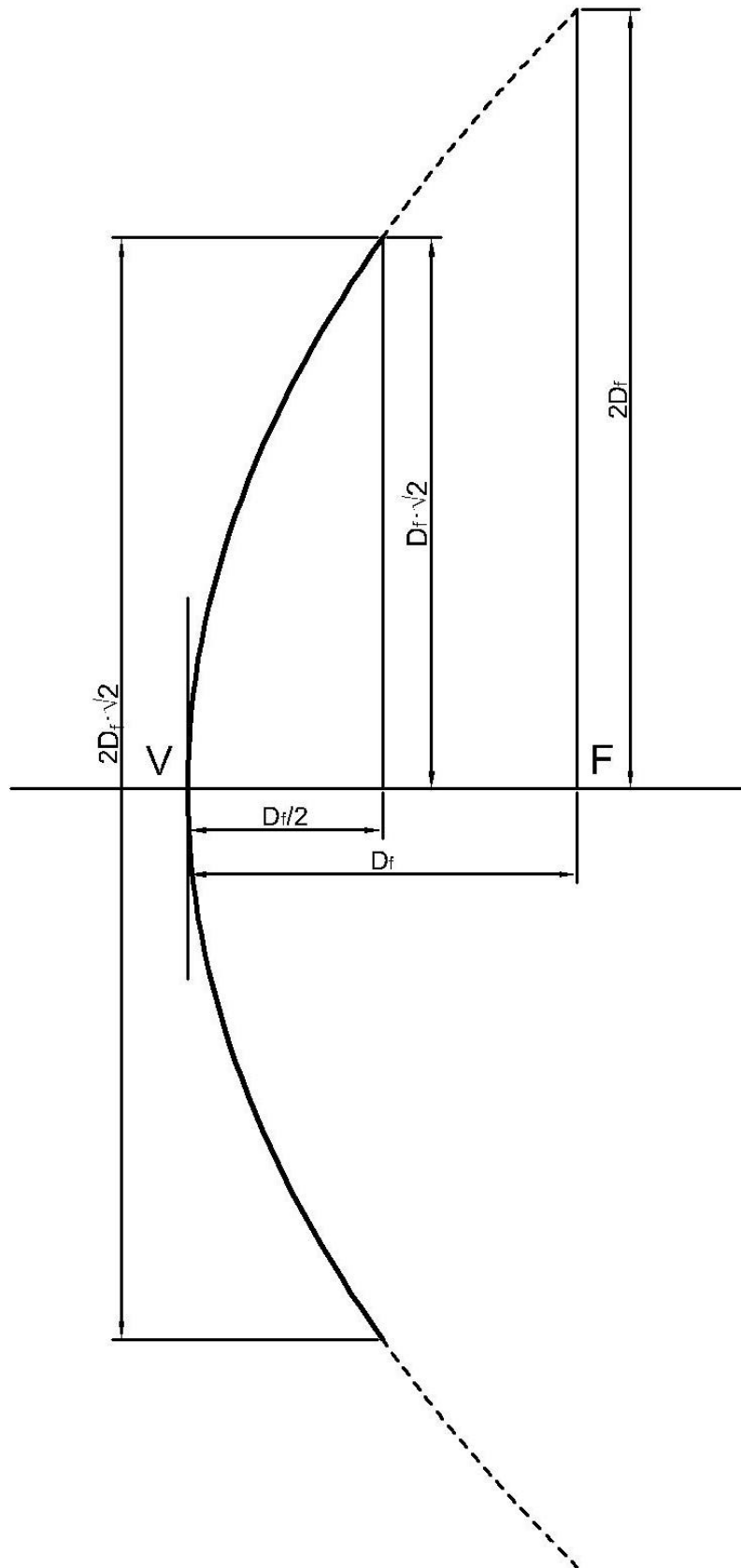
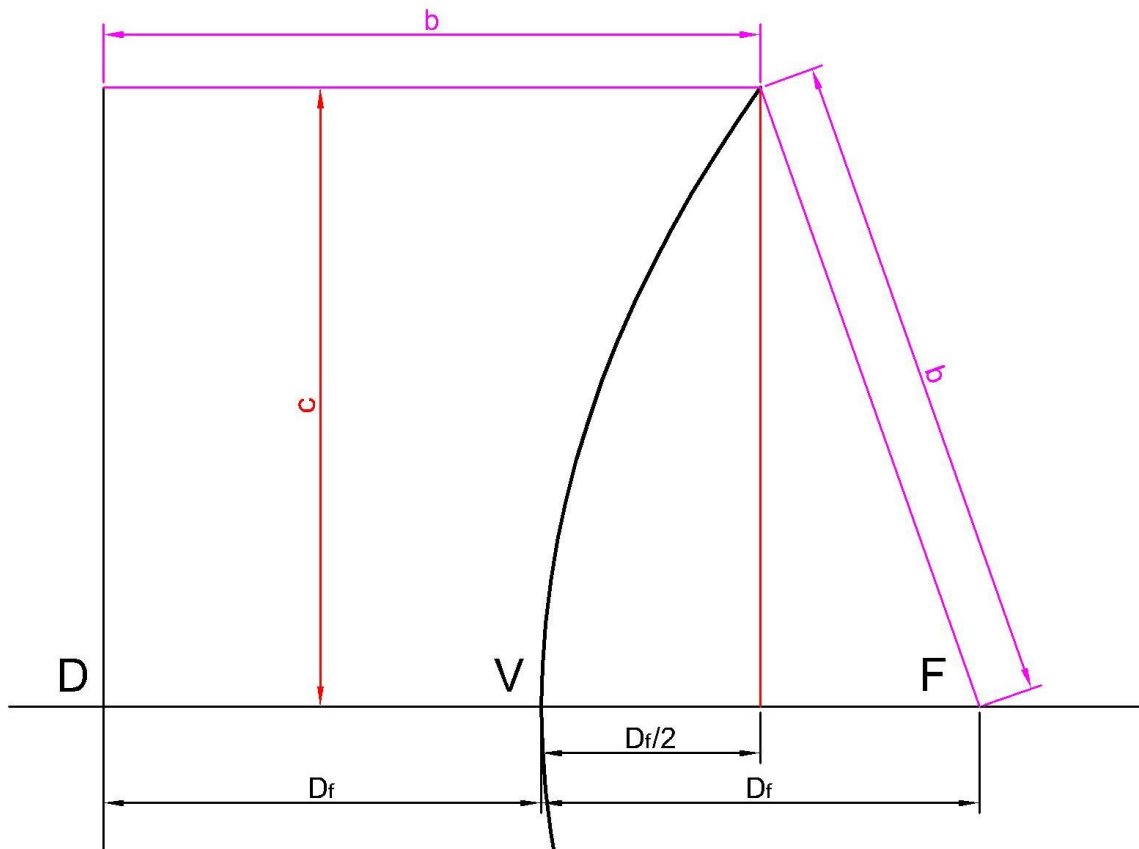


Figura 44 - Relación de distancias en la parábola utilizada en el diseño

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloides

En base a la distancia focal, se obtienen el radio y el diámetro del espejo parabólico:

- La distancia focal ( $D_f$ ) y su mitad, representadas en **negro**, cumplen relaciones intrínsecas a las parábolas ( $DV = VF$ ), y tomadas a propósito para facilitar el diseño (la profundidad de la parábola es igual a  $D_f/2$ ).
- La distancia al foco y a la directriz del punto extremo de la parábola ( $b$ ), representada en **violeta**, se corresponden con la suma de la distancia focal y su mitad:  $b = D_f + D_f/2 = 3D_f/2$
- La distancia  $c$ , representada en **rojo**, se corresponde con el radio del reflector principal.



Por el teorema de Pitágoras:

$$c^2 = b^2 - \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 = \left(\frac{3D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 = \frac{9D_f^2}{4} - \frac{D_f^2}{4} = 2D_f^2 \quad (3.3)$$

$$c = \sqrt{2D_f^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{D_f^2} = D_f\sqrt{2} \quad (3.4)$$

Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloides

Invirtiendo los mismos cálculos, se obtienen también las relaciones entre variables si el diseño se hiciera en base al radio del reflector:

$$c = D_f \sqrt{2}; D_f = \frac{c}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

Para simplificar cálculos, diseño y fabricación, la parte trasera del reflector no tiene por qué ser parabólica, ya que simplemente tiene una función estructural, así que en función del tamaño y de la estructura de sujeción elegida, ésta podrá formarse a partir de una línea recta o arco de circunferencia.

### 5.2.2. Diseño y colocación del reflector secundario

Para el diseño del reflector secundario se han utilizado métodos gráficos en el software AutoCAD, el cual permite no perder precisión.

El reflector principal no va a recibir luz en toda su superficie, sino que habrá una pequeña zona en el centro que quedará en sombra (representada en **negro**), por situarse detrás (en el eje de la parábola contando desde el sol) del reflector secundario.

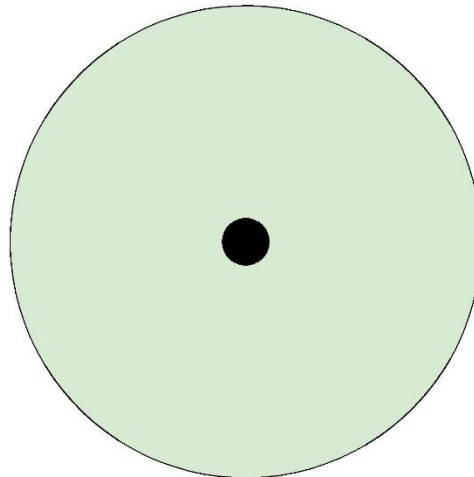


Figura 45 - Zona en sombra en el reflector principal

Visto en alzado el reflector principal, el halo de luz será una corona circular, pero visto en perfil y teniendo en cuenta solamente los rayos incidentes de los extremos de la parte superior (ya que ambas partes son simétricas), se puede simplificar la luz incidente como dos líneas correspondientes con el rayo que incide en la parte más externa (**rayo exterior**) y el que incide en la parte más interna (**rayo interior**).

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloide

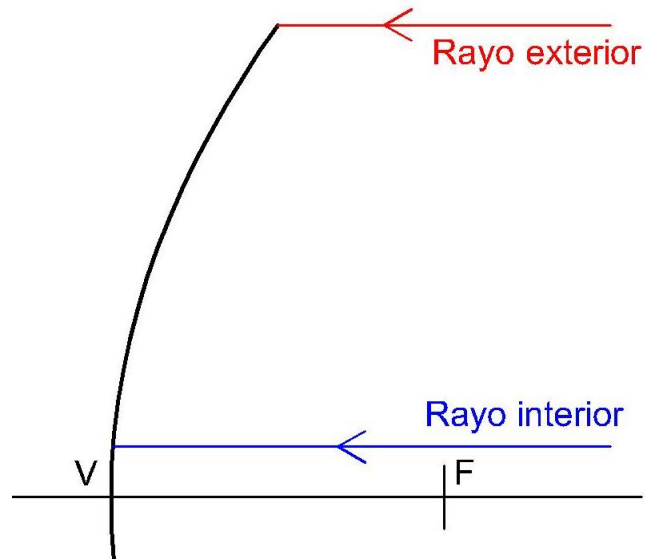


Figura 46 - Rayos interior y exterior

Estos dos rayos se reflejan hacia el punto llamado foco, por lo que coinciden en él, pero a partir de ese punto comienzan a dispersarse hacia el infinito.

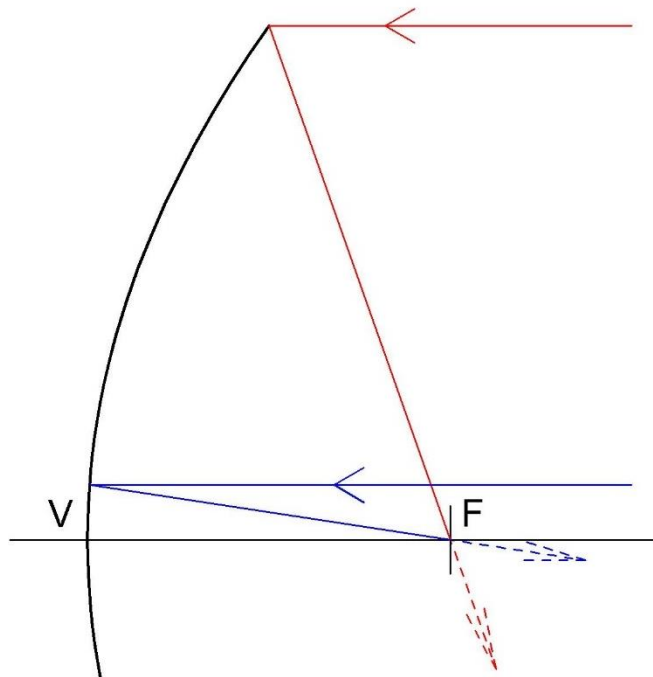


Figura 47 - Dispersión de rayos tras concentrarse en el foco

Simplificando aún más el sistema, como solo se tiene en cuenta dos líneas para representar la luz incidente, solo serán necesarios en la parábola los dos puntos de

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloide

corte con dichas líneas; será en dichos puntos en los que se reflejen hacia el foco. Si solo se toman dos puntos de la curva como reflectores, se puede hacer pasar por ellos una recta tangente a la parábola original, y sobre dicha recta aplicar el principio de reflexión visto en el apartado 5.1.1 "Concentración de luz mediante parábolas (teoría)".

Los rayos incidentes son paralelos al eje de la parábola, y los concentrados deberán serlo también, por lo que la recta tangente en la que se reflejan en el reflector principal ( $t_1$ ), tendrá la misma pendiente que aquella en la que se reflejan en el reflector secundario ( $t_2$ ).

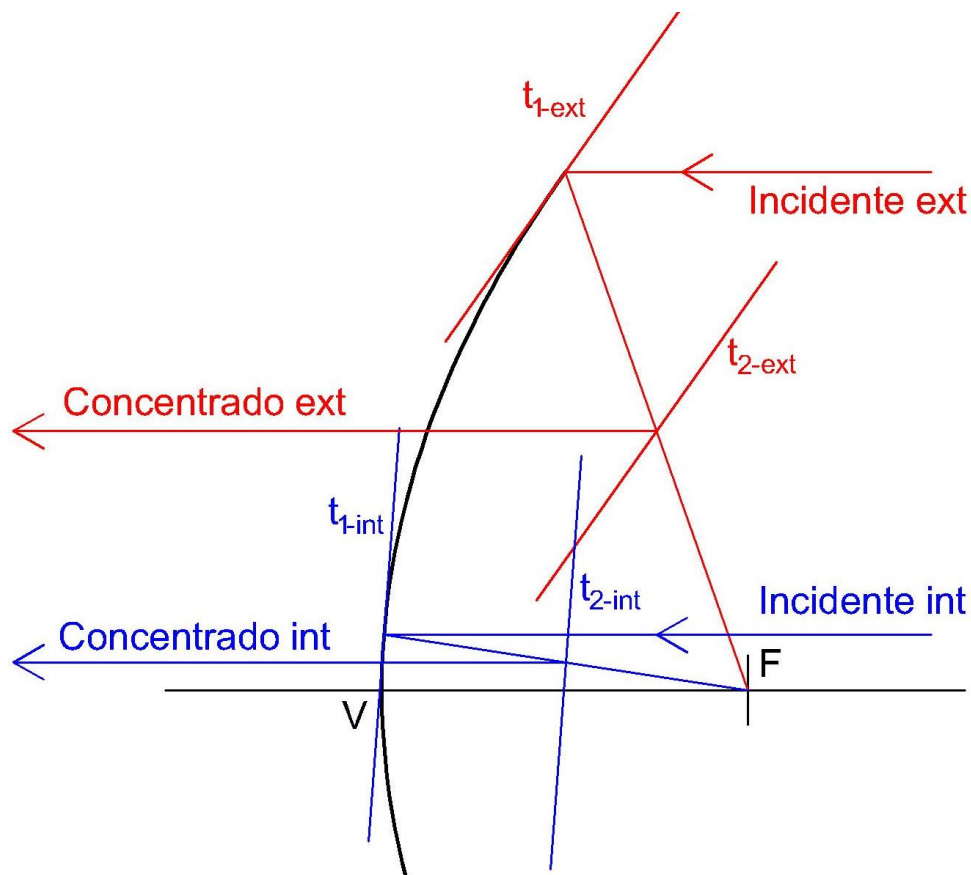


Figura 48 - Demostración gráfica del paralelismo de las tangentes de reflexión

Si las tangentes secundarias son rectas en las que se reflejan por segunda vez los rayos incidentes, el punto de cada recta en el que se refleja el rayo correspondiente (interior o exterior) será un punto de la parábola reflectora secundaria, por lo que se cuenta con dos tangentes y dos puntos de dicha parábola. Conocidos estos elementos, se puede situar y construir dicha parábola mediante un método gráfico sencillo:



Parábolas termosolares con doble reflector

5.2 - Paraboloides

Esta parábola construida a partir de las tangentes, depende de la colocación de ambas, y esta colocación depende a su vez de la distancia deseada entre cada rayo reflejado (interior y exterior) y el eje de la parábola ( $d_{2-int}$  y  $d_{2-ext}$ ). Esta distancia será menor que la existente entre cada rayo incidente con el mismo eje ( $d_{1-int}$  y  $d_{1-ext}$ ), por lo que será una proporción de la misma.

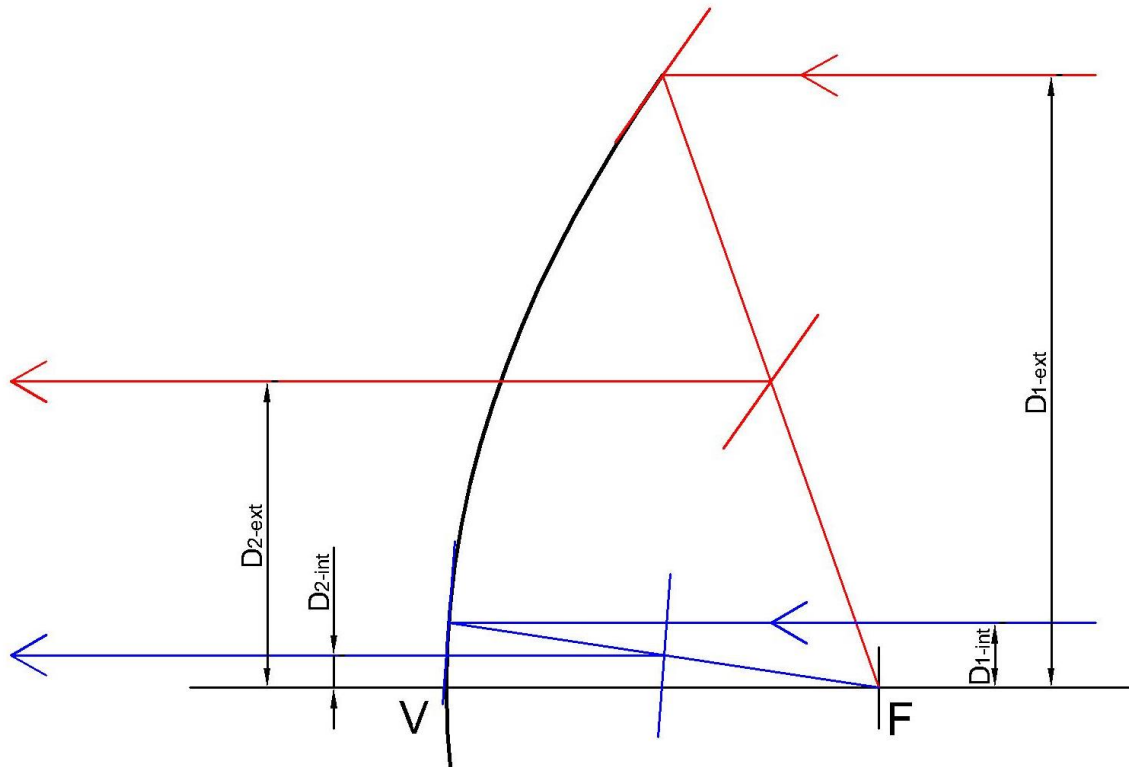


Figura 50 - Distancias de cada rayo al eje de la parábola

Si la proporción que guarda el radio de cada rayo concentrado con su homólogo incidente es la misma, la parábola reflectora secundaria compartirá su foco con la primera.

$$\frac{D_{1-ext}}{D_{2-ext}} = \frac{D_{1-int}}{D_{2-int}} \implies F_1 = F_2 \tag{5.6}$$

Esto no es ni mucho menos obligatorio de cumplir, pero simplifica enormemente el proceso de cálculo y diseño, por lo que en esta investigación se ha seguido esta regla en todo momento.

La relación entre radios lo es también entre diámetros y áreas, y como tanto el haz de luz incidente como el reflejado son coronas circulares, la relación ya tiene en



Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloides

cuenta las pérdidas por sombra debidas al reflector secundario y sus brazos de sujeción, ya que esas sombras también se verán concentradas, así que la relación entre radios será también la relación de concentración de luz y, por lo tanto, de energía.

Para realizar el diseño del reflector secundario se presentan dos opciones: que éste sea cóncavo o convexo.

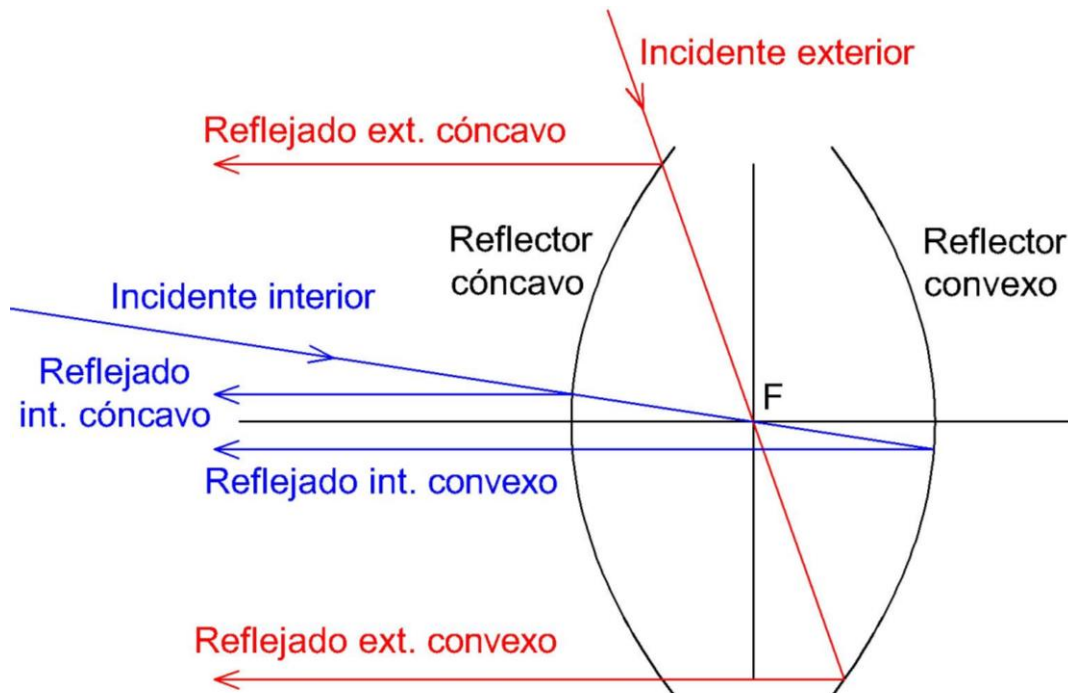


Figura 51 - Opciones de reflectores secundarios cóncavo y convexo

En el caso de utilizar un reflector secundario **cóncavo**, éste deberá situarse entre el reflector principal y su foco, de manera que refleje los rayos de luz antes de que se lleguen a concentrar del todo; por el contrario, si el reflector fuera **convexo**, se deberá situar después del foco.

Esto es así porque el único requisito que debe cumplir el reflector es que tenga como tangentes las dos rectas que se han tomado anteriormente como ejemplo (**t<sub>int</sub>** y **t<sub>ext</sub>**), y que en cada una de ellas el punto de tangencia se encuentre a la distancia del eje que determina la relación de concentración de luz. Como el haz de luz incidente (y, por lo tanto, también el reflejado) son simétricos respecto del eje,

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloide

dichos puntos de tangencia pueden situarse por encima del eje o por debajo, lo que da lugar a las dos opciones de reflector secundario.

Como los rayos reflejados en el reflector secundario van a ser paralelos a aquellos incidentes en el principal, ambas parábolas compartirán el mismo eje. De igual manera, como se sigue la misma relación de compresión entre todos los rayos incidentes y reflejados (interiores y exteriores), ambas parábolas compartirán también el mismo foco (**F**). Teniendo estos dos elementos definidos, el único restante para construir la parábola del reflector secundario es su directriz (**d**), la cual se obtiene por el método gráfico anteriormente explicado.

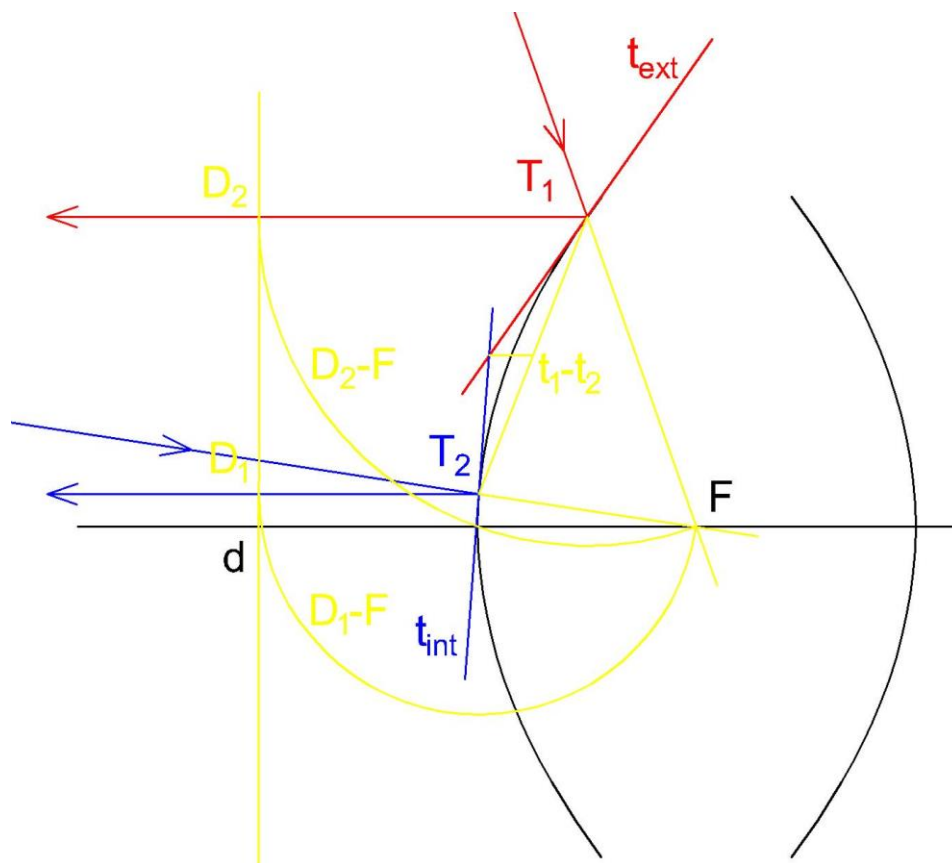


Figura 52 – Construcción gráfica de la parábola reflectora secundaria

Habiendo obtenido uno de los reflectores (cóncavo o convexo), por simetría del mismo respecto de una recta pasante por el foco y perpendicular al eje, se obtiene el otro.

De esta manera, quedan definidos los reflectores principal y secundario:

## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.2 - Paraboloide

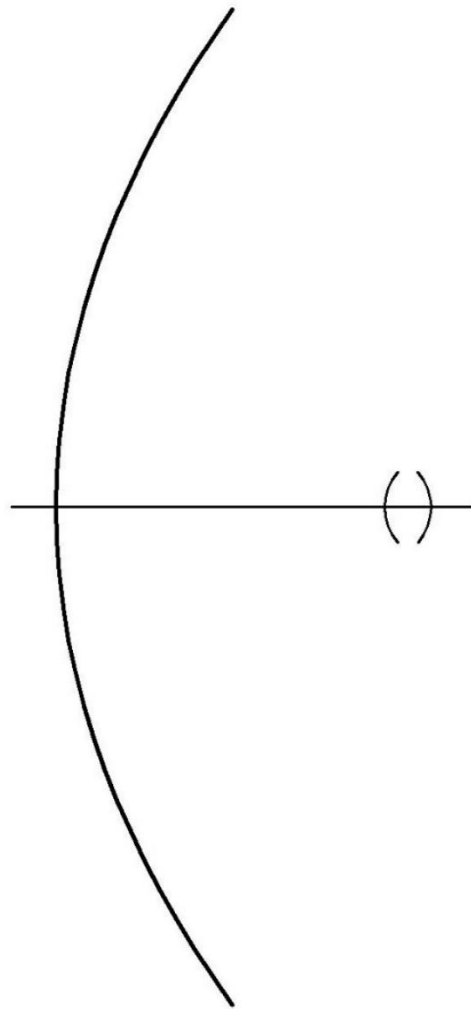


Figura 53 - Parábola del reflector principal y de las dos opciones de reflectores secundarios

#### 5.2.3. Colocación y forma del captador

Los dos reflectores (principal y secundario) siempre se van a mover unidos, por lo que a efectos explicativos se pueden tomar como una unidad: sistema reflector. Este sistema cubre una superficie tridimensional correspondiente con la mitad de una semiesfera, pero esto lo consigue simplemente con dos movimientos bidimensionales.

Viendo el sistema en planta, describe una semicircunferencia (representada en rojo):

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloide

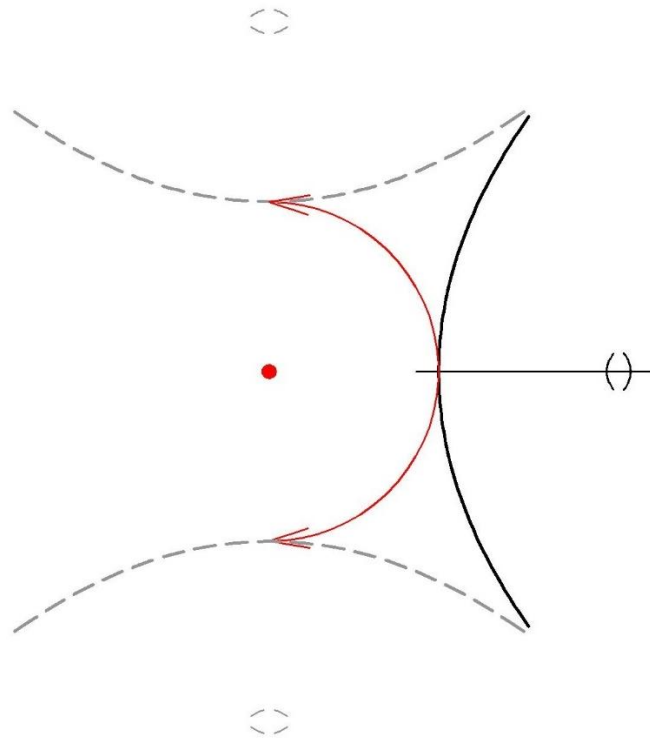


Figura 54 - Giro del sistema de reflectores en planta

Pero viéndolo en perfil, el movimiento se reduce a un cuarto de circunferencia (representada en verde):

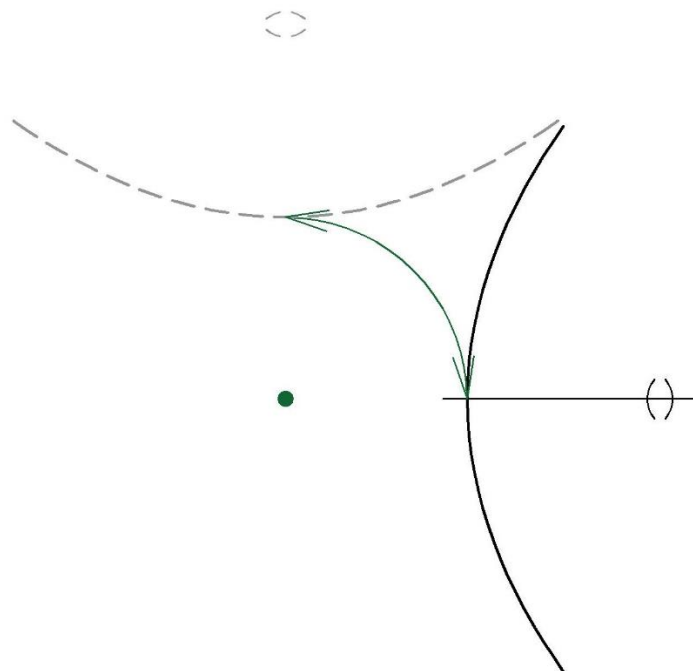


Figura 55 – Giro del sistema de reflectores en perfil

Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloide

Por lo tanto, dado que el único punto común a ambos movimientos es el eje de giro y que por él pasa el eje de las parábolas (el cual, por detrás de la parábola contiene el haz de luz concentrado) en todo momento, el captador de energía deberá colocarse en ese punto.

Ahora queda demostrado que el punto de colocación del captador no se mueve, lo que permite aumentar su peso y tamaño sin que esto provoque una disminución del rendimiento general del sistema.

Se debe tener en cuenta que este razonamiento y representación gráfica se han realizado sobre una simplificación máxima, en la que cada reflector se toma solo como la línea de su parábola y el haz de luz concentrado como la línea del eje (unidimensional), pero en la realidad todos estos elementos van a tener **tres dimensiones**.

Esto implica que el haz de luz concentrado va a ser un cilindro y, por lo tanto, el captador no va a poder ser un punto, sino que deberá ser un elemento que se asemeje lo máximo posible al espacio que cubren los reflectores, es decir, un cuarto de esfera (aumentada ligeramente en función del diámetro del haz de luz concentrada que ha de incidir en ella, ya que en caso de que éste incida desde la vertical, si fuera un cuarto de esfera justo, quedaría medio haz fuera).

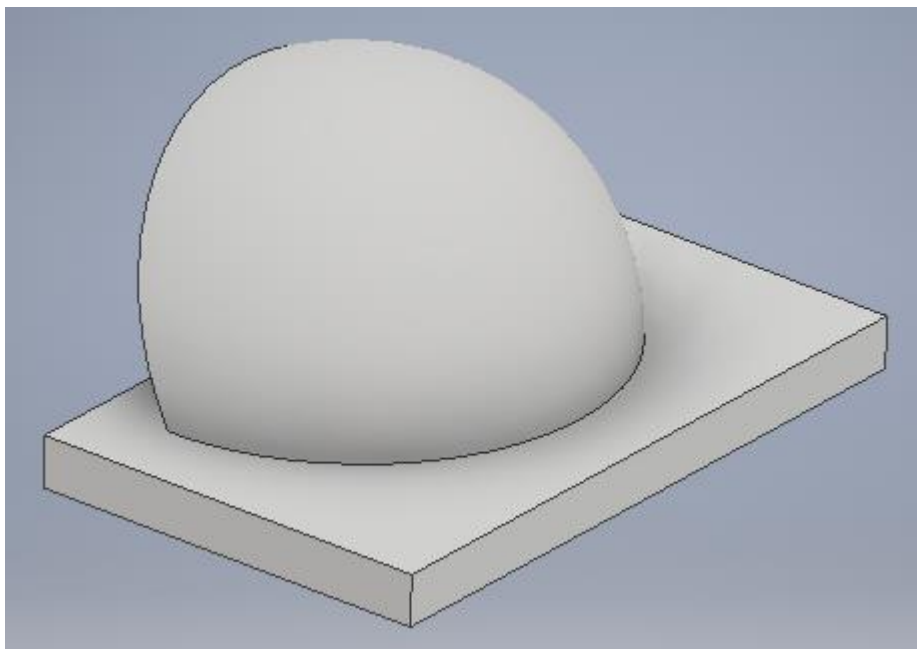


Figura 56 - Forma óptima para el captador térmico

Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloides

Si por motivos de facilidad de fabricación, presupuesto o necesidades del sistema que utilice la energía térmica no es factible la construcción de un captador esférico, este puede ser también cilíndrico con un ángulo de  $45^\circ$  de inclinación. De esta forma se sigue optimizando el captador para el movimiento curvo en el eje vertical y se pierde algo de rendimiento en el horizontal, pero al ser el movimiento en éste la mitad menor, la pérdida de rendimiento por superficie es también menor, así que en determinados casos puede ser una forma práctica de simplificación y reducción de costes.

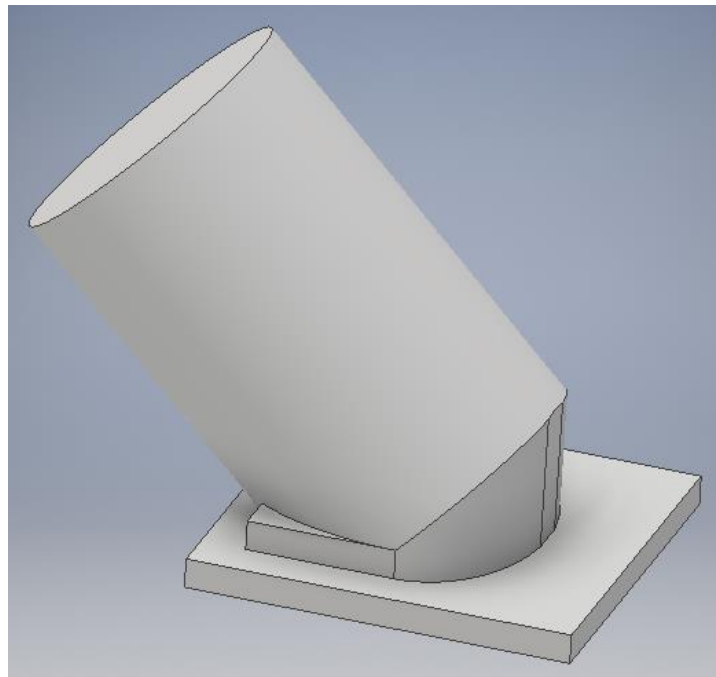


Figura 57 - Captador cilíndrico

### 5.2.4. Mejora con un tercer reflector

Con un solo reflector parabólico se consigue un haz de luz fijo (relativamente) incidente sobre un punto móvil (movimiento necesario por la necesidad de orientación del sistema); con un segundo reflector, se consigue un haz de luz móvil incidente sobre un punto fijo; pero con un tercer reflector orientable, se puede conseguir un haz de luz fijo, el cual es posible dirigir utilizando más reflectores fijos y orientables.

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloide

Este tercer reflector deberá ser plano y colocarse en el punto fijo de incidencia del haz de luz concentrado, en el cual estará fijo, pero deberá orientarse en función del ángulo de incidencia de la luz solar concentrada.

En función de la dirección deseada de salida del haz de luz concentrado, la orientación del tercer reflector partirá de una base u otra, pero en todo caso su orientación será proporcional a la del sistema de reflectores primario y secundario. Para explicar el funcionamiento, se toma como ejemplo un haz concentrado que salga del sistema de reflectores en **horizontal** y dirección **norte**.

Viendo el sistema completo en planta, el reflector terciario deberá oscilar entre  $45^\circ$  y  $-45^\circ$  respecto de la horizontal:

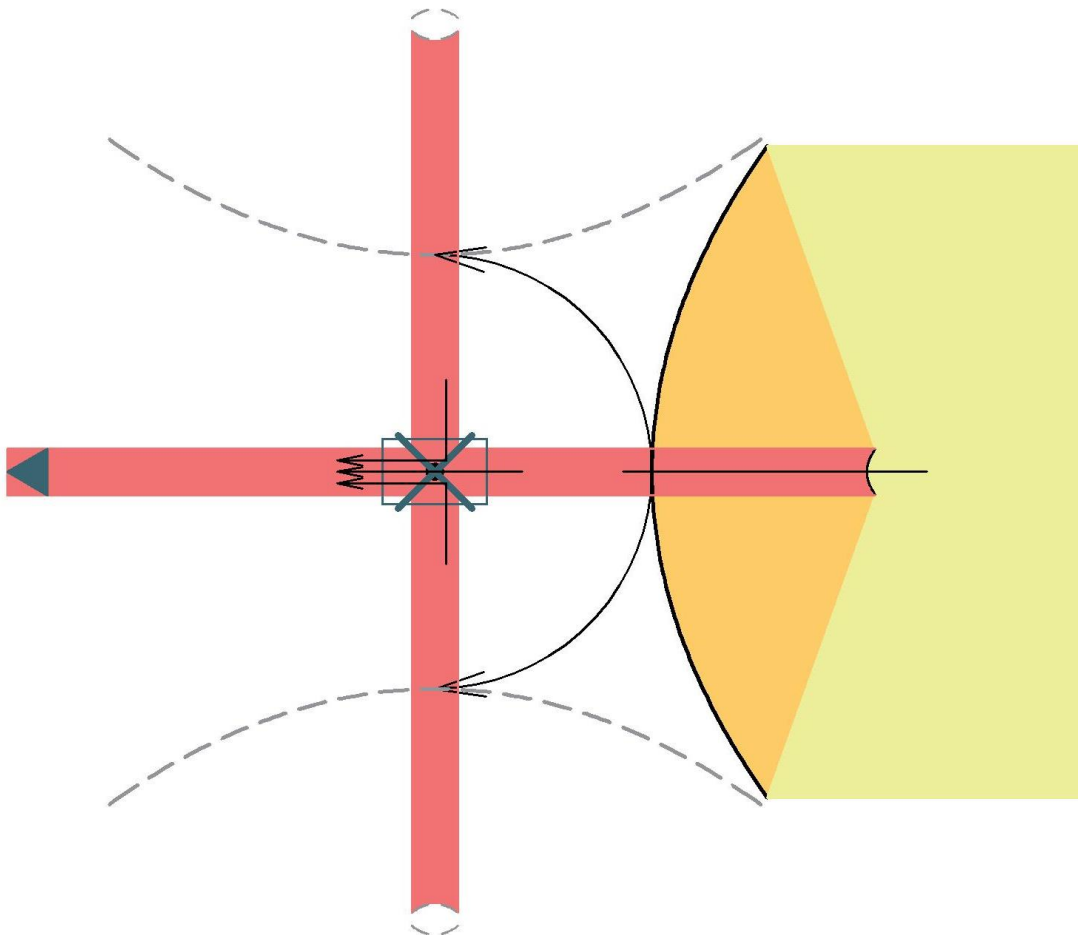


Figura 58 - Reflector terciario en planta

Si solo se tiene en cuenta el movimiento en planta, llega un momento en el que, estando los reflectores primarios en su zona central, el reflector terciario debe dar una vuelta completa o ser capaz de reflejar la luz por ambos lados; nada de eso.



## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloide

Este sistema está preparado solamente para la reflexión de luz procedente del sol, la cual sigue siempre una trayectoria en forma de arco, y esto permite que el reflector terciario oscile también en forma de arco cambiando de un lado al otro sin tener que voltearse, y utilizando siempre la misma cara de reflexión.

Viéndolo en perfil, el espejo oscilará entre  $0^\circ$  y  $45^\circ$  de inclinación, exactamente la mitad que en la vista en planta, lo que se corresponde con que en este eje (latitud N-S) los reflectores principales oscilan la mitad que en el otro (longitud E-O).

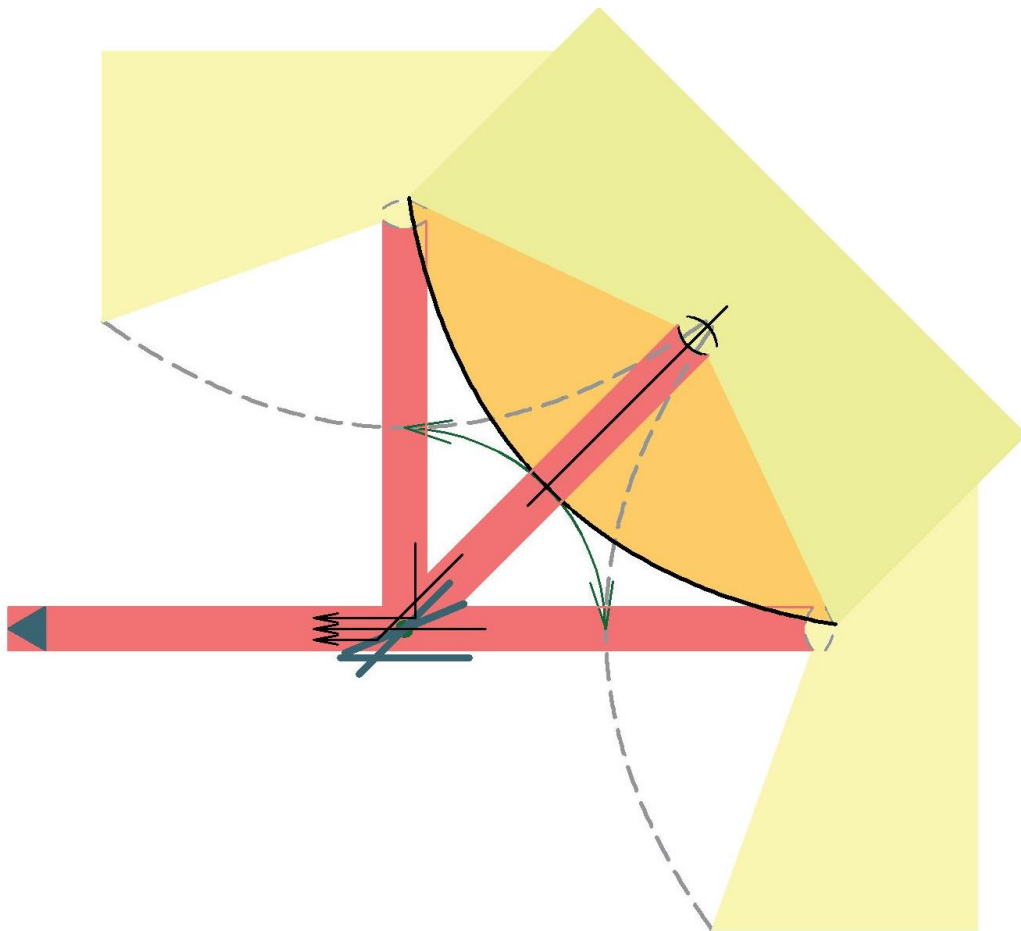


Figura 59 - Reflector terciario en perfil

Por complejo que parezca, el movimiento del reflector simplemente se compone de las dos oscilaciones (planta y perfil), las cuales se simplifican aún más en que son cada una la mitad de la oscilación del sistema de reflectores principales, por lo que el movimiento podría realizarse con palancas directamente en vez de utilizar motores o gatos hidráulicos a mayores. En este caso, el movimiento de los reflectores principales ha de realizarse de manera controlada por microprocesador, para que el movimiento siempre esté limitado a un arco y así en caso de que el

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloide

sistema se oriente de este a oeste (o viceversa), nunca se haga de manera horizontal en su parte inferior, ya que en ese caso se necesitaría invertir la posición del espejo en el punto medio, y como el sistema no está preparado para ello, las palancas que unieran el reflector terciario a los reflectores primario y secundario, se romperían.

Por otro lado, este sistema requiere de una precisión muchísimo mayor en los reflectores, ya que, al transportar el haz de luz concentrado a una distancia mucho mayor, cualquier error en el posicionamiento del mismo puede suponer una desviación lo suficientemente grande como para que incida fuera del punto deseado, lo cual además de inútil, es peligroso debido a que este haz de luz se comporta como un láser transportando una gran cantidad de energía.

Si el error en el haz está en el posicionamiento del reflector secundario respecto del primario, el haz de luz saliente no será constante, sino que se dispersará de nuevo o se concentrará, para volver a dispersarse más lejos. Este problema es solucionable con una lente con la curvatura adecuada y colocada en el punto justo, todo ello dependería de la medida del error en la posición del haz.

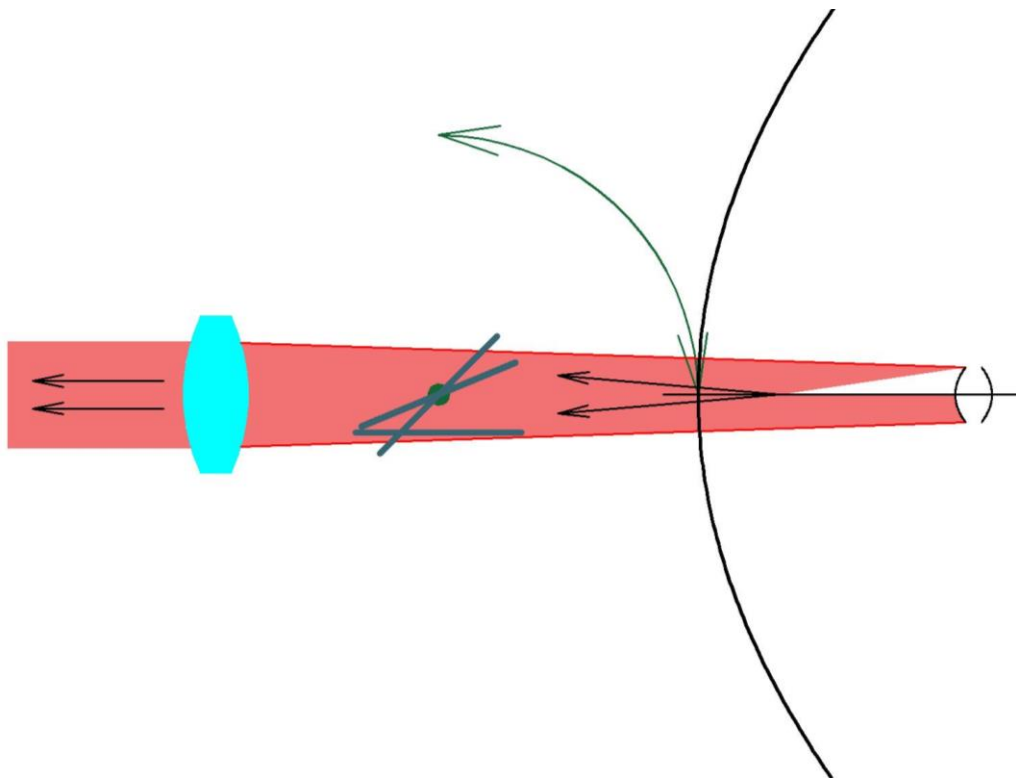
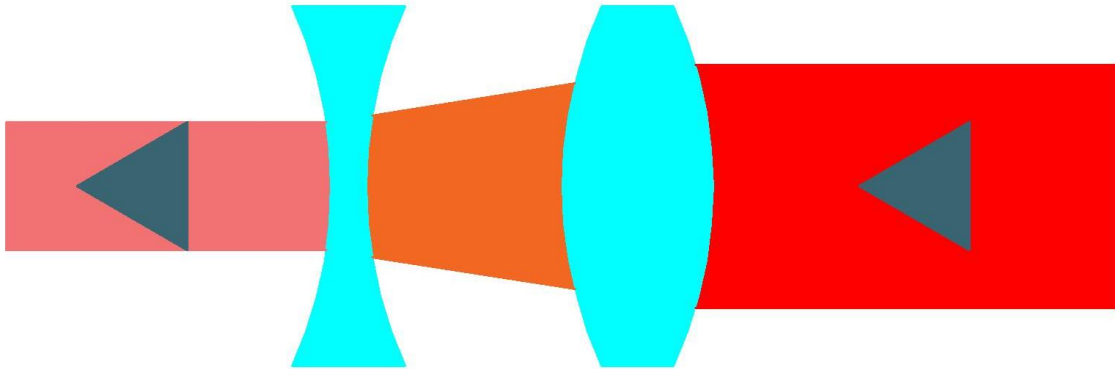


Figura 60 - Aplicación de una lente convergente para rectificar el haz de luz

## Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloide

El problema de una lente convergente es que puede hacer que un haz divergente pase a ser recto, pero lo hará con la anchura que lleve en ese momento. Si el haz concentrado se ha ampliado por la divergencia y se le necesita más fino, habrá que colocar la lente convergente de tal manera que haga al haz converger de nuevo y, a continuación, colocar una lente divergente que convierta el haz en recto a la anchura deseada.



*Figura 61 - Lentes convergente y divergente para disminuir el grosor del haz*

Como la colocación de más elementos incrementa el coste de instalación y el mantenimiento, debe evitarse en la medida de lo posible, por lo que en cada caso se ha de tener en cuenta si es más rentable utilizar un sistema de reflectores de gran precisión y así evitar la lente correctora, o disminuir el coste de los reflectores a costa de tener que instalar dicha lente.

Este sistema es conveniente en el caso de que se necesite que el haz de luz concentrado incida a una distancia lejana del concentrador, o en el caso de necesitar una muy alta temperatura y que se quieran hacer incidir los haces concentrados de varios captadores en un único punto. En todos los demás casos, no merece la pena, ya que se incrementa considerablemente la complejidad general del sistema y no se obtiene un incremento de rendimiento proporcional.

Parábolas termosolares con doble reflector

5.2 - Paraboloides

### 5.2.5. Construcción de un prototipo para prueba y demostración

De igual manera que se hizo con el sistema de orientación en el panel solar, se ha comprobado el funcionamiento de:

- El sistema de orientación en dos ejes.
- El sistema de reflectores primario y secundario.

Y para ello se ha construido un prototipo de parábola con reflector secundario a pequeña escala.

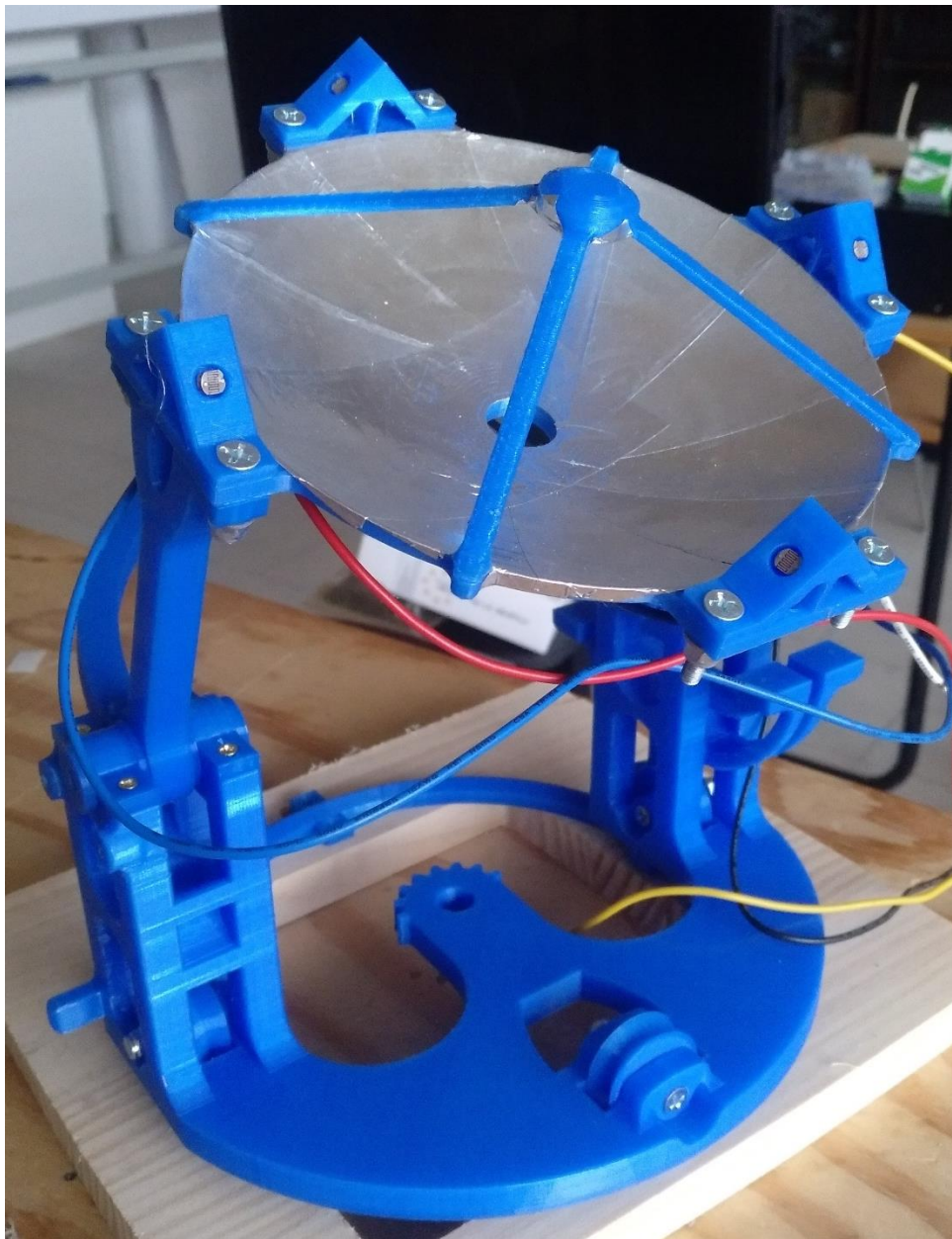
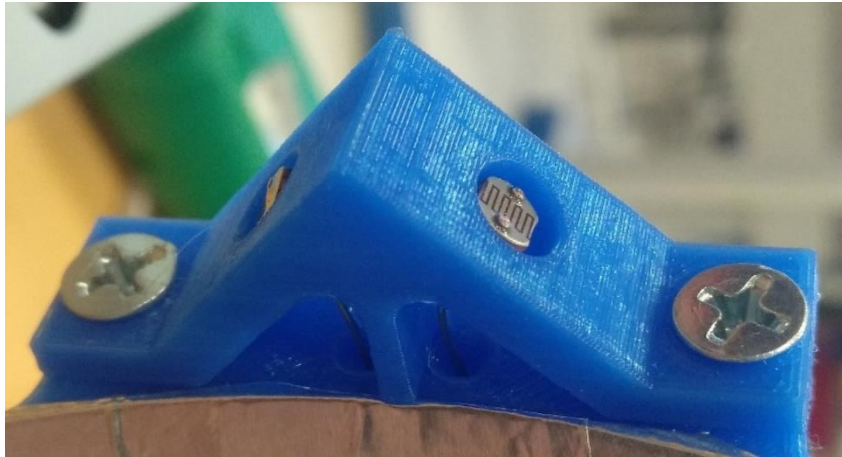


Figura 62 - Prototipo de concentrador parabólico durante la construcción

## Parábolas termosolares con doble reflector

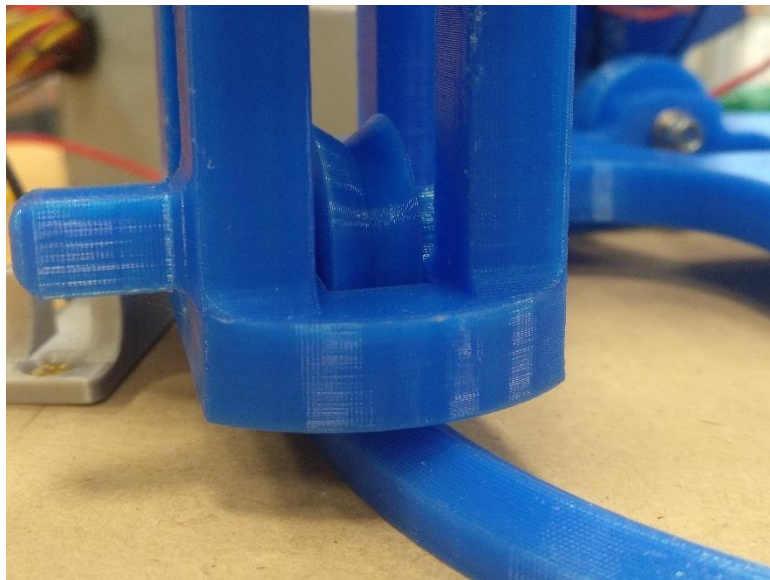
### 5.2 - Paraboloide

Para la orientación, se han utilizado los mismos sensores que en el anterior prototipo, los cuales ya estaba comprobado que tenían un funcionamiento correcto.



*Figura 63 - Sensores de dirección de luz utilizados*

Para el movimiento horizontal (orientación en longitud), el prototipo se asienta sobre un raíl circular de perfil triangular, sobre el que se desplazan tres ruedas doblemente cónicas hacia su interior (perfil opuesto al del raíl, para que ambos encajen).



*Figura 64 - Raíl y rueda instalados*

El movimiento lo proporciona un motor de pasos colocado en el centro, el cual mueve la base del prototipo directamente desde el eje, sin ningún tipo de reducción ya que al ser un motor de pasos proporciona un buen par motor a muy bajas revoluciones.



## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.2 - Paraboloide

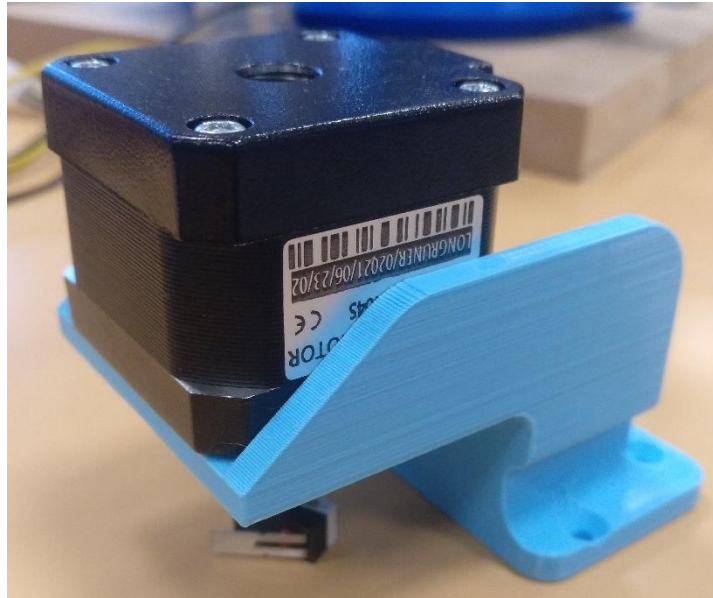


Figura 65 - Motor de pasos utilizado sobre su base

Por otro lado, el sistema de reflectores está sujeto por dos ejes horizontales que permiten que se eleve hasta 90 grados, y así se pueda orientar en latitud. El movimiento se realiza directamente en los ejes mediante un servomotor, el cual proporciona el par motor suficiente para elevar los espejos.

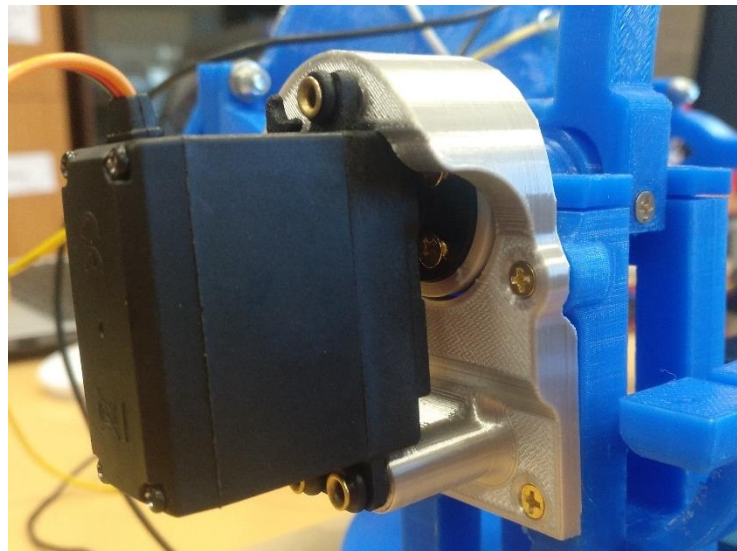
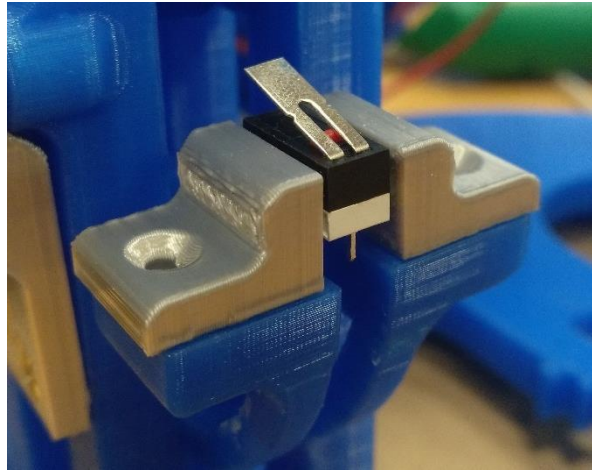


Figura 66 - Servomotor instalado en el prototipo

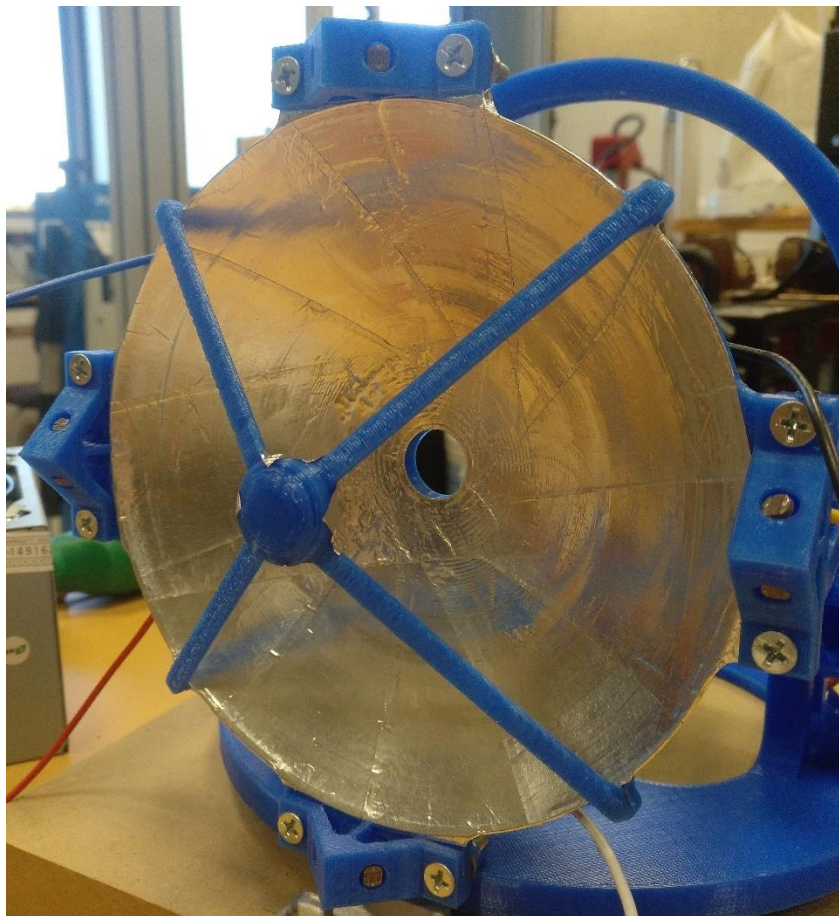
Tanto el movimiento en latitud como en longitud están limitados por cuatro interruptores de final de carrera, los cuales evitan que el sistema se mueva más allá de los límites de las piezas mecánicas para no dañarlas, y de los conductores eléctricos que se utilizan, lo cual podría dañarlos e, igualmente, inutilizar el sistema.

## Parábolas termosolares con doble reflector 5.2 - Paraboloide



*Figura 67 - Interruptor de fin de carrera instalado en el prototipo*

El sistema de reflectores consiste en dos parábolas de revolución contrapuestas (reflector secundario convexo) impresas, al igual que el resto de piezas, con una impresora 3D utilizando PLA. Para lograr que estas piezas reflejen la luz solar, se las ha forrado con cinta de aluminio autoadhesiva.



*Figura 68 - Reflectores principal y secundario con sus sensores*



Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloide

Se pueden consultar todos los planos mecánicos del prototipo en el **Anexo II – 8.2.3** “Prototipo de reflector parabólico orientable en dos ejes”.

El control de la orientación del prototipo se realiza mediante un Arduino, en este caso MEGA, debido al número de salidas y entradas con las que se cuenta.

La orientación se realiza exactamente igual que en el caso del panel fotovoltaico (ver **Anexo I – 8.1.1** “Orientación de un panel solar en un eje”), pero en este caso, duplicando el código, ya que la orientación se realiza en dos ejes.

A mayores, se han añadido dos detalles:

- Por un lado, el sistema no arranca hasta que recibe un nivel de luminosidad mínimo (regulable en un potenciómetro); esto lo determina a partir del nivel de luminosidad que reciben en conjunto todas las resistencias LDR.
- Y por otro y más importante, se cuenta con interruptores finales de carrera que limitan el movimiento, ya que de no ser así, se podrían dañar las partes mecánicas o los motores eléctricos.

Se puede ver el código utilizado en el controlador en el **Anexo I – 8.1.2** “Orientación de un concentrador parabólico en dos ejes”.

### **5.2.6. Carencias del prototipo**

Durante el proceso de construcción y prueba se han sufrido una serie de inconvenientes, los cuales se han subsanado sobre la marcha modificando el diseño original.

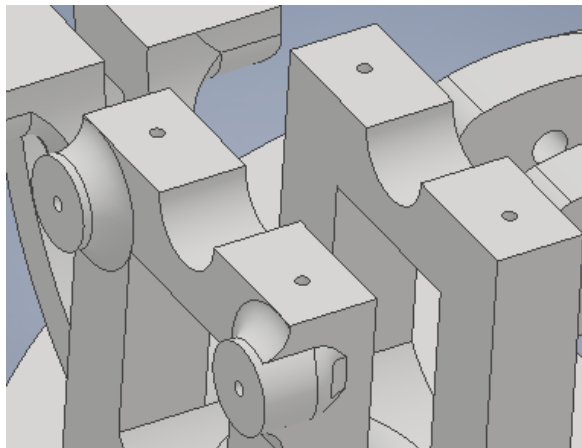
Uno de ellos ha sido relativo al movimiento, ya que originalmente tanto la orientación en longitud como en latitud se iban a realizar con un motor de pasos 28BYJ-48, controlado con una placa controladora basada en el ULN2003.

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloide



*Figura 69 - Motor de pasos 28BYJ-48 y controlador ULN2003 [19]*

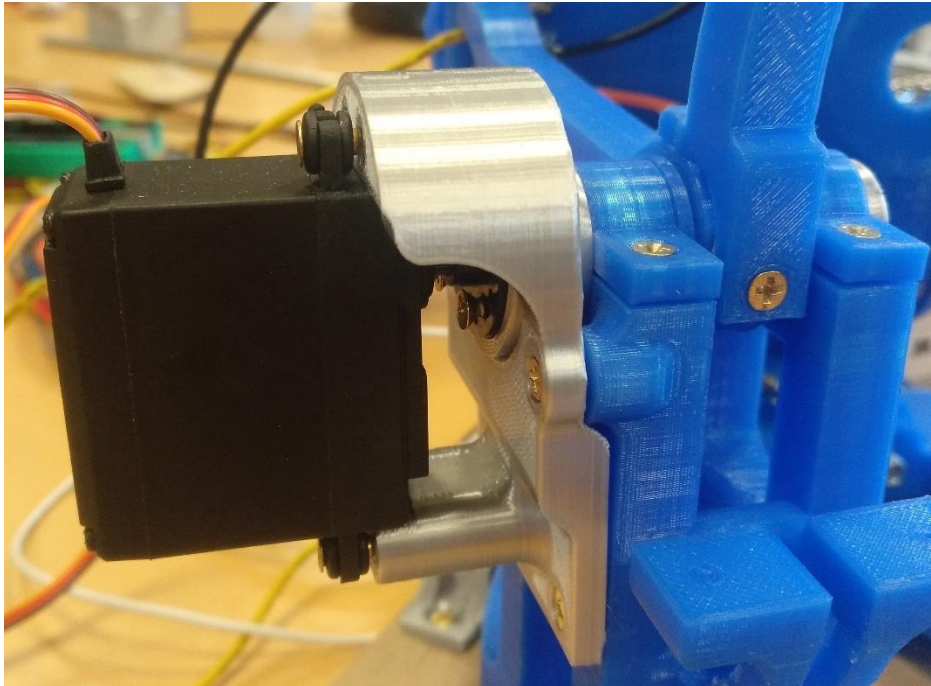
Es por ello que la sujeción de la base giratoria para el motor que ha de levantar los reflectores está preparada para el 28BYJ-48:



*Figura 70 - Sujeción diseñada originalmente para el motor de pasos*

Para cambiar el motor de pasos 28BYJ-48 por un servomotor MG996R, se ha tenido que diseñar e imprimir una nueva pieza de sujeción que se acopla en la sujeción original y adapta la forma y los orificios a los del servo:

Parábolas termosolares con doble reflector  
5.2 - Paraboloide



*Figura 71 - Pieza de adaptación para sujetar el servomotor*

De igual manera ha ocurrido con el nuevo motor de pasos (17HS13-0404S) que hace rotar la base, pero en este caso no se ha adaptado la sujeción original, sino que se ha diseñado una completamente nueva.



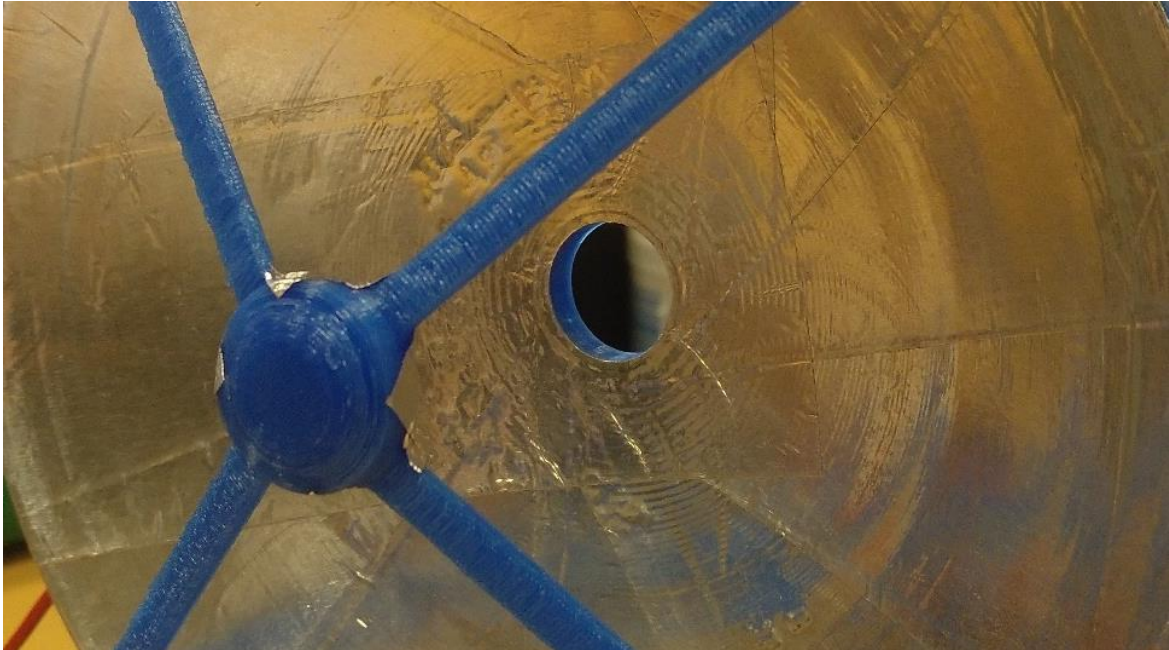
*Figura 72 - Nueva piza diseñada para sujetar el motor de pasos*

Parábolas termosolares con doble reflector

## 5.2 - Paraboloides

Por otro lado, ha habido otros problemas que no se han podido subsanar por falta de tiempo y de presupuesto.

El primero ha sido relativo a la reflexión de la luz, ya que la cinta de aluminio autoadhesiva tiene una gran capacidad reflectora, pero ni mucho menos se asemeja a la que puede tener un espejo o una pieza de aluminio o acero pulidas finamente.



*Figura 73 - Superficie reflectora del reflector principal*

Esto provoca que gran parte de la radiación lumínica recibida sea absorbida por el aluminio y no reflejada ni, consecuentemente, concentrada. Este problema se podría solucionar con un mayor tamaño de los reflectores, de manera que aunque reflejen una menor cantidad de luz, se pueda obtener al menos una cantidad de energía concentrada suficiente como para comprobar el funcionamiento del sistema, especialmente si es adecuado el posicionamiento de los reflectores.

Una segunda carencia del prototipo es causada por los medios disponibles para su construcción (impresora 3D doméstica), la cual imprime las piezas mediante capas y ofrece una precisión máxima de 0,2 mm de grosor de capa (cuanto más fina sea la capa, mayor precisión tendrá la pieza).



## Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.2 - Paraboloides



Figura 74 - Vista de las capas en una pieza de pendiente constante



Figura 75 - Vista de las capas en una pieza curvada

Esto provoca que los reflectores no sean parábolas perfectas, sino realizadas a escalones de 0,2 milímetros de altura. En el reflector principal, el cual tiene un diámetro de 150 mm, la relación entre el tamaño y el espesor de capa es muy grande (750), pero en el reflector secundario, el cual solo tiene un diámetro de 10 mm, la relación es de 50 (se toman como referencia los diámetros ya que todas las demás medidas de los reflectores son proporcionales a los mismos). Al pasar de 750 a 50, se pierde precisión 15 veces, lo que provoca que el reflector secundario no sea capaz de concentrar adecuadamente la luz solar recibida del principal.

Esto se puede apreciar en que el haz de luz concentrado que sale por la parte trasera del sistema de reflectores no es constante, sino que se dispersa, por lo que sería necesaria la utilización de una lente convergente para rectificarlo y así poder estudiarlo. De esta manera se demuestra la importancia de la precisión en este sistema de reflectores.

Y como tercera carencia destacable del prototipo, se tiene que no se ha podido implementar la mejora descrita en el apartado 5.2.4 “mejora con un tercer reflector”, debido a la complejidad que aporta al sistema en general y, especialmente, a problemas de tamaño, dado que se necesitarían dos servomotores para orientar el tercer reflector y éstos no cabrían en el espacio disponible en el prototipo

Parábolas termosolares con doble reflector

5.2 - Paraboloides

construido. En el caso de haber utilizado un sistema de palancas acopladas a los reflectores primario y secundario en vez de servomotores, el espacio ocupado habría sido aún mayor, por lo que el problema se agrava aún más. De esta manera se demuestra que el tercer reflector incrementa en gran medida el coste y la complejidad del sistema.

### **5.3. CONCLUSIONES**

En base al diseño, construcción y observación del funcionamiento de los dos sistemas diseñados (orientación y concentración), se han obtenido las siguientes conclusiones reseñables:

#### **5.3.1. Ventajas del sistema ideado**

Por una parte, el sistema de orientación diseñado simplifica en gran medida los ya existentes en el mercado, además de que reduce también muy considerablemente su coste. A mayores, este sistema es polivalente, ya que se puede utilizar en cualquier elemento que se tenga que orientar hacia una fuente de luz, y también se puede utilizar en cualquier tipo de controlador.

Por otro lado, el sistema de doble reflector parabólico concentra la luz en un **punto fijo externo a la parábola**, lo que permite utilizar captadores más grandes y pesados sin tener que gastar energía en moverlos para orientar la parte parabólica.

En resumen, el conjunto de sistemas diseñados, prototipados y comprobados soluciona los problemas principales de los paraboloides concentradores de energía solar.

#### **5.3.2. Inconvenientes (no subsanables) del sistema ideado**

Como todo sistema industrial, no es perfecto, y su implementación acarrea consecuencias.

El sistema de seguimiento solar tiene el inconveniente de que necesita distribuir sensores a lo largo de los elementos a orientar (dos al menos, lo más separados posible), lo que incrementa el coste debido a que en instalaciones grandes la cantidad de conductores eléctricos puede llegar a ser muy considerable. Por el contrario, no hay problema con la caída de tensión en dichos conductores, ya que con hilos normales de 1,5 mm<sup>2</sup> la resistencia que aporta el conductor no afecta a las medidas de los sensores.



Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.3 - Conclusiones

El sistema de doble reflector tiene otros problemas que ya se han comentado anteriormente, principalmente derivados de la necesidad de precisión y el coste económico que ello conlleva.

Si la curvatura y la precisión de los captadores no es buena, el haz de luz concentrado no será constante, sino que convergerá o divergirá, lo que se deberá corregir con una (o dos) lentes convergentes o divergentes, con el aumento de costes y mantenimiento que ello conlleva.

La precisión será mucho más importante si se instala un tercer reflector (o más) para dirigir el haz de luz hacia otra zona lejos del paraboloide concentrador, ya que la desviación que pueda sufrir el haz de luz se incrementará con la distancia recorrida. Esto se puede corregir aumentando la precisión de los reflectores o colocando lentes correctoras de la desviación, ambas cosas con su respectivo coste añadido.

#### **5.3.3. Recomendaciones de cara a un sistema operativo real**

El sistema de orientación solar diseñado es perfectamente implementable a nivel industrial y comercial, por lo que la única recomendación que se puede hacer es que se utilice el mayor número de sensores posible, ya que, tal y como quedó anteriormente demostrado, el uso de más sensores aumenta muy considerablemente la precisión del sistema.

Por otro lado, el sistema de doble reflector aún no se ha probado a nivel industrial, así que en este caso todo lo averiguado sí que queda únicamente como recomendación.

Los espejos reflectores deben tener la mayor precisión posible en su curvatura, independientemente de su tamaño, para así evitar posteriormente problemas en el direccionamiento del haz concentrado.

Para la orientación en longitud, el sistema simplemente debe moverse en horizontal, es decir, pivotar sobre un eje, lo que se puede realizar de manera muy sencilla con un rail circular y un mínimo de tres ruedas (alguna de ellas con tracción mecánica para proporcionar el movimiento). No es necesario utilizar otro tipo de

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.3 - Conclusiones

sistemas que, sin duda alguna van a ser más complejos, para este movimiento horizontal, ya que no aportarían incremento alguno en el rendimiento. La única alternativa está en el vector energético que proporciona el movimiento, el cual se puede conseguir con un motor eléctrico de manera muy sencilla (opción más recomendable), pero si la instalación se realiza en algún sitio que ya cuente con un sistema de aceite hidráulico o aire a presión, se puede utilizar dicho sistema en turbinas hidráulicas o neumáticas a modo de motores para proporcionar el movimiento.

Debido a la forma de los reflectores, la acción del viento va a ser muy fuerte sobre la estructura, por lo que es muy importante sujetarla firmemente al suelo, así que las ruedas deberán disponer de un sistema de sujeción tanto por debajo (los propios raíles) como por encima, para evitar que la estructura pueda volcar.

En el caso de la orientación en latitud, se debe levantar el sistema de reflectores en contra de la gravedad, por lo que se necesitará un alto par motor. Si se utilizan motores eléctricos, la mejor opción es instalar un motor en cada lateral (para no crear fuerzas de torsión en la estructura), del mayor número de polos posible (para así tener siempre un mayor par de arranque, recordemos que el sistema va a instalarse a la intemperie y un tiempo sin hacerlo funcionar puede provocar el gripado de las partes mecánicas) y, en su defecto, un sistema de reducción (como un motor eléctrico se va a instalar directamente en el eje, la mejor opción será utilizar engranajes epicicloidales en el propio eje).

Para evitar que la parábola se mueva de manera no intencionada por acción de la gravedad o del viento, se deberá disponer de un sistema de frenado de la misma (mecánico, ya que uno eléctrico estaría funcionando la mayor parte del día consumiendo energía). Únicamente, si el motor eléctrico es de uno o dos pares de polos (1.400 ó 1.800 rpm si es de C.A.), necesitará un gran sistema de reducción mecánico, y gracias al rozamiento entre piezas del mismo, puede ser suficiente para frenar y sujetar los reflectores; si no lo fuera, dada la gran desmultiplicación en este caso sí que sería buena opción el freno eléctrico, ya que con un pequeño consumo de energía eléctrica y la reductora mecánica se podría sujetar la parábola.

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.3 - Conclusiones

Teniendo en cuenta la recomendación anterior, en este caso puede ser mucho más práctico disponer de un sistema hidráulico o aire comprimido, ya que mediante dos gatos hidráulicos (de nuevo, uno a cada lado para no crear torsión en la estructura), es muy sencillo levantar los paraboloides, y dicho sistema se controlaría con una electroválvula de cuatro vías con centro cerrado (4/3):

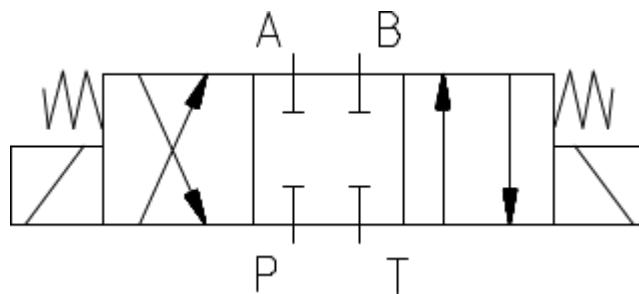


Figura 76 – Símbolo de válvula 4/3 con centros cerrados [20]

En función de si se necesitase hacer subir o bajar los reflectores, se activaría un solenoide u otro. No se necesitaría ningún tipo de freno, ya que la propia válvula al cerrarse bloquearía los gatos hidráulicos o neumáticos.

Un sistema real deberá disponer, al igual que el prototipo diseñado, de una parte en el control que le impida arrancar si no hay un nivel de luminosidad ambiental mínimo, ya que de no ser así, los paraboloides se seguirían orientando en días muy nublados o incluso de noche con la luz de la luna, sin concentrar energía pero gastándola en el movimiento.

Y aún más importante es que, de igual manera, el sistema disponga también de interruptores de final de carrera que limiten el movimiento, especialmente si se cuenta con motores rotativos en vez de gatos hidráulicos o neumáticos, ya que los gatos tienen limitado el movimiento por construcción (cuando llegan al máximo de su recorrido), pero un motor rotativo (eléctrico, hidráulico o neumático) seguirá girando indefinidamente y moviendo el sistema incluso más allá del límite mecánico de sus piezas.

#### 5.3.4. Aplicaciones del sistema ideado

Este sistema es ideal en aplicaciones de mediano y pequeño tamaño en las que se necesitan alcanzar temperaturas altas.

Parábolas termosolares con doble reflector

### 5.3 - Conclusiones

Para el calentamiento de ACS, el cual tiene normalmente un consumo discontinuo y cuenta con un depósito de acumulación, se consigue que con el tiempo (horas) se puedan alcanzar altas temperaturas (80 ó 90° C), lo que permite almacenar agua sin que se desarrolle la legionela (problema común en las instalaciones de ACS). En comparación con otros sistemas como las placas termosolares, el uso de paraboloides del mismo tamaño permite alcanzar mayores temperaturas.

En el caso de cocinas y hornos solares, se puede disponer de reflectores con orientación automática, independientes del punto en el que se sitúen los elementos a cocinar, lo que proporciona una mucho mayor comodidad y se puede automatizar para que, por ejemplo, al cabo de un tiempo determinado se desconecte simplemente variando la orientación de la parábola.

En aplicaciones industriales, su uso puede ser mucho más diverso, ya que como se ha dicho anteriormente, permite alcanzar temperaturas mucho mayores que otros sistemas, así que es apto para cualquier aplicación que necesite una alta temperatura con un pequeño caudal; pero como en el caso de fluidos se pueden conectar varios captadores en serie o en paralelo, el sistema también sería apto para aplicaciones que demandasen caudales mayores.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al Maker Club León, que me ha permitido utilizar su material e instalaciones para la realización de los prototipos.

A Mielgo y Fernando, fieles compañeros de biblioteca durante la realización de esta memoria; igualmente a Dani y las técnicas de laboratorio, en su caso durante la realización de las piezas para los montajes.

A Inés y Olga, por sus revisiones y correcciones sin las cuales este documento sería un poco menos científico.

A Inmaculada, la FELE y ASELE, por el Concurso de Prototipos de la Escuela de Ingenierías, en el que me otorgaron el premio al proyecto innovador de aplicación para la empresa con el prototipo de panel solar orientable.

A mi tutor, por las ideas y el apoyo recibido para realizar este trabajo.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TFV Solar (3 oct 2009) Guiso de cordero al sol, en cocina solar. Benidorm. [vídeo online] <https://i.ytimg.com/vi/9ilKaAN-ECs/maxresdefault.jpg>
- [2] HVAC Engineering (2022) Tecnologías de colectores solares. [online] <https://hvac-eng.com/es/tecnolog%C3%ADas-de-colectores-solares/>
- [3] ROAMS Energía, Sofía Villasur (21 jun 2022) Placas solares agua: cómo funcionan [online] <https://energia.roams.es/energia-renovable/energia-solar/placas-solares-agua/>
- [4] Global Solare (28 mar 2018) ¿Cómo está compuesto un calentador solar? [online] <https://globalsolare.com/blog/como-esta-compuesto-un-calentador-solar/>
- [5] Sunflower Solar (2022) ¿Cómo funcionan los calentadores solares de agua? [online] [http://www.sunflower-solar.com/index\\_es.php?act=content&scheduler\\_id=1359](http://www.sunflower-solar.com/index_es.php?act=content&scheduler_id=1359)
- [6] Cámara.pro (2022) ¿Qué es una lente de Fresnel? [online] <https://camara.pro/una-lente-fresnel/>
- [7] CNIM Groupe (25 mar 2014) Compact Linear Fresnel Reflector technology by CNIM – Concentrating solar power plant [vídeo online] <https://www.youtube.com/watch?v=pP48pAb8sec>
- [8] TeknoPlof! (2011) PS10: La megatorre sevillana de la energía solar (y cómo funciona) [online] <https://www.teknoplof.com/2014/11/06/ps10-la-megatorre-sevillana-de-la-energia-solar-y-como-funciona/>
- [9] Chumillas Technology (16 mar 2021) Capítulo 2: infografía: funcionamiento de una planta termosolar [online] <https://www.chumillastechnology.com/blog/infografia-funcionamiento-de-una-planta-termosolar/>
- [10] Dario Panaroni, Mayra Mujica, Mercedes Abal Matos, Leonardo Corujo, Federico Cervini, Ana Castro Luna, Luis Martorelli. Laboratorio de Óptica,

Parábolas termosolares con doble reflector

7 - Referencias bibliográficas

Calibración y Ensayo LOCE - Universidad Nacional de La Plata Argentina. Diseño óptimo de un colector cilíndrico parabólico inclinado para generación directa de vapor [documento online]

<https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/6785/Panaroni.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

[11] J. Olguín Camacho \*†, N. Peralta Aguilar, L. A. Salinas Diego, y D. Jiménez Islas, “Desarrollo de un Colector Canal Parabólico con índice de Concentración Variable”, *Revista de Prototipos Tecnológicos*, Vol.3 No.9 56-62, Septiembre, 2017 [disponible online]

[https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Prototipos\\_Tecnologicos/vol3num9/Revista\\_de\\_Prototipos\\_Tecnologicos\\_V3\\_N9\\_7.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Prototipos_Tecnologicos/vol3num9/Revista_de_Prototipos_Tecnologicos_V3_N9_7.pdf)

[12] Rodrigo Medina C. “Análisis del flujo energético 3d en colectores concentradores solares de diversas geometrías”, memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Departamento de ingeniería mecánica, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile (8 nov 2010) [disponible online]

[https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103993/cf-medina\\_rc.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103993/cf-medina_rc.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

[13] J. M. Martínez-Val Peñalosa, M. Piera Carrete. Colectores solares cilindro-parabólicos equilibrados con tubo absorbedor fijo. Patente española P200801909, 9 feb 2011. [disponible online] <https://patentados.com/2011/colectores-solares-cilindro-parabolicos>

[14] Construir TV - Sustentabilidad (2017) Argentinos desarrollan un motor solar [online] <https://www.construirtv.com/argentinos-desarrollan-un-motor-solar/>

[15] Drini - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, [imagen online] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4170268>

[16] Diferenciador, ciencias (2018) Reflexión y refracción de la luz [online] <https://www.diferenciador.com/reflexion-y-refraccion-de-la-luz/>

[17] Luis Llamas, (6 jun 2016), Controlar un servo con Arduino, [online] <https://www.luisllamas.es/controlar-un-servo-con-arduino/>



Parábolas termosolares con doble reflector  
7 - Referencias bibliográficas

[18] Antonio Castilla, Trazoide (1 nov 2017) Parábola conocidas dos tangentes y sus puntos de tangencia – 986 [online] [https://trazoide.com/parabola\\_986/](https://trazoide.com/parabola_986/)

[19] Luis Llamas (13 ago 2016), Motor paso a paso 28BYJ48 con Arduino y driver ULN2003 [online] <https://www.luisllamas.es/motor-paso-paso-28byj-48-arduino-driver-uln2003/>

[20] SMC International Training (2022), Electrohidráulica transparente – válvulas distribuidoras [catálogo online] <https://www.smctraining.com/webpage/indexpage/126>

Parábolas termosolares con doble reflector  
8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

## 8. ANEXOS

### 8.1. ANEXO I – PROGRAMAS DE ARDUINO

#### 8.1.1. Orientación de panel solar en un eje

```
//Jorge Candanedo Moral - TFM Máster en Ingeniería Industrial
```

```
//14 de marzo de 2022
```

```
//Librería que controla el servomotor:
```

```
#include <Servo.h>
```

```
//Definición del servo que vamos a utilizar:
```

```
Servo servo_1;
```

```
//Definición de la variable que controla la posición del servo:
```

```
int posicion = 90;
```

```
//Definición de las variables que controlan la luminosidad de las LDR:
```

Jorge Candanedo Moral  
Máster en Ingeniería Industrial

Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
int ldr_1;
```

```
int ldr_2;
```

```
//Variables que controlan la tolerancia que activará el movimiento:
```

```
int tol;
```

```
int xtol;
```

```
//Se define la variable que junta las dos medidas de las LDR:
```

```
int A;
```

```
//FIN DE LAS DEFINICIONES PREVIAS AL PROGRAMA.
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
  //Definición del pin de señal para el servo:
```

```
  servo_1.attach(10);
```

```
} //Fin del bucle SETUP.
```

Parábolas termosolares con doble reflector  
8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
void loop()
{
  //Lectura del valor del potenciómetro de tolerancia:
  tol = analogRead (4);

  //Lectura de las resistencias LDR:
  ldr_1 = analogRead (0);
  ldr_2 = analogRead (2);

  //Se pasan las dos lecturas a un solo valor:
  A = ldr_1 - ldr_2;

  //Como A será positiva o negativa, se crea el valor opuesto de la tolerancia para que el sistema funcione
  en ambas direcciones.
  xtol = - tol;

  //Si la LDR 1 tiene menos luz que la LDR 2, el servo retrocede:
  if (A > tol)
```

Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
{  
    posicion --;  
}  
  
//Si la LDR 1 tiene más luz que la LDR 2, el servo avanza:  
if (A < xt01)  
{  
    posicion ++;  
}  
  
//Se actualiza la posición del servomotor:  
servo_1.write(posicion);  
  
//Se introduce un delay para que la velocidad del servo no sea excesiva:  
delay (2);  
  
} //Fin del bucle LOOP.  
  
//FIN DEL PROGRAMA
```

Parábolas termosolares con doble reflector  
8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

### 8.1.2. Orientación de concentrador parabólico en dos ejes

```
//ORIENTADOR DE CONCENTRADOR PARABÓLICO EN DOS EJES.
```

```
//Jorge Candanedo Moral - TFM Máster en Ingeniería Industrial
```

```
//12 de julio de 2022
```

```
// El movimiento en LONGITUD es controlado por el MOTOR DE PASOS.
```

```
// El movimiento en LATITUD es controlado por el SERVOMOTOR.
```

```
// Librería que controla el servomotor:
```

```
#include <Servo.h>
```

```
// Librería que controla el motor de pasos:
```

```
#include <Stepper.h>
```

```
// Definición de los pines de los leds:
```

```
#define led_lum 50
```

```
#define led_finc_lat 51
```

```
#define led_finc_lon 52
```

Jorge Candanedo Moral  
Máster en Ingeniería Industrial

Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
// Definición de los pines de los finales de carrera:
```

```
#define finc_1lat 40
```

```
#define finc_2lat 41
```

```
#define finc_1lon 42
```

```
#define finc_2lon 43
```

```
// Definición del servo que vamos a utilizar:
```

```
Servo servo_lat;
```

```
// Definición de la variable que controla la posición del servo:
```

```
int posicion;
```

```
// Definición del motor de pasos que vamos a utilizar: (nº de pasos por vuelta, pines de conexión).
```

```
Stepper motPasos (200, 8, 9, 10, 11); // Motor 17HS13-0404S --> 200 pasos/rev.
```

```
// Definición de las variables que controlan la luminosidad de las LDR:
```

```
int ldr1_lat;
```

```
int ldr2_lat;
```

```
int ldr1_lon;
```



Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
int ldr2_lon;
```

```
// Variables que controlan la tolerancia que activará el movimiento:
```

```
int lumin, lugen;
```

```
int tol;
```

```
// Se define la variable que junta las dos medidas de las LDR:
```

```
int dif_lat;
```

```
int dif_lon;
```

```
//FIN DE LAS DEFINICIONES PREVIAS AL PROGRAMA.
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
    // Definición del pin de señal para el servo:
```

```
    servo_lat.attach(7);
```

Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
// Definición de la velocidad del motor de pasos:
motPasos.setSpeed(2); // Velocidad en rpm.

// Definición de los leds como salidas:
pinMode (led_lum, OUTPUT);
pinMode (led_finc_lat, OUTPUT);
pinMode (led_finc_lon, OUTPUT);

} // Fin del bucle SETUP.

void loop()
{
  // Lectura del valor del potenciómetro de luminosidad mínima:
  lumin = analogRead (5); //Valor de 0 a 1023.

  // Lectura del valor del potenciómetro de tolerancia:
  tol = analogRead (6); //Valor de 0 a 1023.
```

Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
// Lectura de las resistencias LDR:

ldr1_lat = analogRead (0); //Servomotor.
ldr2_lat = analogRead (1); //Servomotor.
ldr1_lon = analogRead (2); //Motor de pasos.
ldr2_lon = analogRead (3); //Motor de pasos.

// Suma de todos los sensores para obtener la luminosidad general (0 ~ 4092):
lugen = (ldr1_lat + ldr2_lat + ldr1_lon + ldr2_lon)/4; // Se divide entre 4 para tener un valor entre
0 y 1023.

// El sistema no arrancará hasta que la luminosidad mínima supere lo indicado.
// Si la luz sube, la resistencia baja, y con ella la tensión:
if (lugen < lumin)
{
    // Se enciende el led de luminosidad mínima alcanzada.
    digitalWrite (led_lum, HIGH);

    // Obtención de un solo valor en cada eje:
    dif_lat = ldr1_lat - ldr2_lat; // Servomotor.
```

Parábolas termosolares con doble reflector

8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
dif_lon = ldr1_lon - ldr2_lon; // Motor de pasos.

// Movimiento con SERVOMOTOR:
// No se moverá si ha llegado a algún final de carrera (1 lógico).
if (finc_1lat == LOW && finc_2lat == LOW)
{
    // Se apaga el led de "alcanzado el límite de movimiento" en latitud.
    digitalWrite (led_finc_lat, LOW);

    //Si la LDR 1 de latitud tiene menos luz que la LDR 2, el servo retrocede:
    if (dif_lat > tol)
    {
        posicion --;
    }

    //Si la LDR 1 de latitud tiene más luz que la LDR 2, el servo avanza:
    if (dif_lat < (- tol))
    {
```

Parábolas termosolares con doble reflector  
8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
    posicion ++;
}

// Se actualiza la posición del servomotor:
servo_lat.write(posicion);

// Se introduce un delay para bajar la velocidad del servo:
delay (2); //Milisegundos.

} //Fin del if de movimiento del servomotor.

else
{
    // Se enciende el led de "alcanzado el límite de movimiento" en latitud.
    digitalWrite (led_finc_lat, HIGH);
}

//Movimiento con MOTOR DE PASOS:
```

Parábolas termosolares con doble reflector

## 8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
// Solo girará si no ha llegado a los finales de carrera.
if (finc_1lon == LOW && finc_2lon == LOW)
{
  // Se apaga el led de "alcanzado el límite de movimiento" en longitud.
  digitalWrite (led_finc_lon, LOW);

  //Si la LDR 1 de longitud tiene menos luz que la LDR 2, el motor de pasos retrocede:
  while (dif_lon > tol)
  {
    // En cada vuelta del bucle, el motor retrocede 2 pasos.
    motPasos.step(-2);
  }

  //Si la LDR 1 de longitud tiene más luz que la LDR 2, el motor de pasos avanza:
  while (dif_lon < (- tol))
  {
    // En cada vuelta del bucle, el motor avanza 2 pasos.
    motPasos.step(2);
  }
}
```

Parábolas termosolares con doble reflector  
8.1 – Anexo I – Programas de Arduino

```
    }

    } // Fin del if de movimiento del motor de pasos.

else
{
    // Se enciende el led de "alcanzado el límite de movimiento" en longitud.
    digitalWrite (led_finc_lon, HIGH);
}

} //Fin del if de luminosidad mínima.

else
{
    // Se apaga el led de "luminosidad mínima alcanzada".
    digitalWrite (led_lum, LOW);
}

} // Fin del bucle LOOP.
```



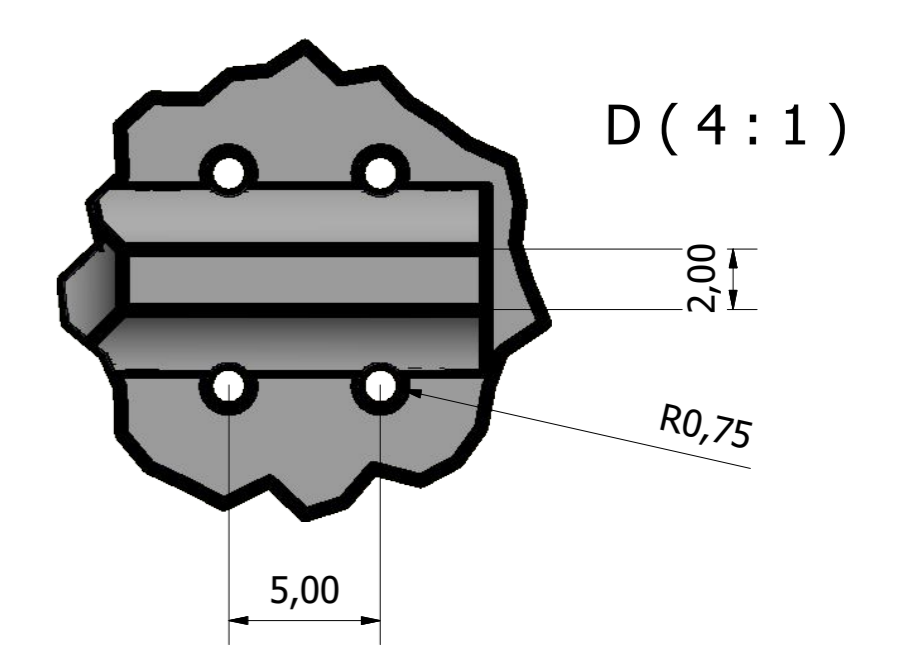
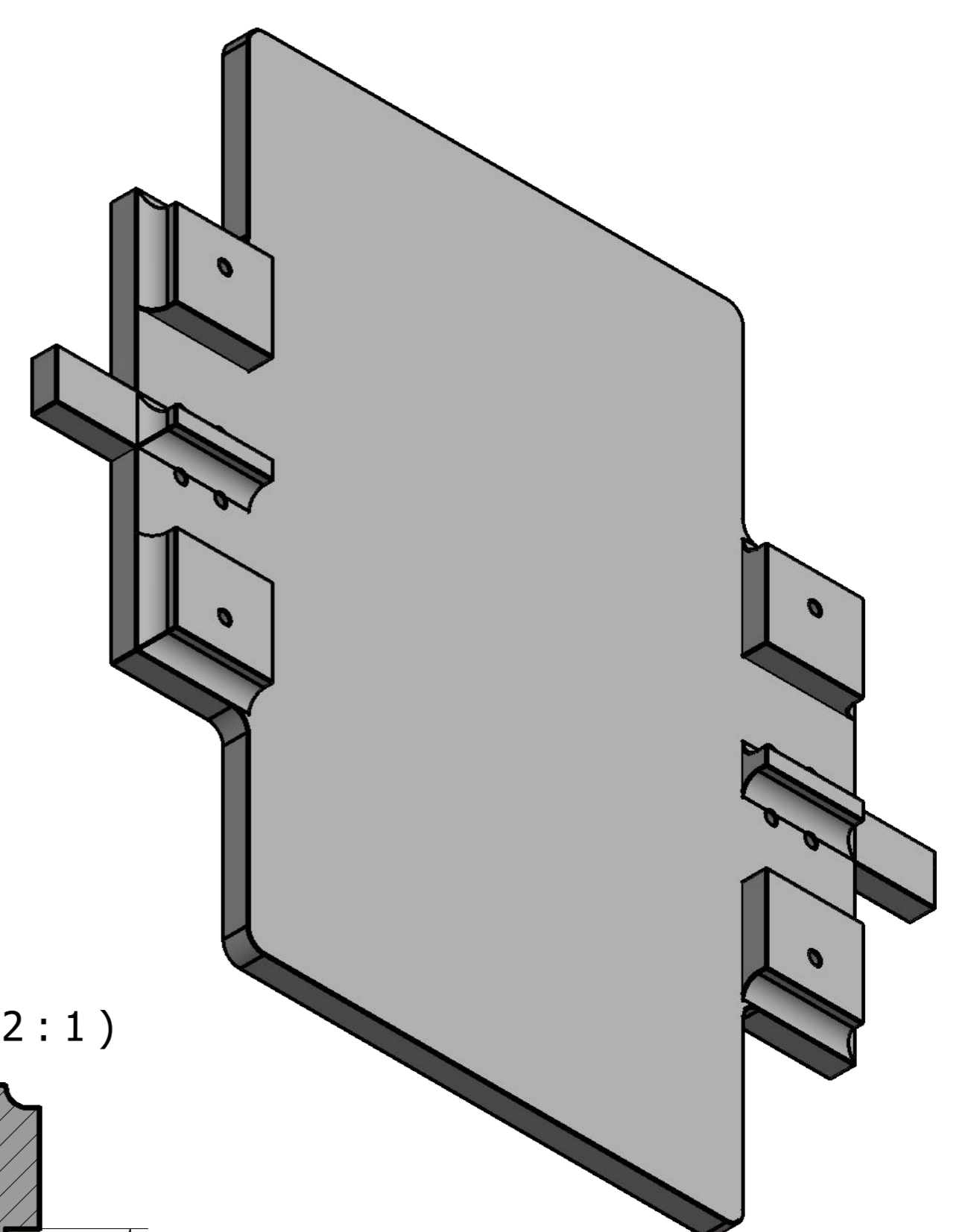
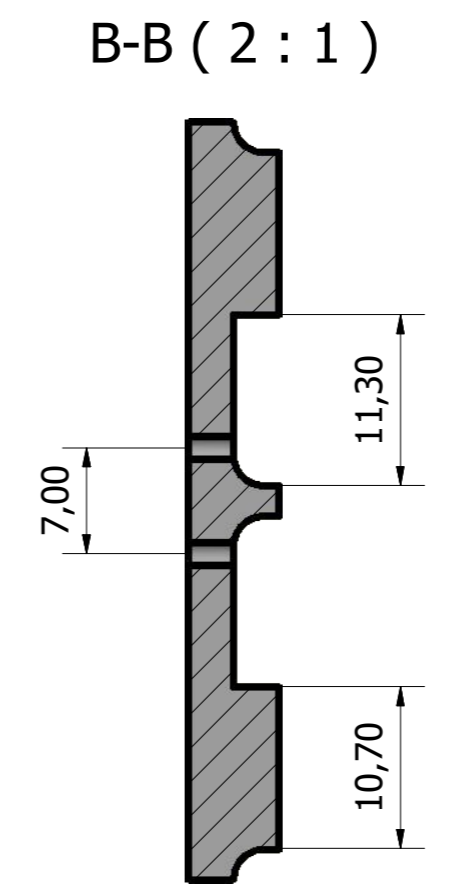
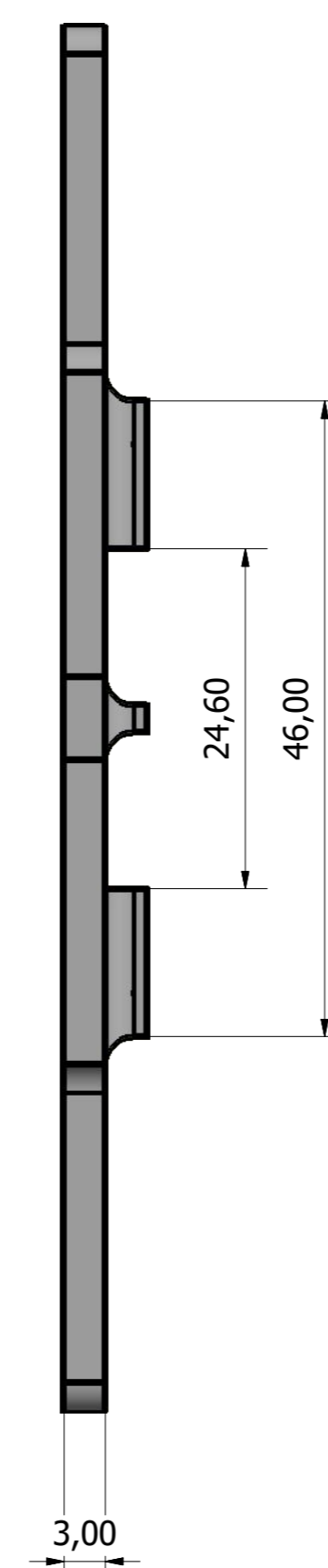
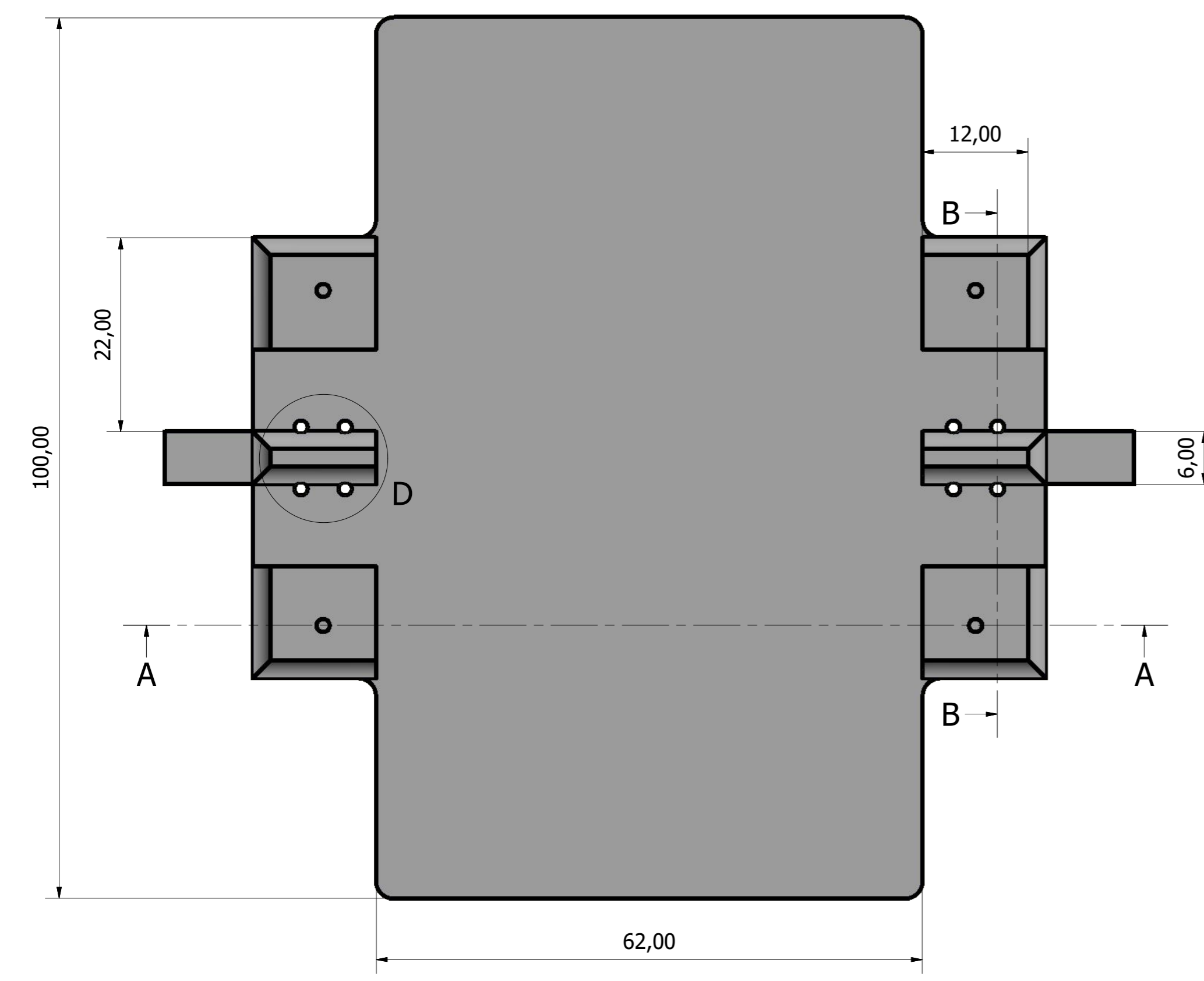
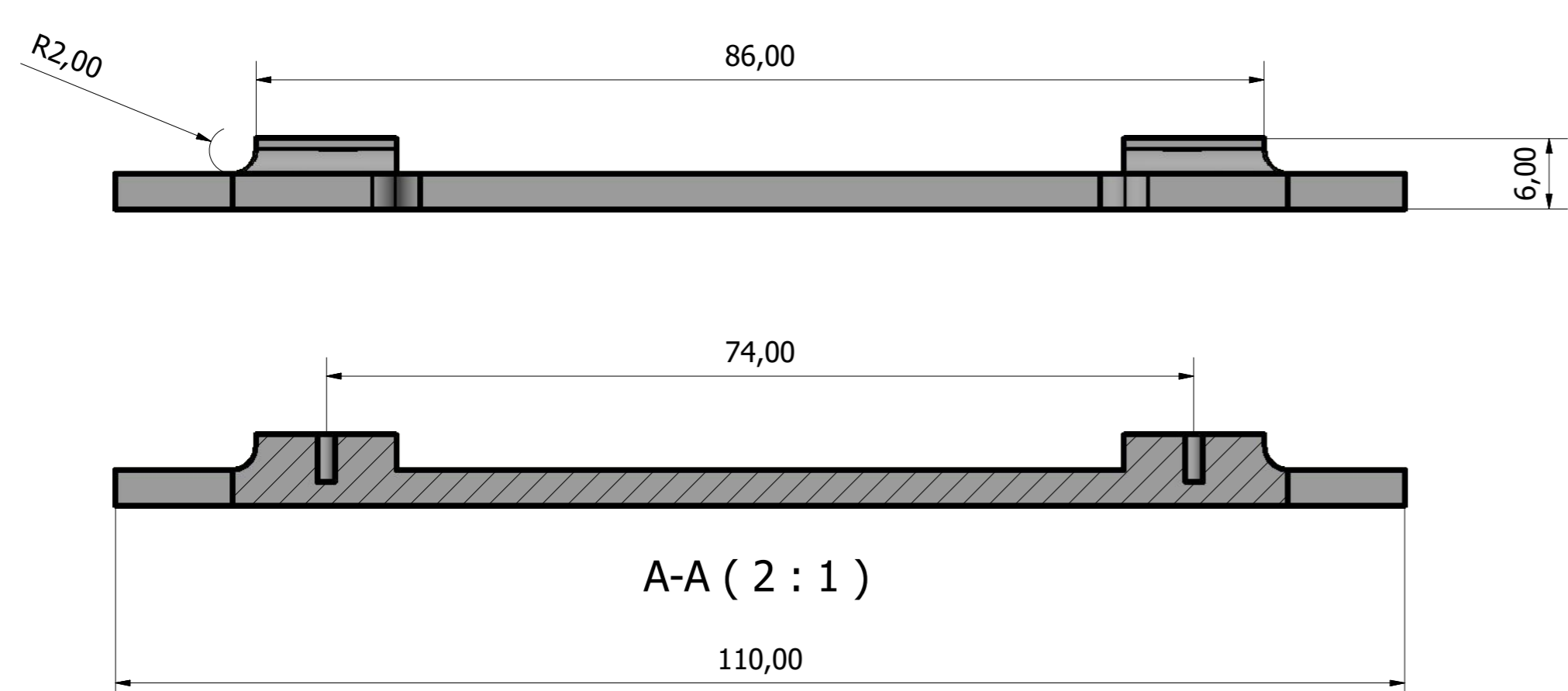
Parábolas termosolares con doble reflector  
8.2 – Anexo II – Diseños realizados en inventor

## **8.2. ANEXO II – PLANOS DE LOS DISEÑOS REALIZADOS EN INVENTOR**

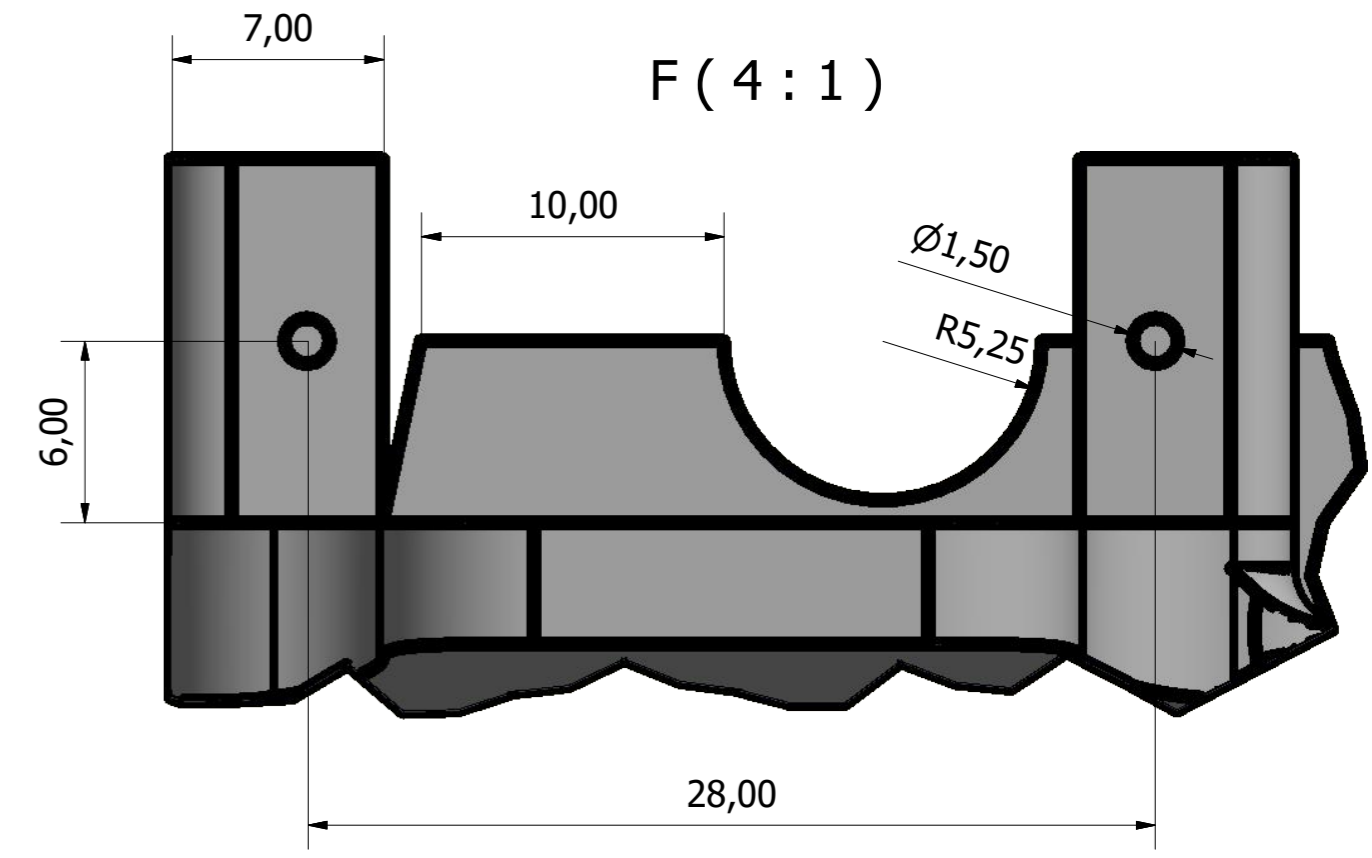
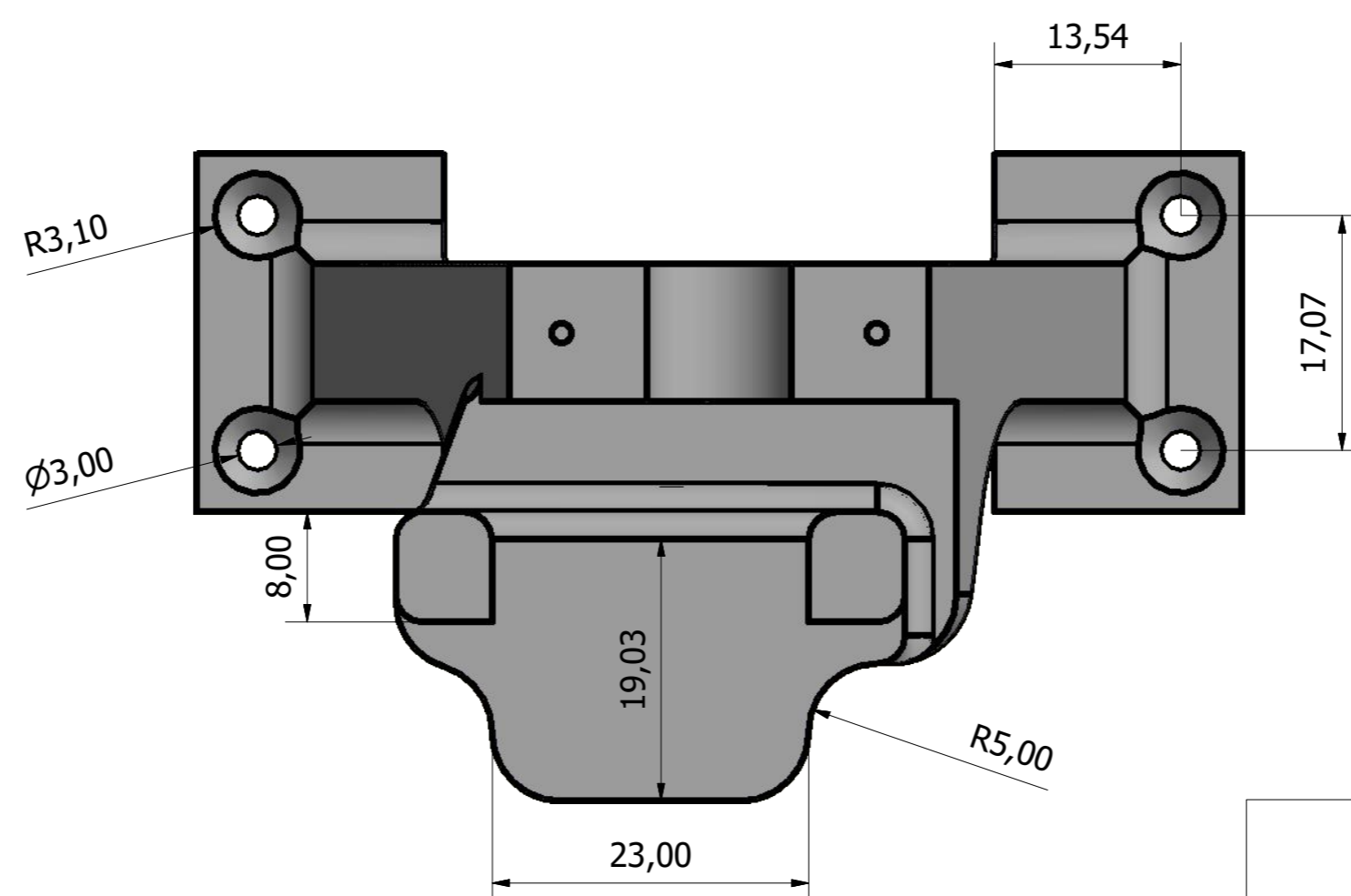
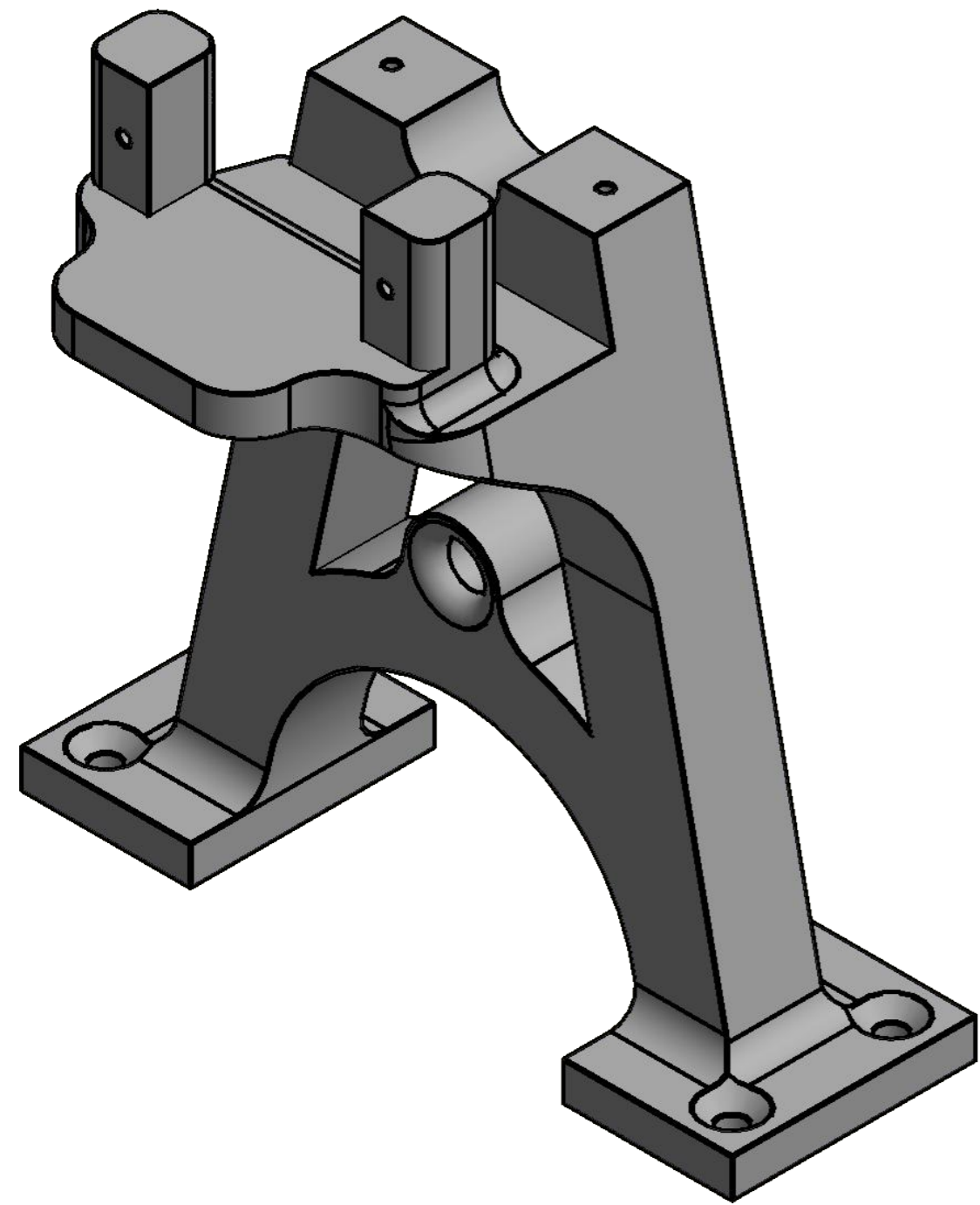
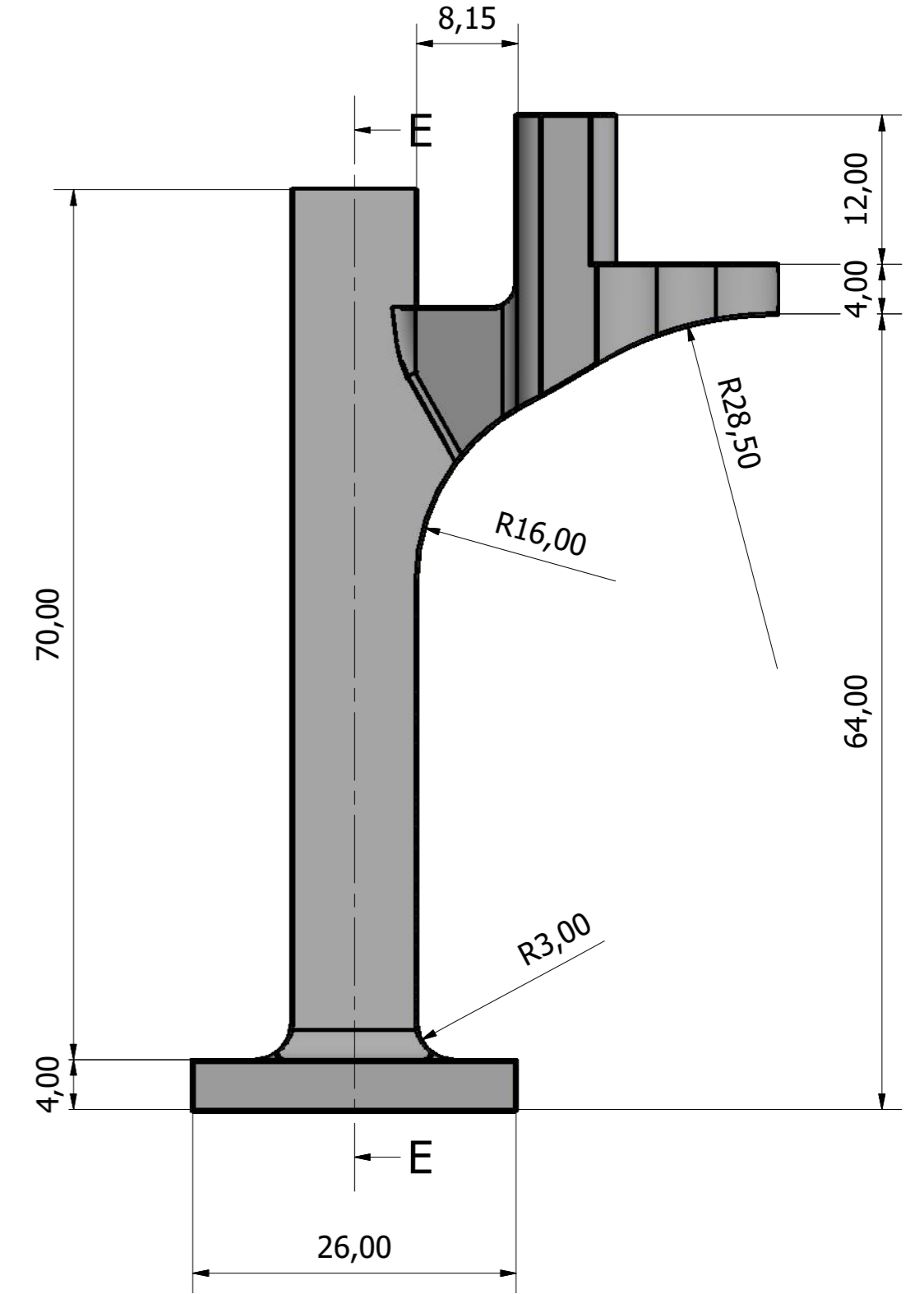
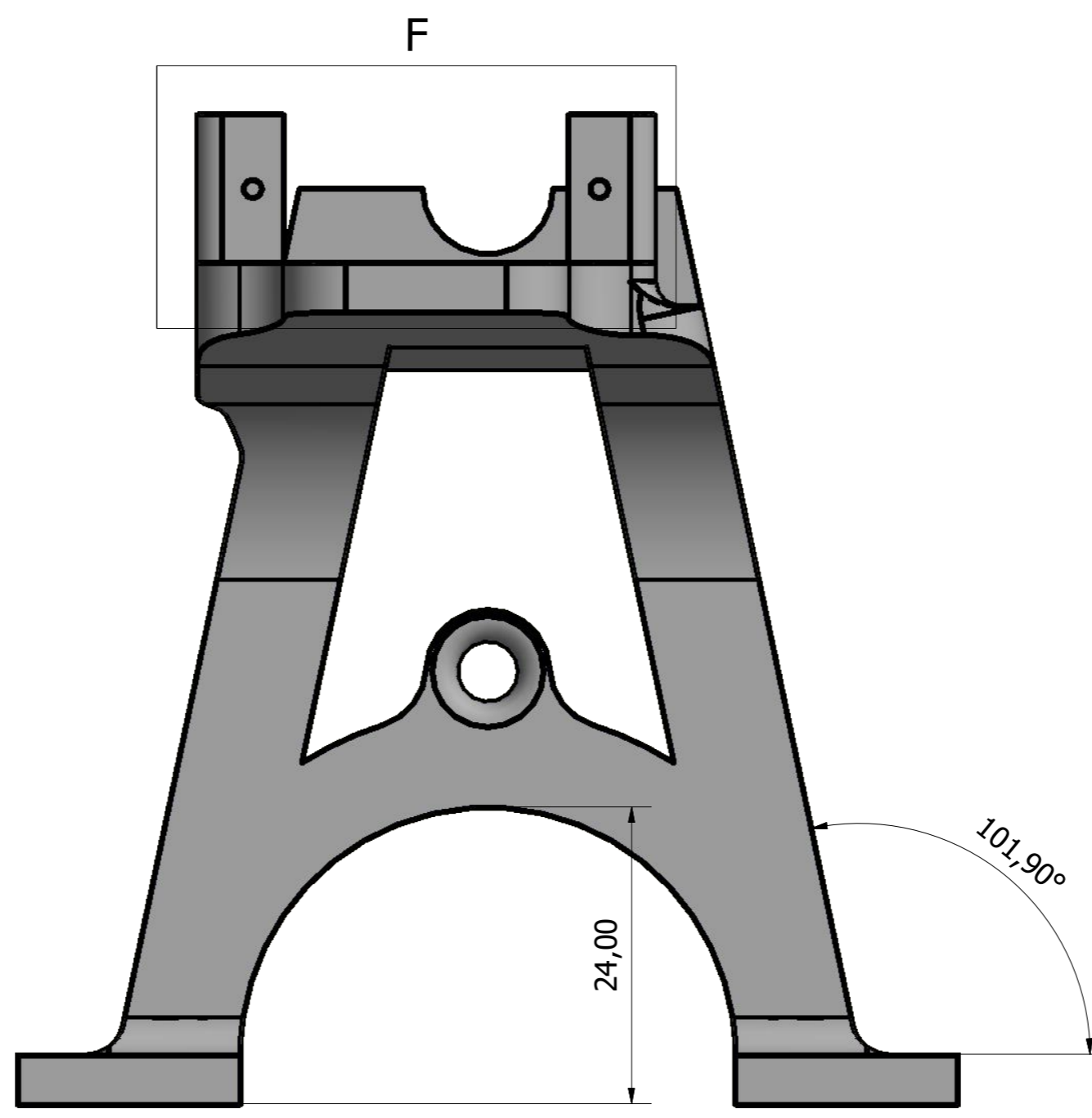
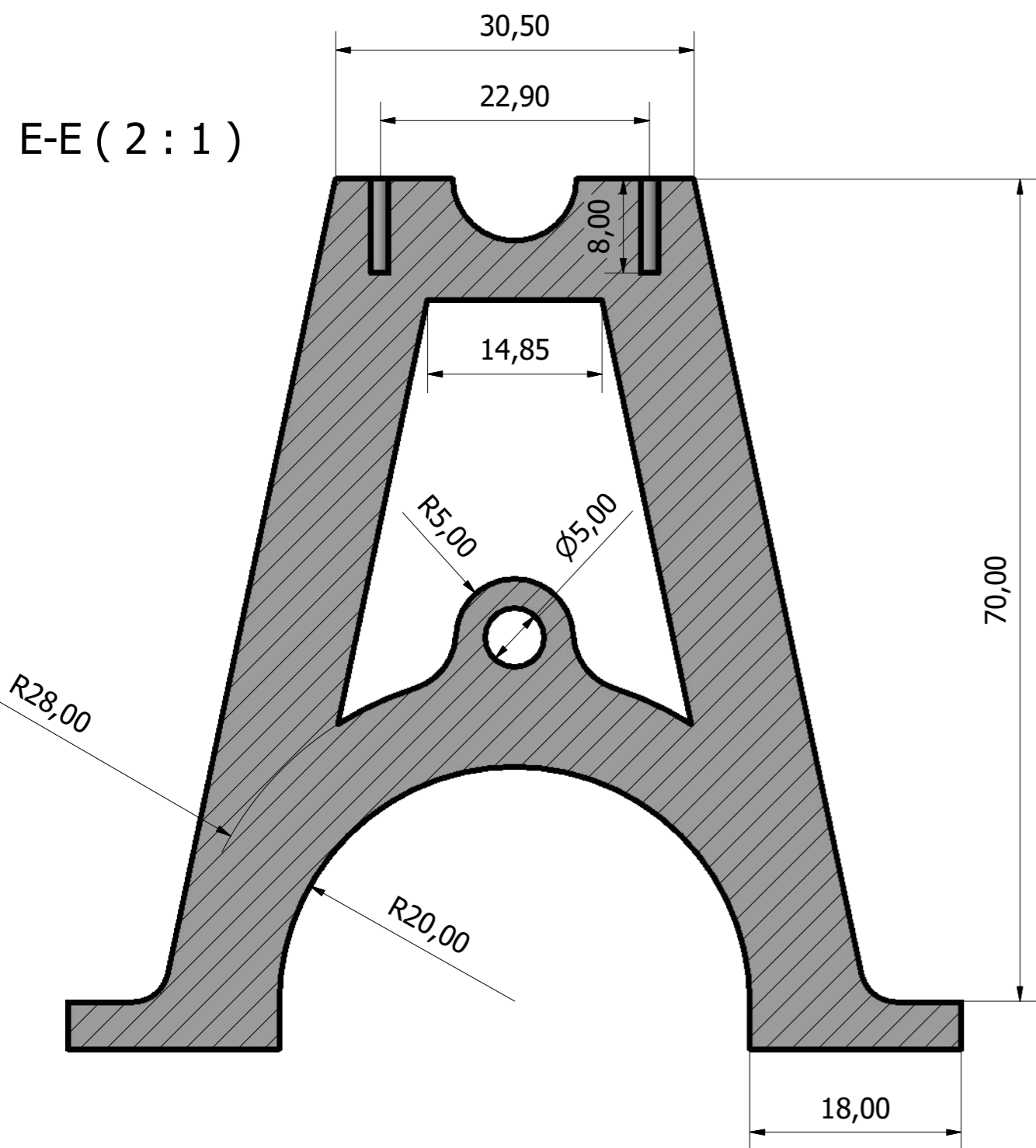
**8.2.1. Prototipo de panel fotovoltaico orientable en un eje**

**8.2.2. Sensor de dirección de luz apto para exteriores**

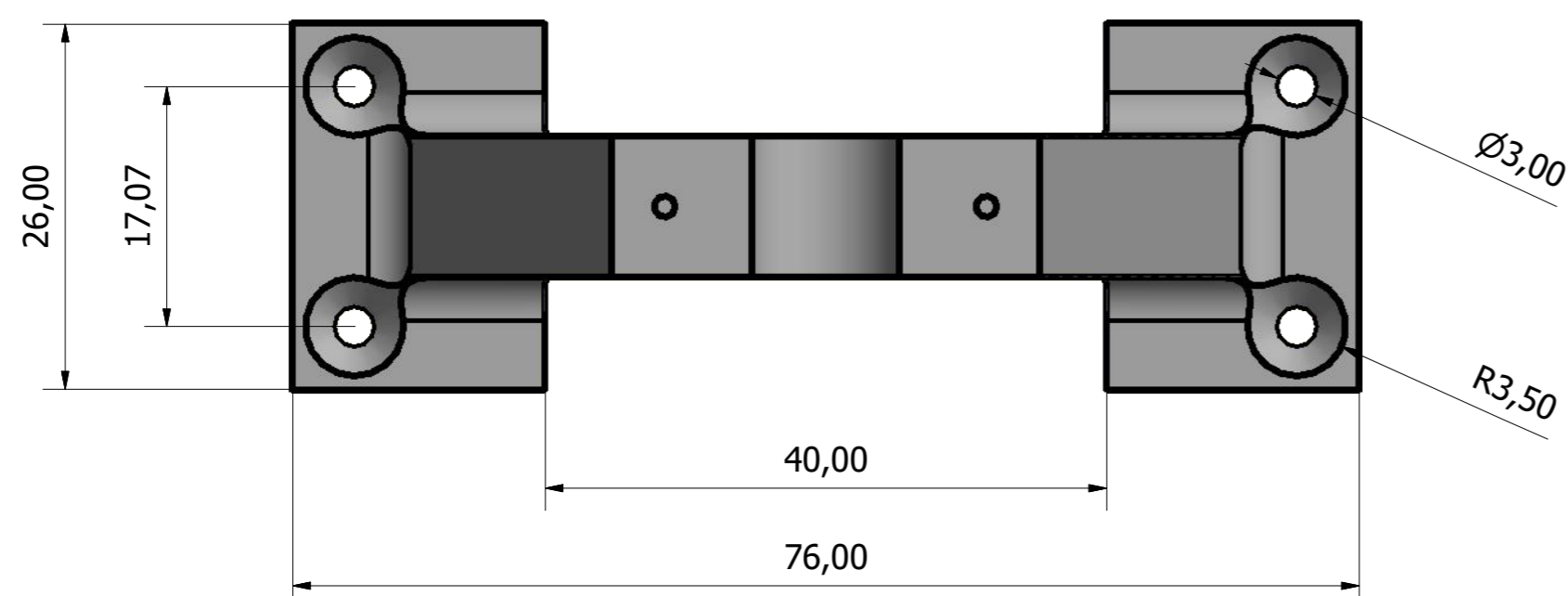
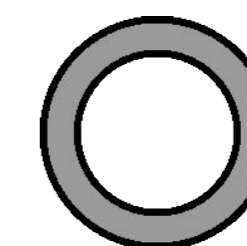
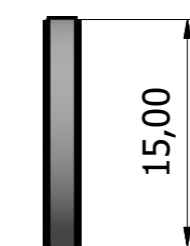
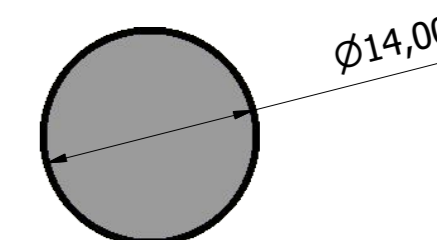
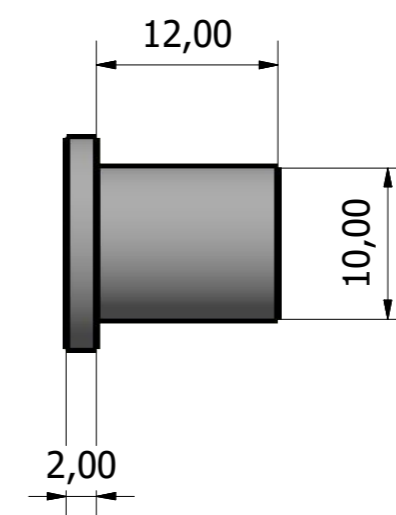
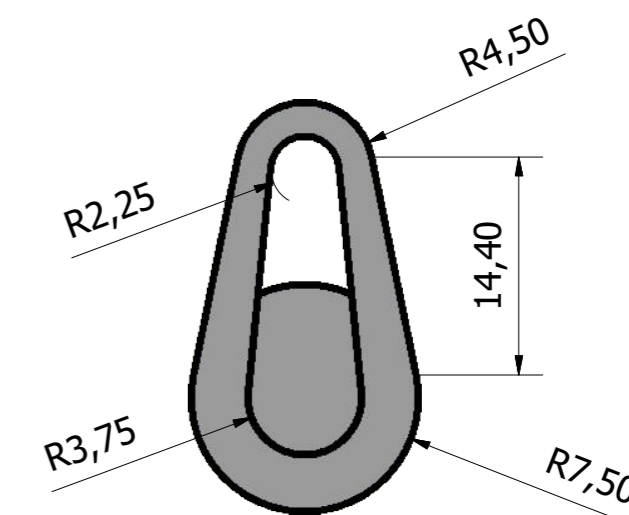
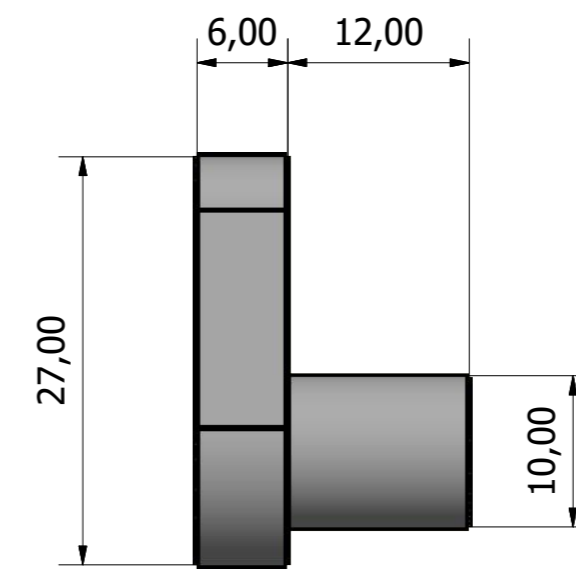
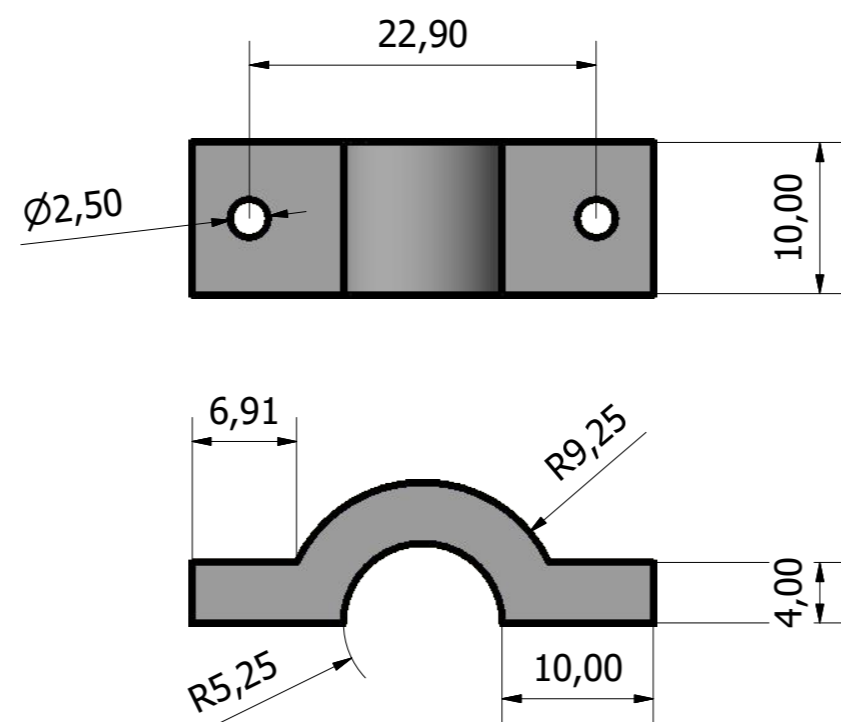
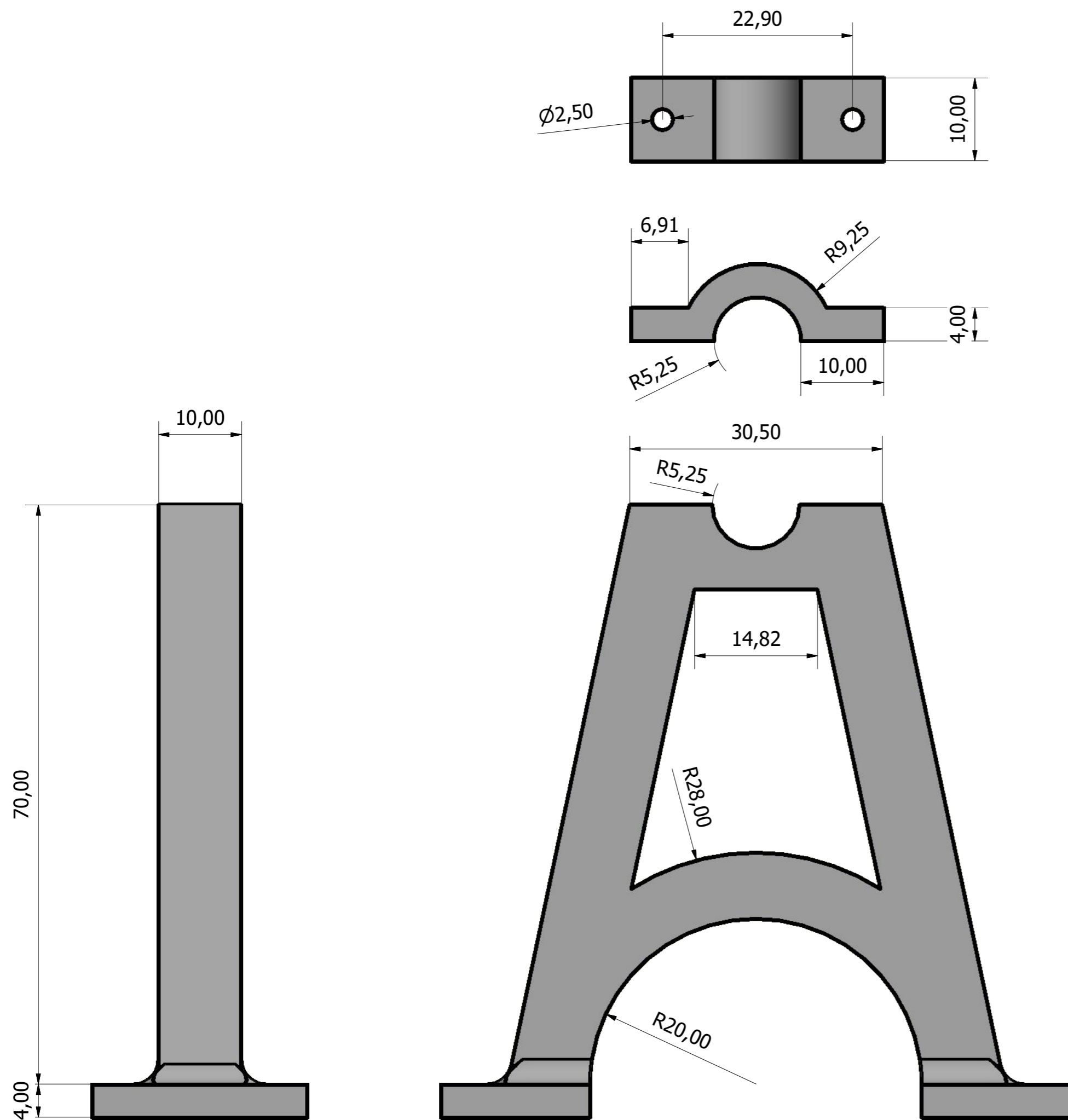
**8.2.3. Prototipo de concentrador parabólico orientable en dos ejes**



TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.1 - 1	PROTOTIPO DE PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO ORIENTABLE EN UN EJE
	PIEZA: Panel solar
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 23/12/2021

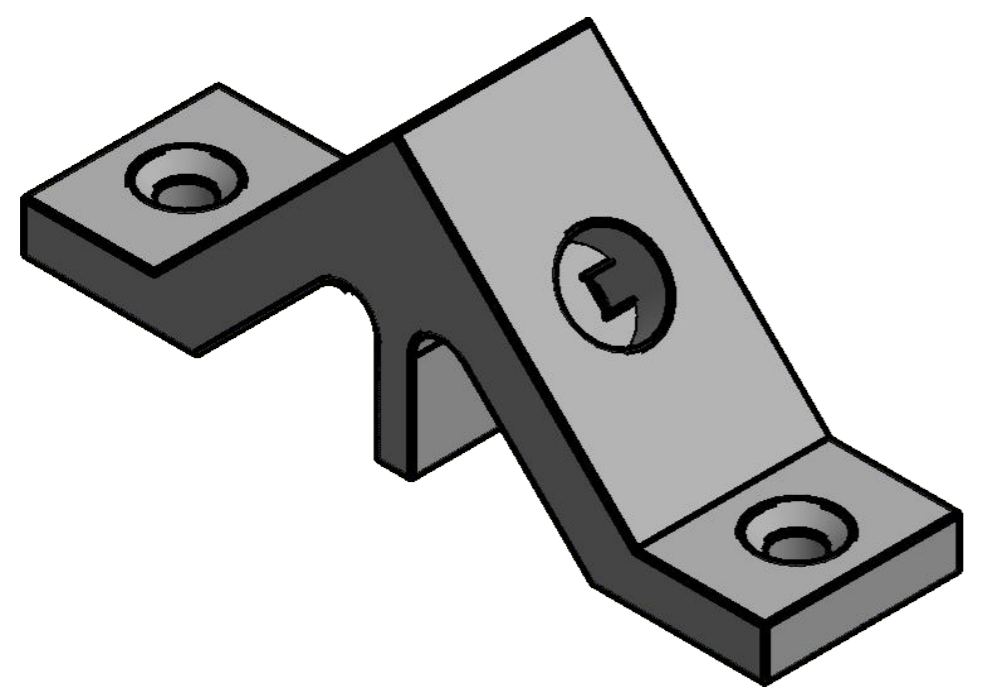
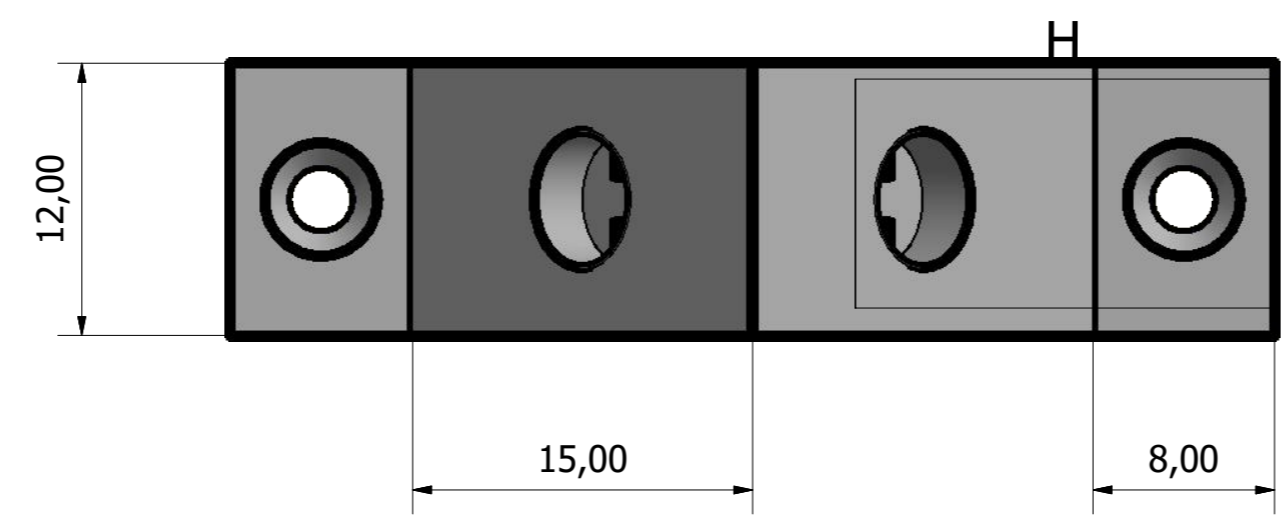
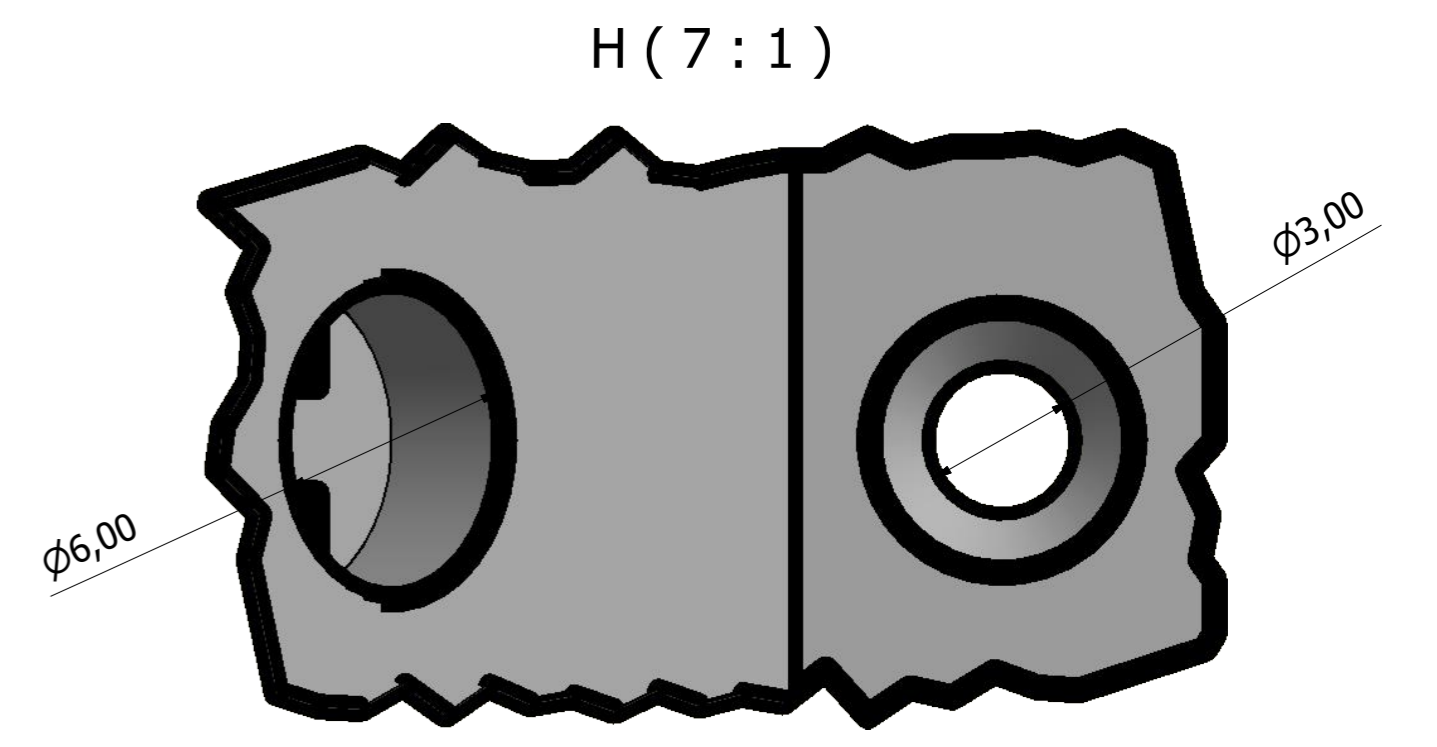
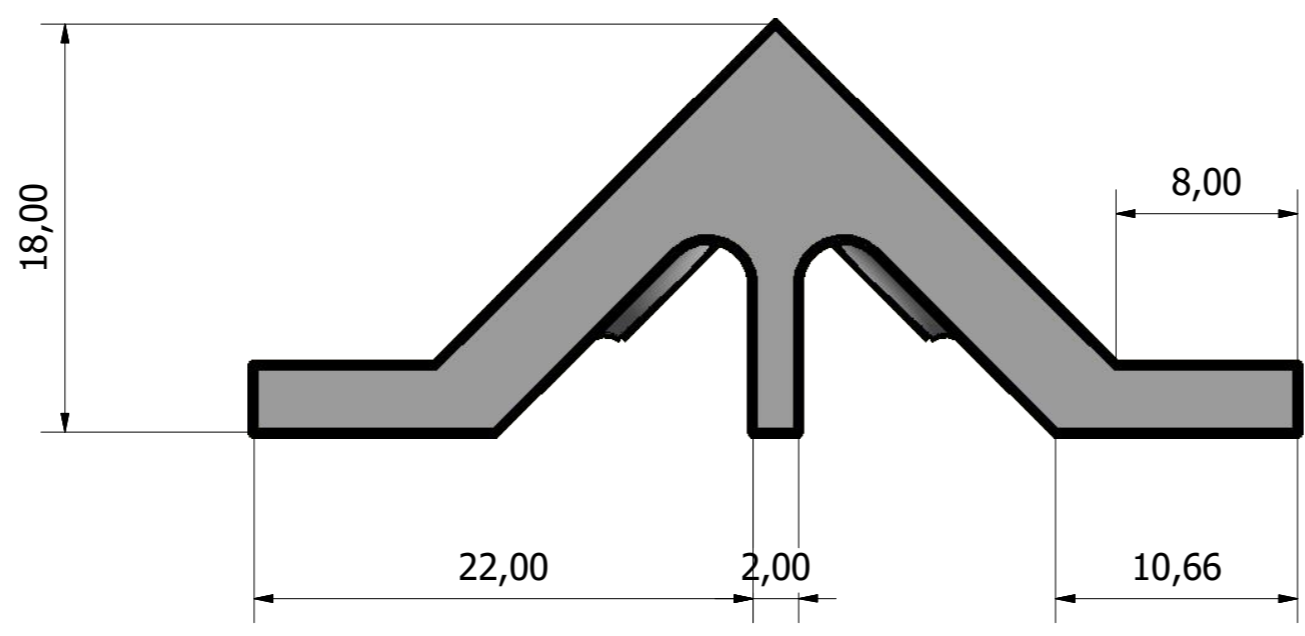
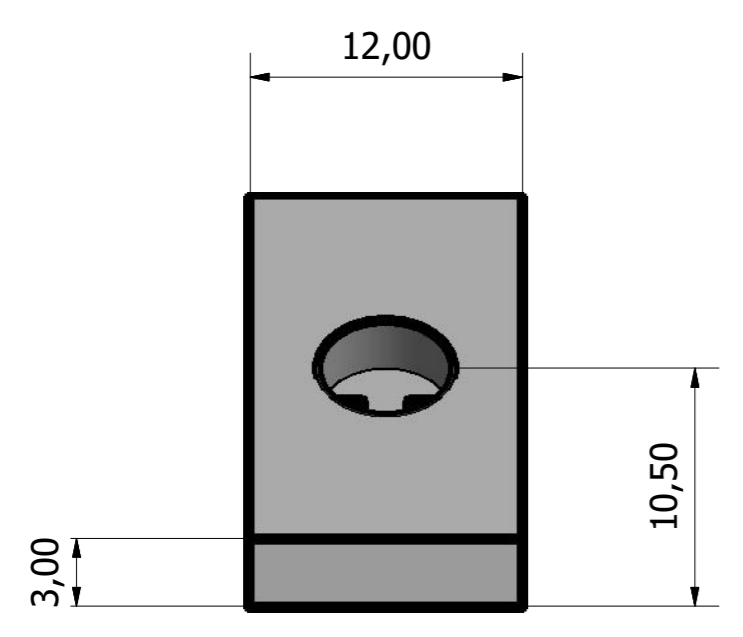
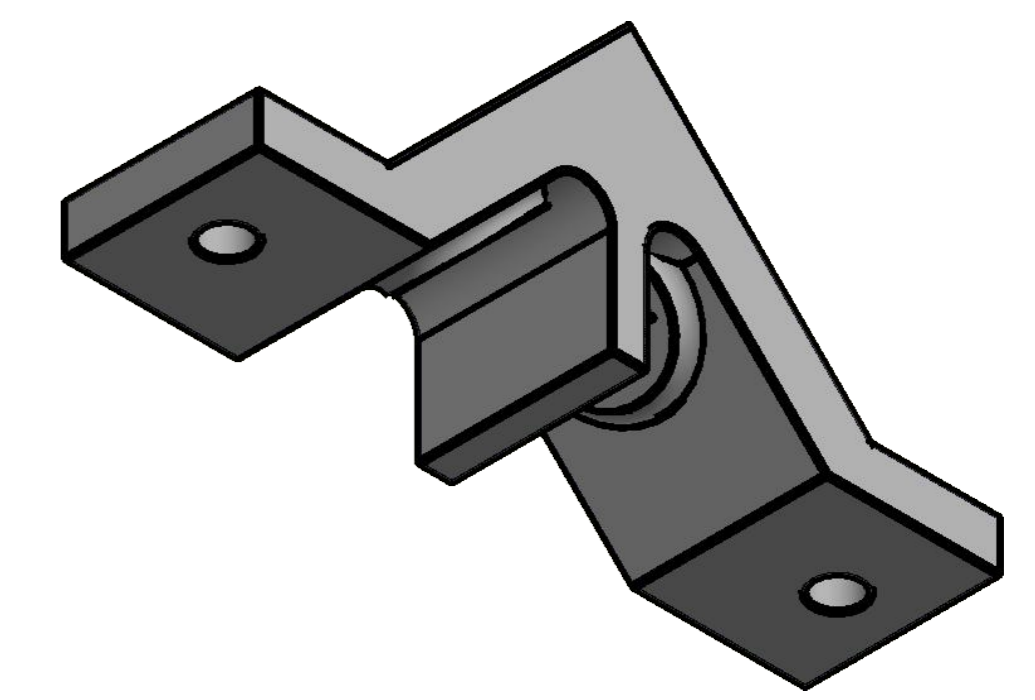
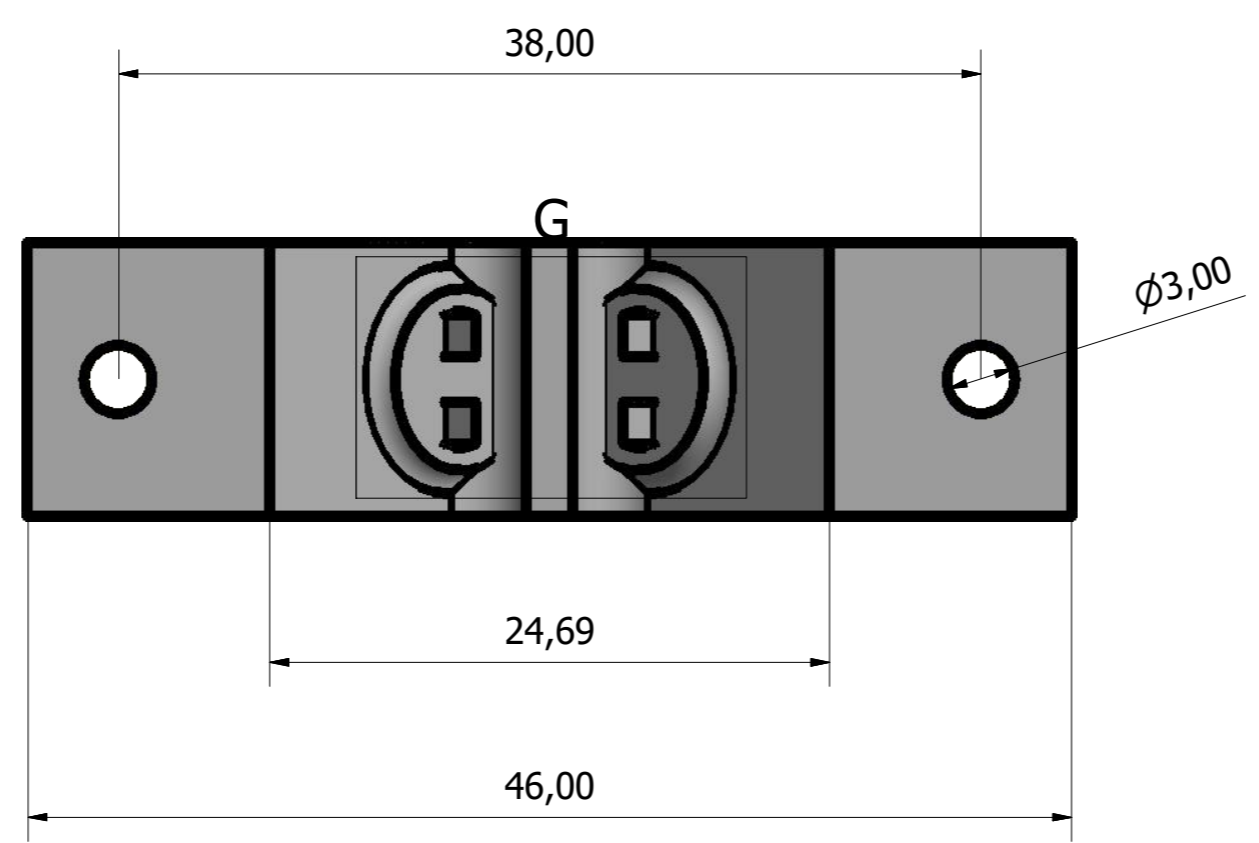
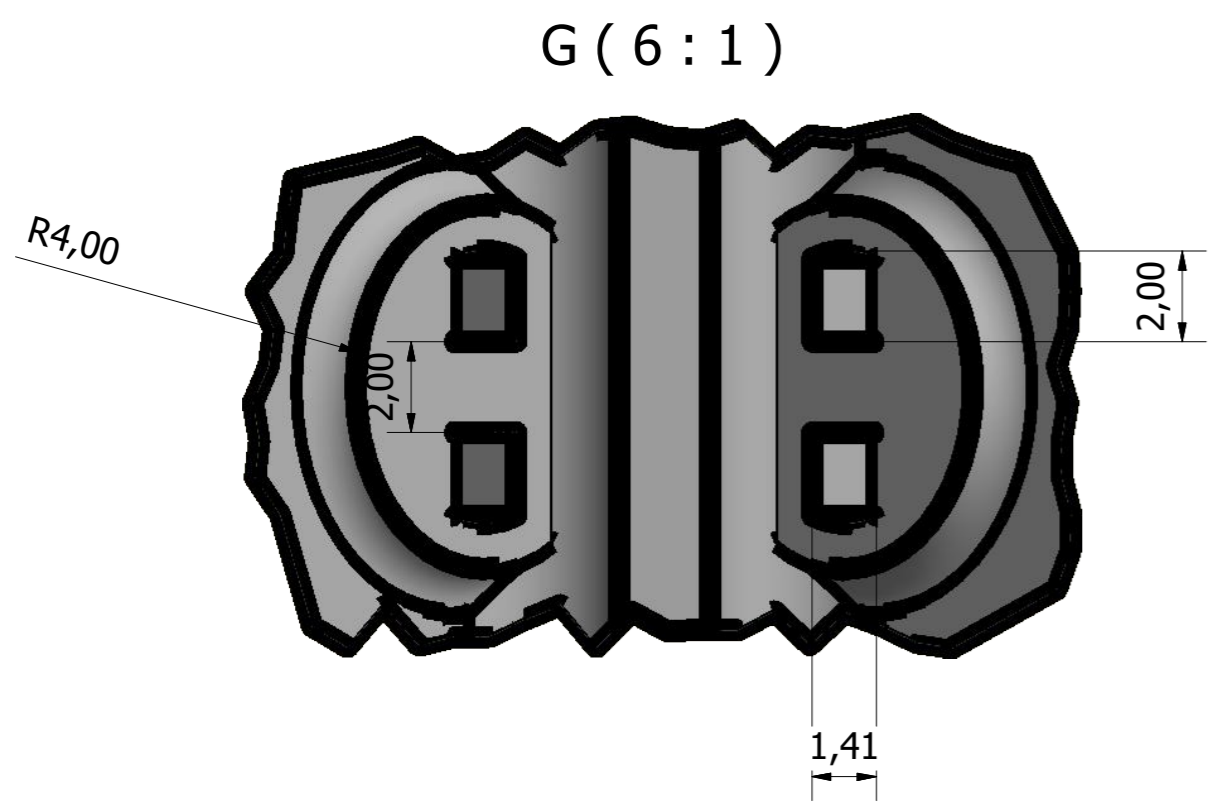


TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.1 - 2	PROTOTIPO DE PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO ORIENTABLE EN UN EJE
	PIEZA: Torre de sujeción con soporte de servomotor
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 23/12/2021

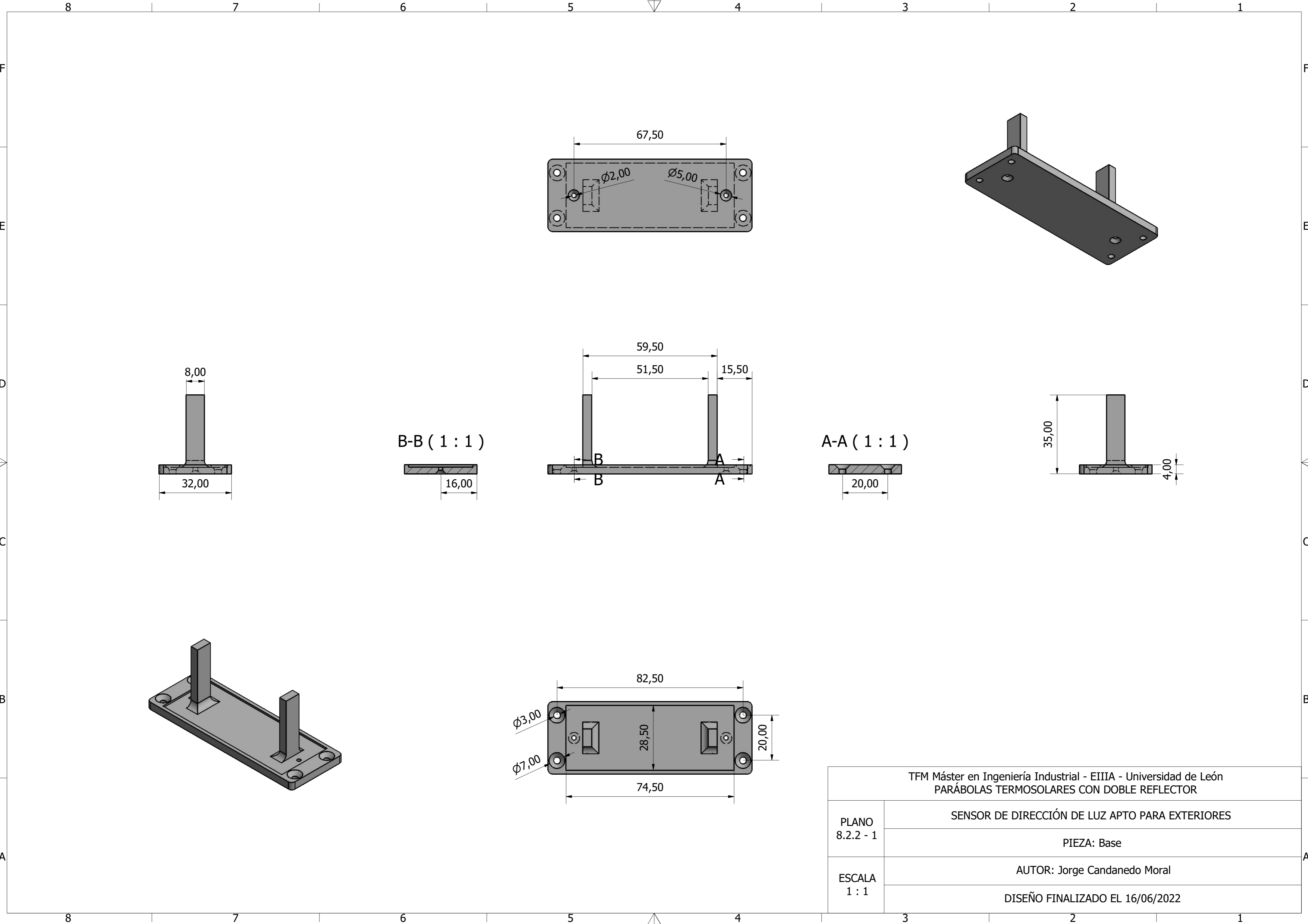


TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.1 - 3	PROTOTIPO DE PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO ORIENTABLE EN UN EJE
	PIEZA: Columna de sujeción, ejes, cubre eje y arandela
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 23/12/2021

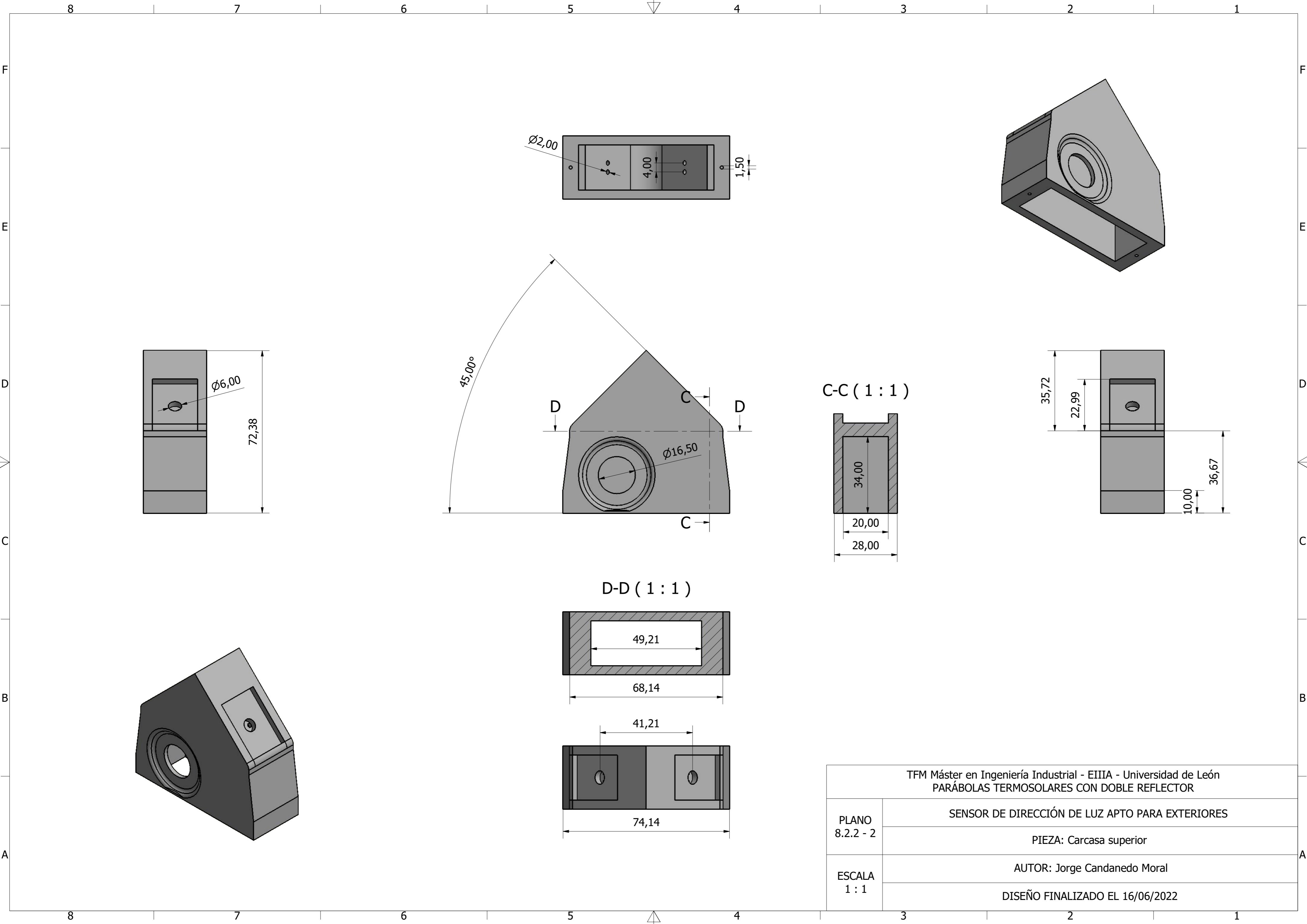




TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.1 - 4	PROTOTIPO DE PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO ORIENTABLE EN UN EJE
	PIEZA: Sensor de dirección de luz
ESCALA 3 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 23/12/2021



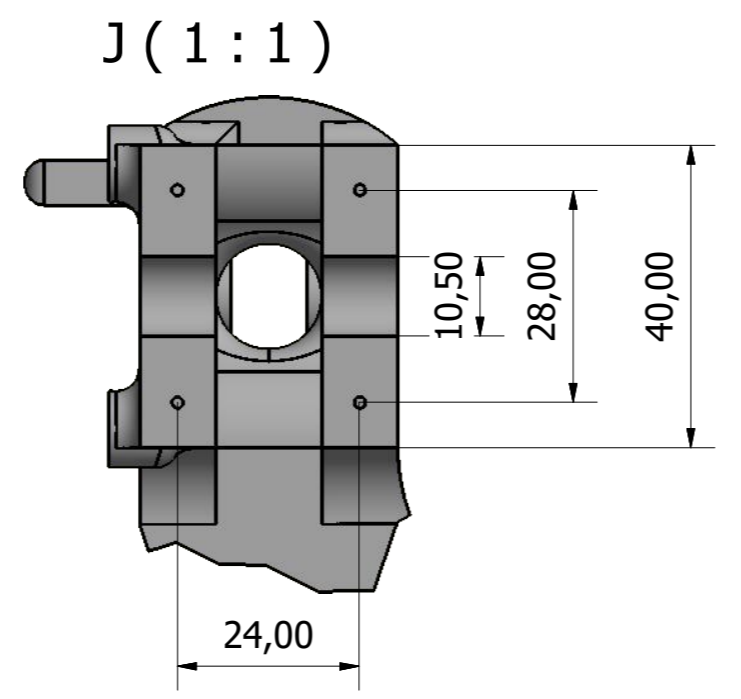
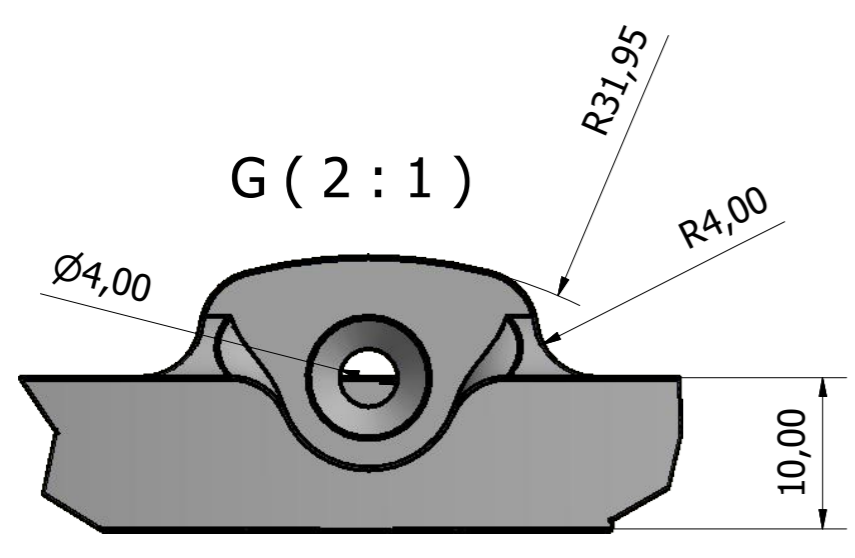
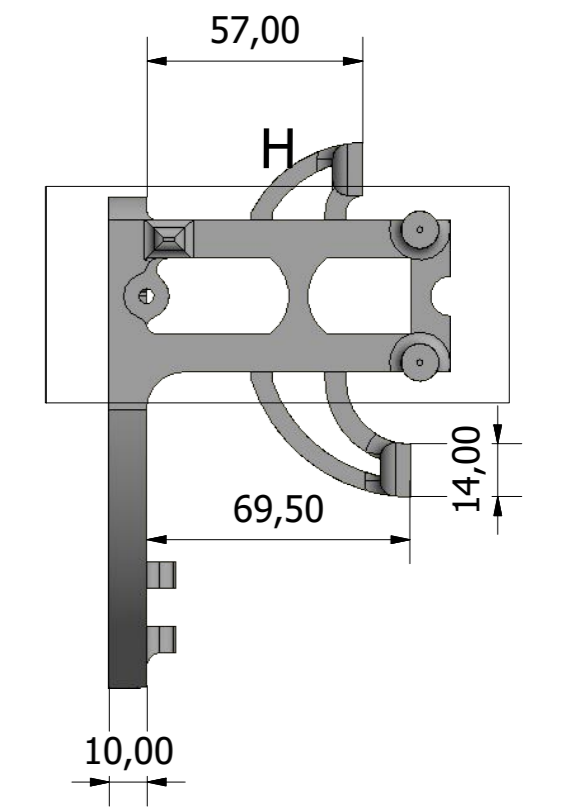
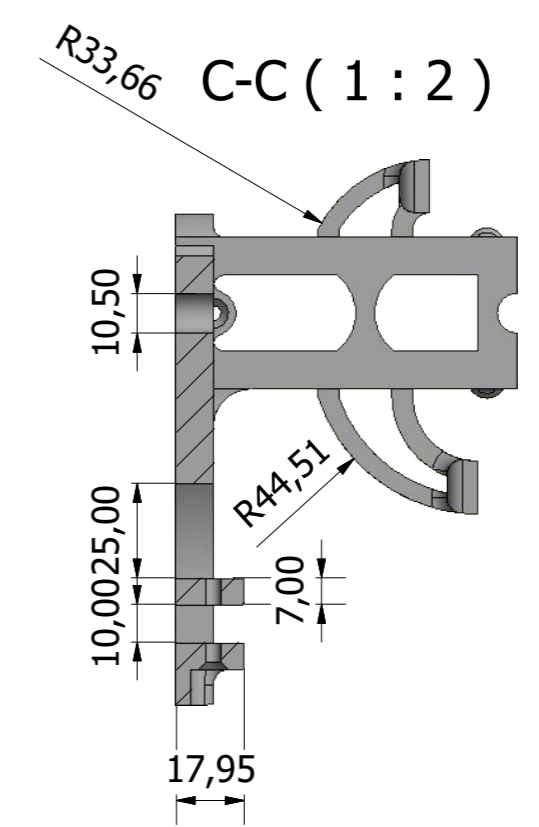
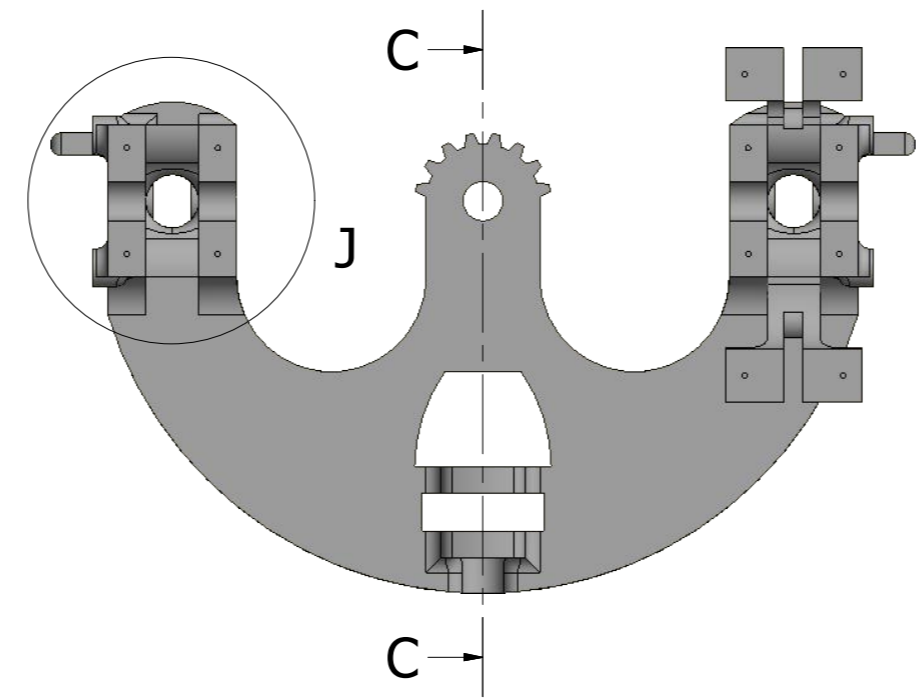
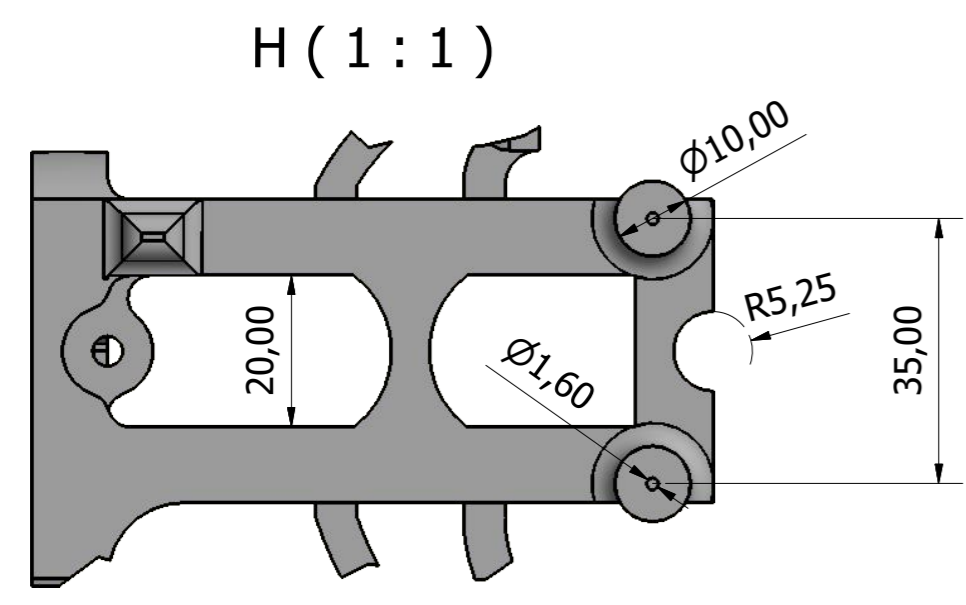
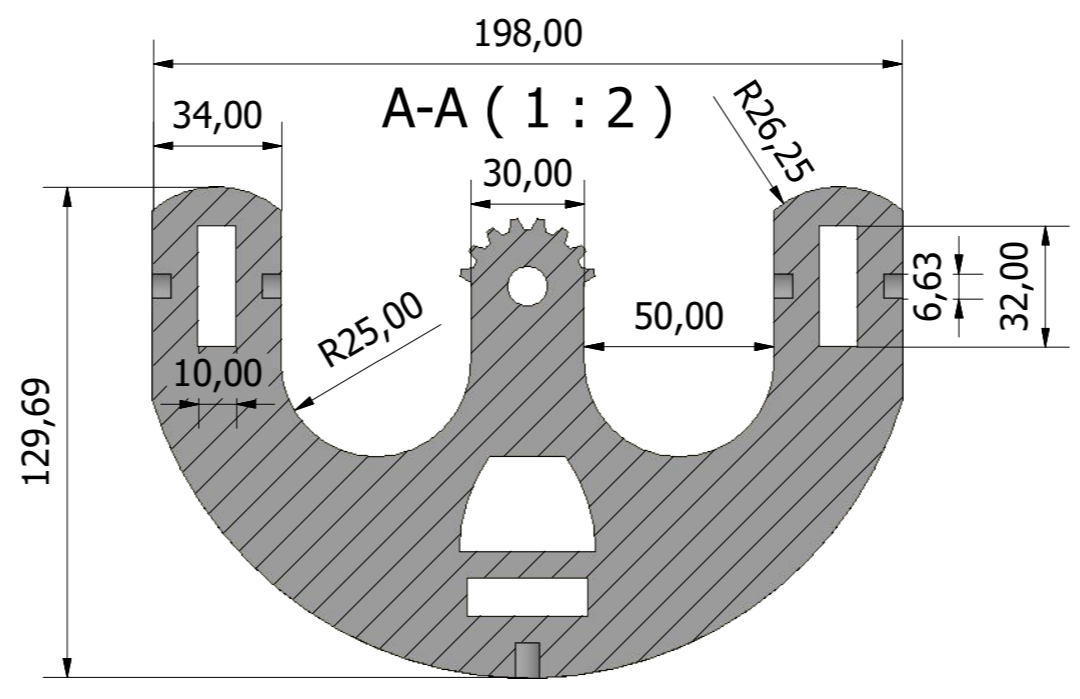
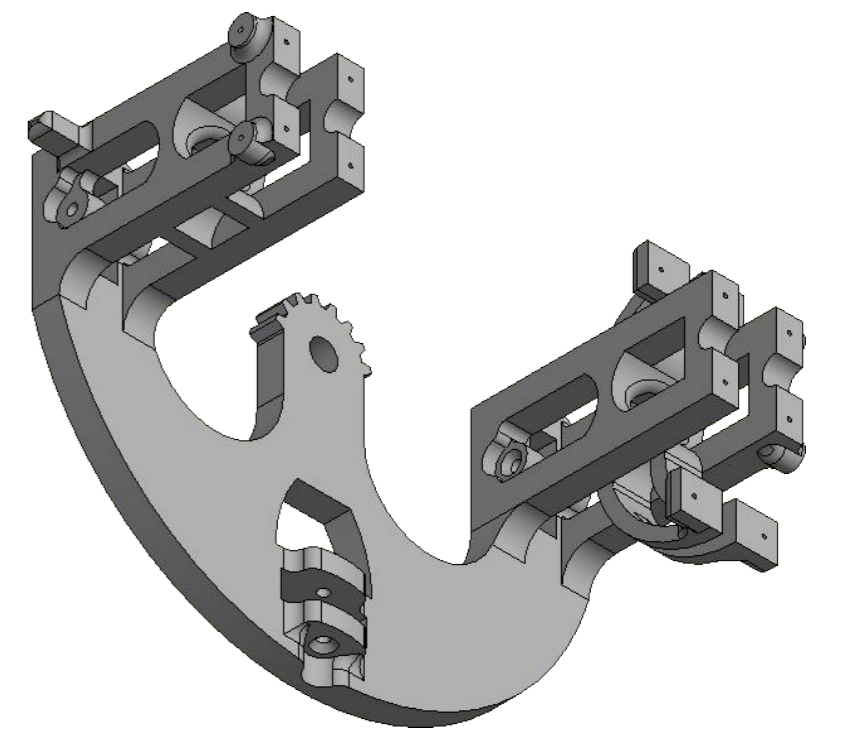
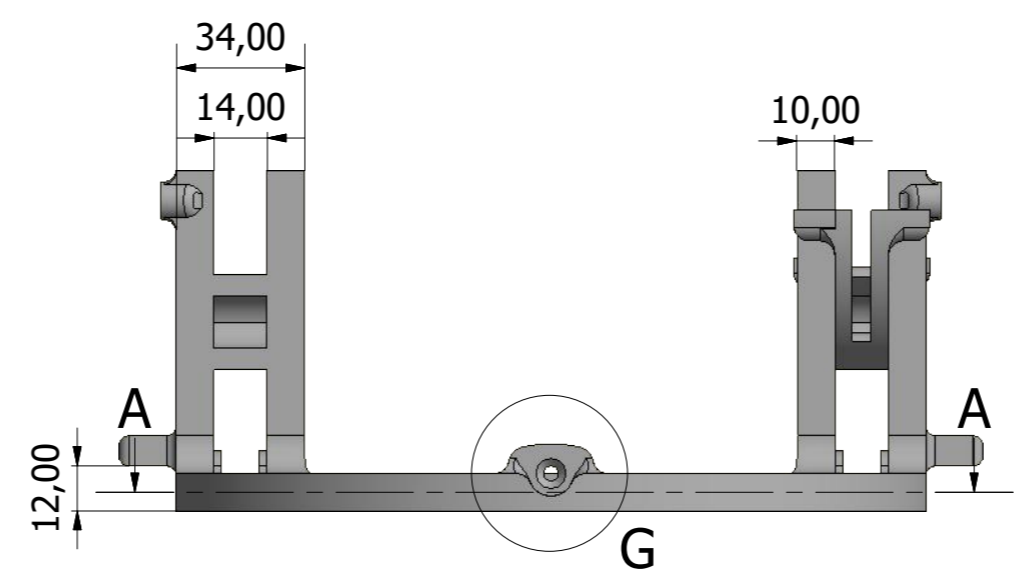
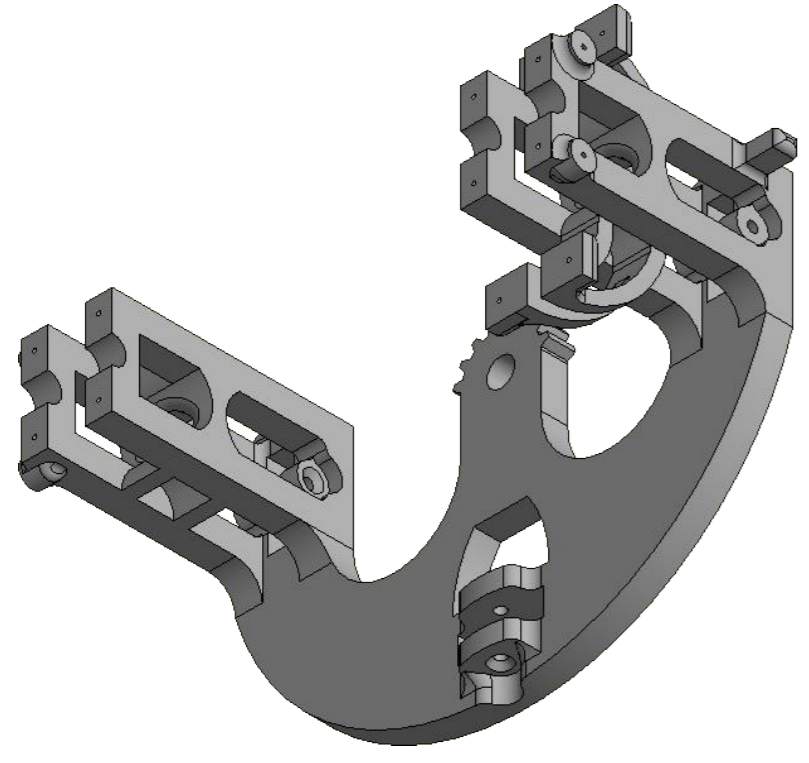
TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León	
PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.2 - 1	SENSOR DE DIRECCIÓN DE LUZ APTO PARA EXTERIORES
	PIEZA: Base
ESCALA 1 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 16/06/2022



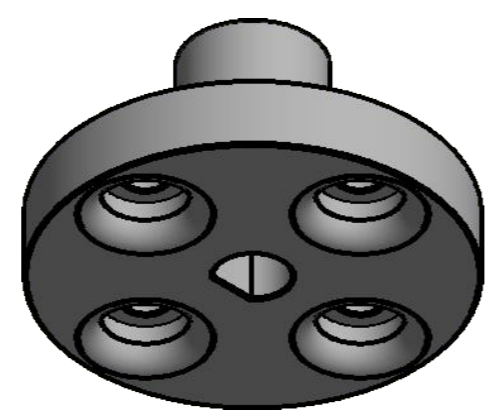
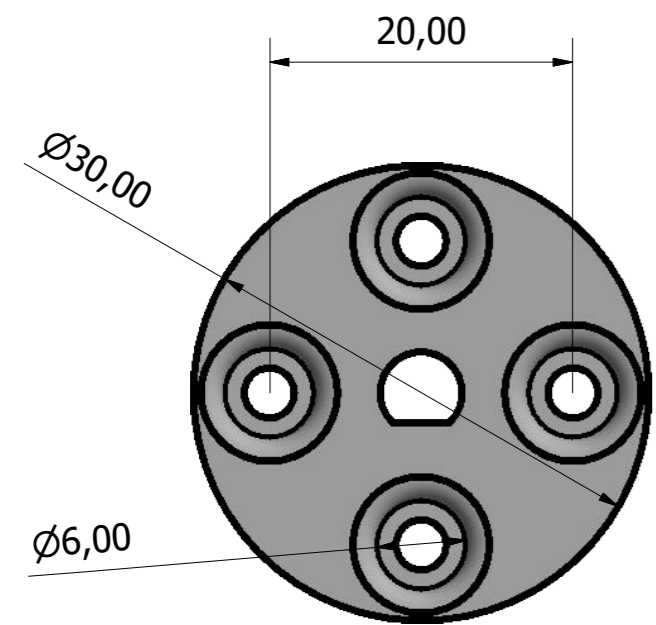
TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León  
 PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR

PLANO 8.2.2 - 2	SENSOR DE DIRECCIÓN DE LUZ APTO PARA EXTERIORES
	PIEZA: Carcasa superior
ESCALA 1 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 16/06/2022

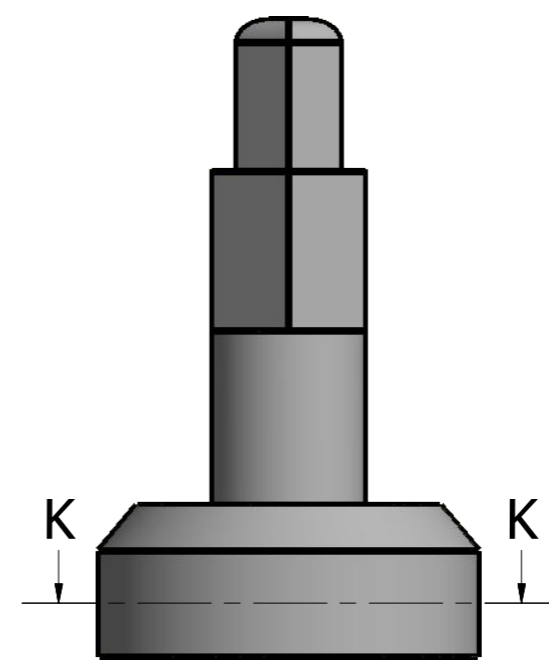
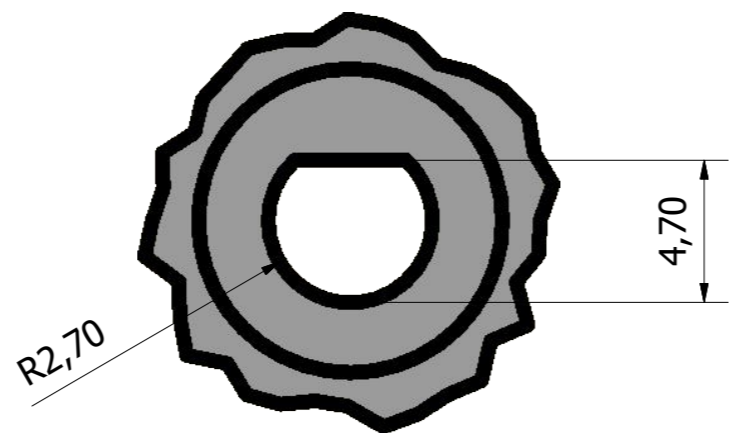
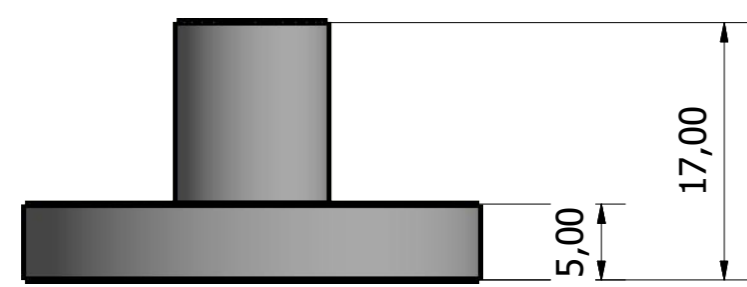




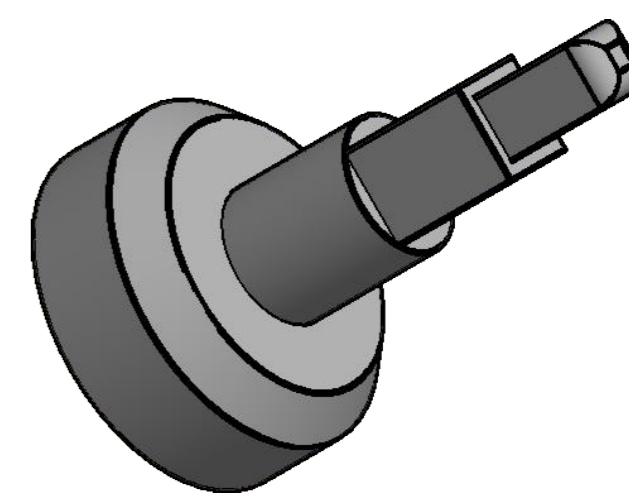
TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 1	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Base giratoria
ESCALA 1 : 2	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022



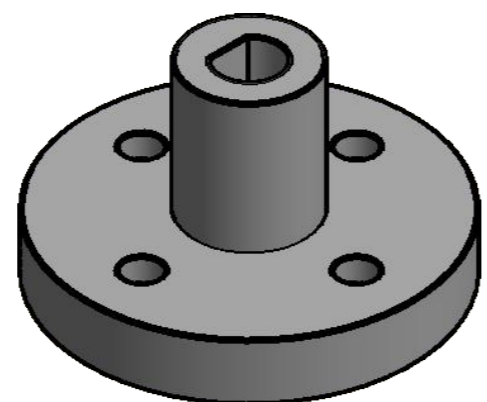
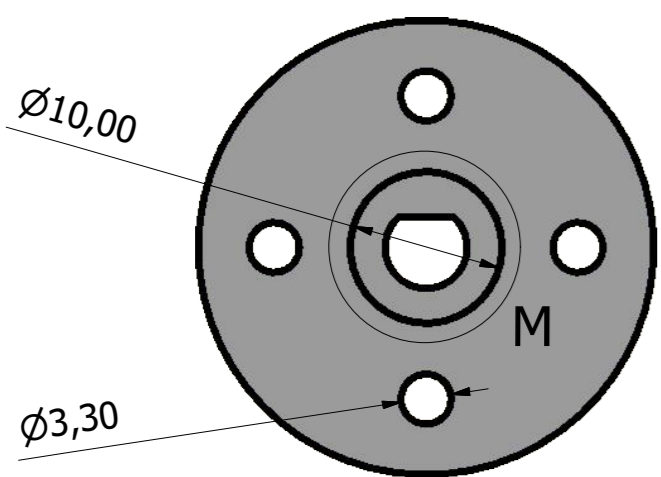
M (4 : 1)



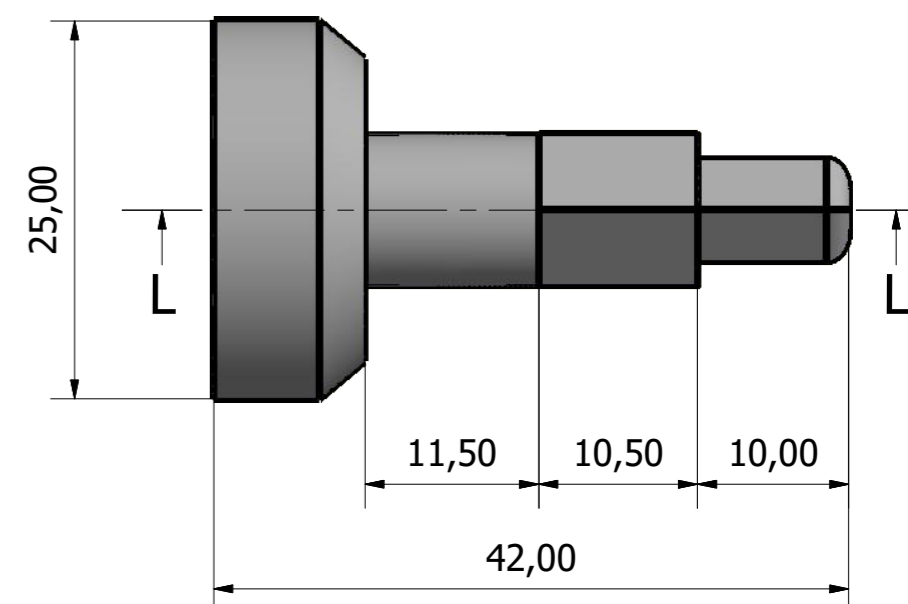
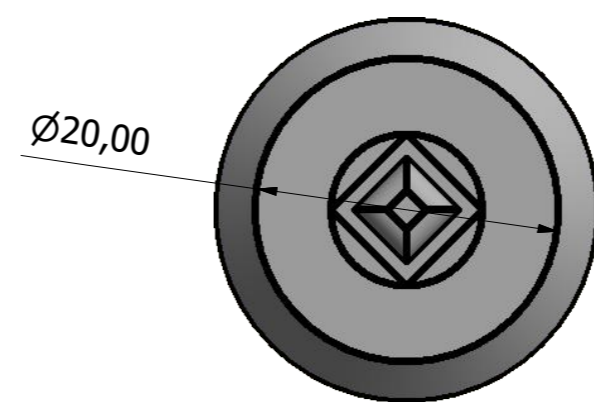
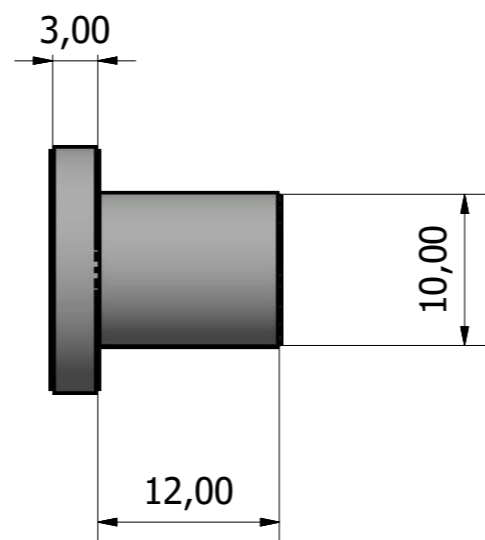
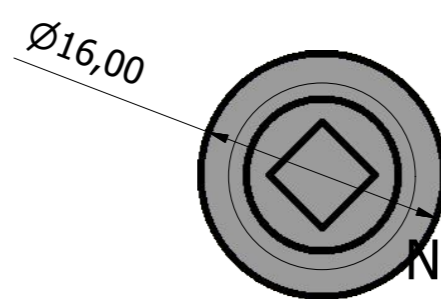
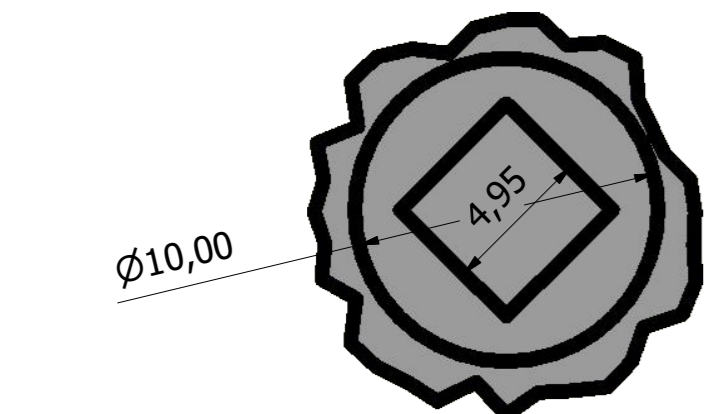
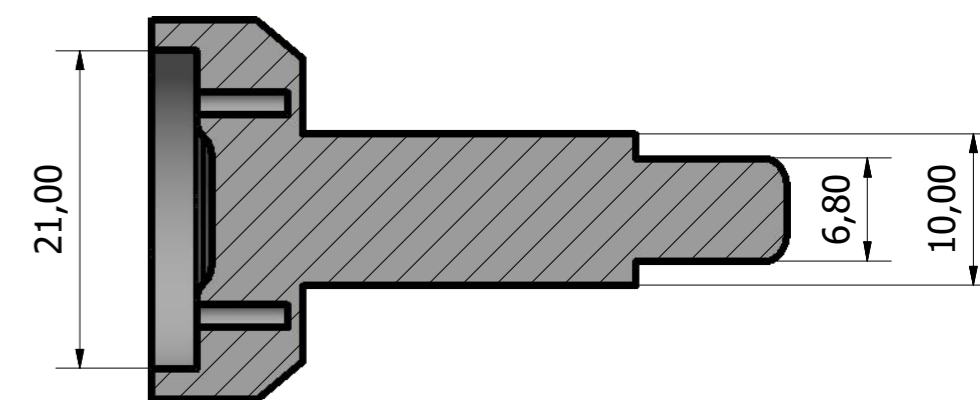
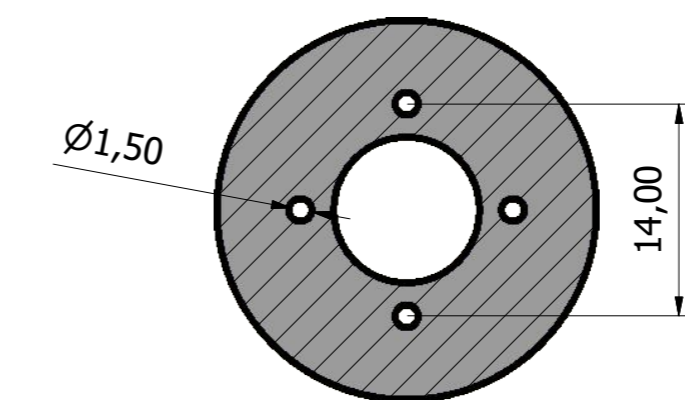
K-K (2 : 1)



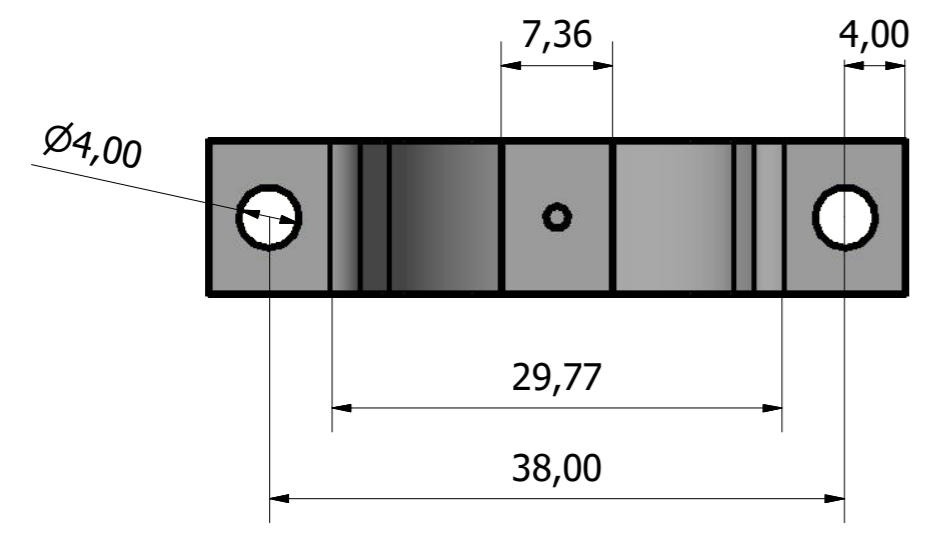
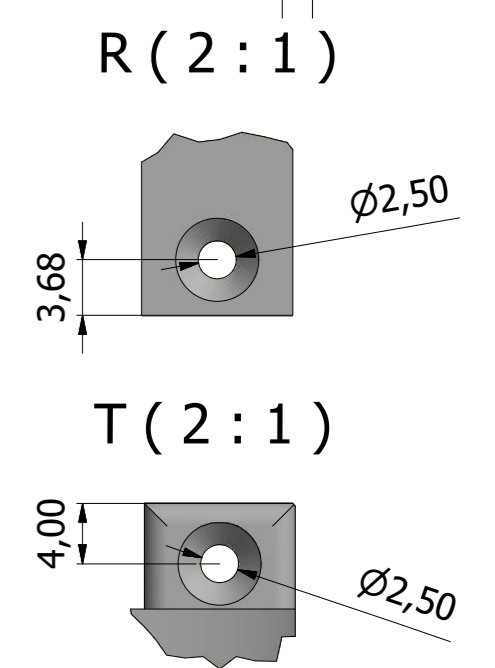
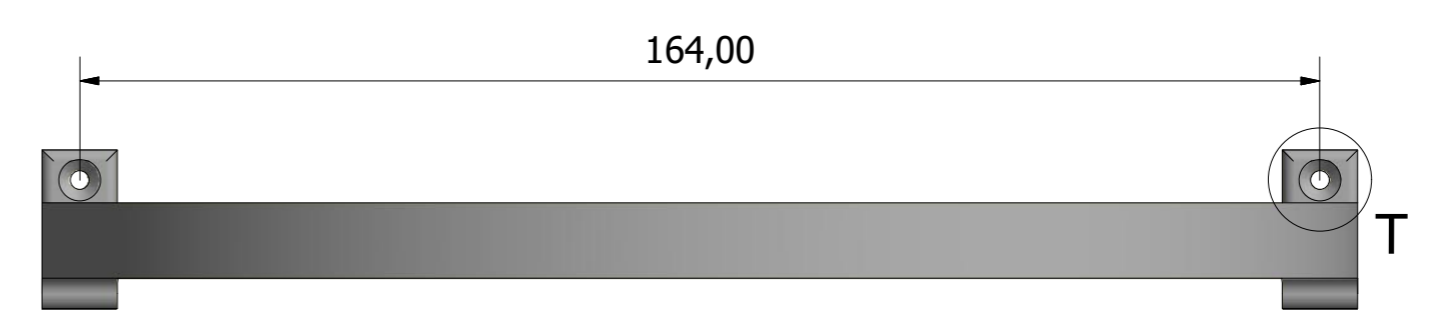
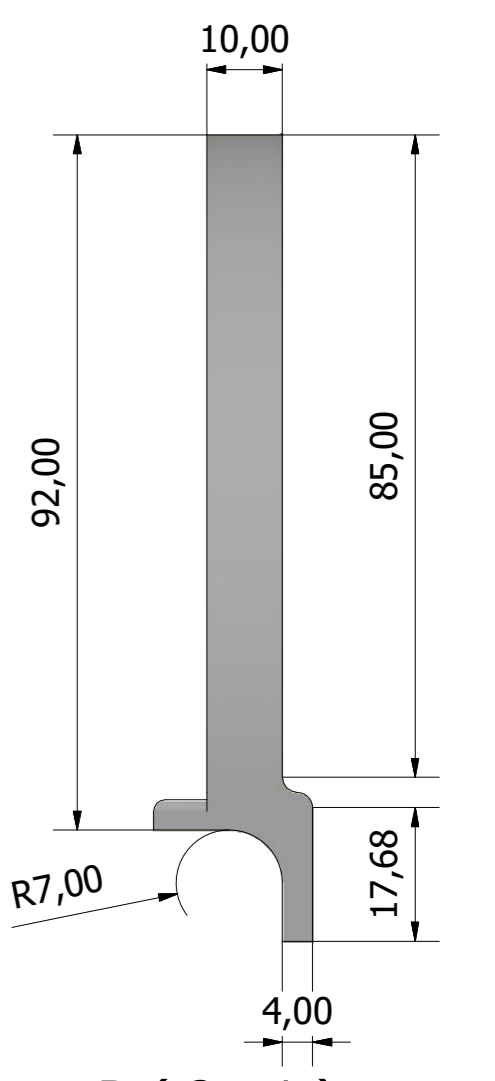
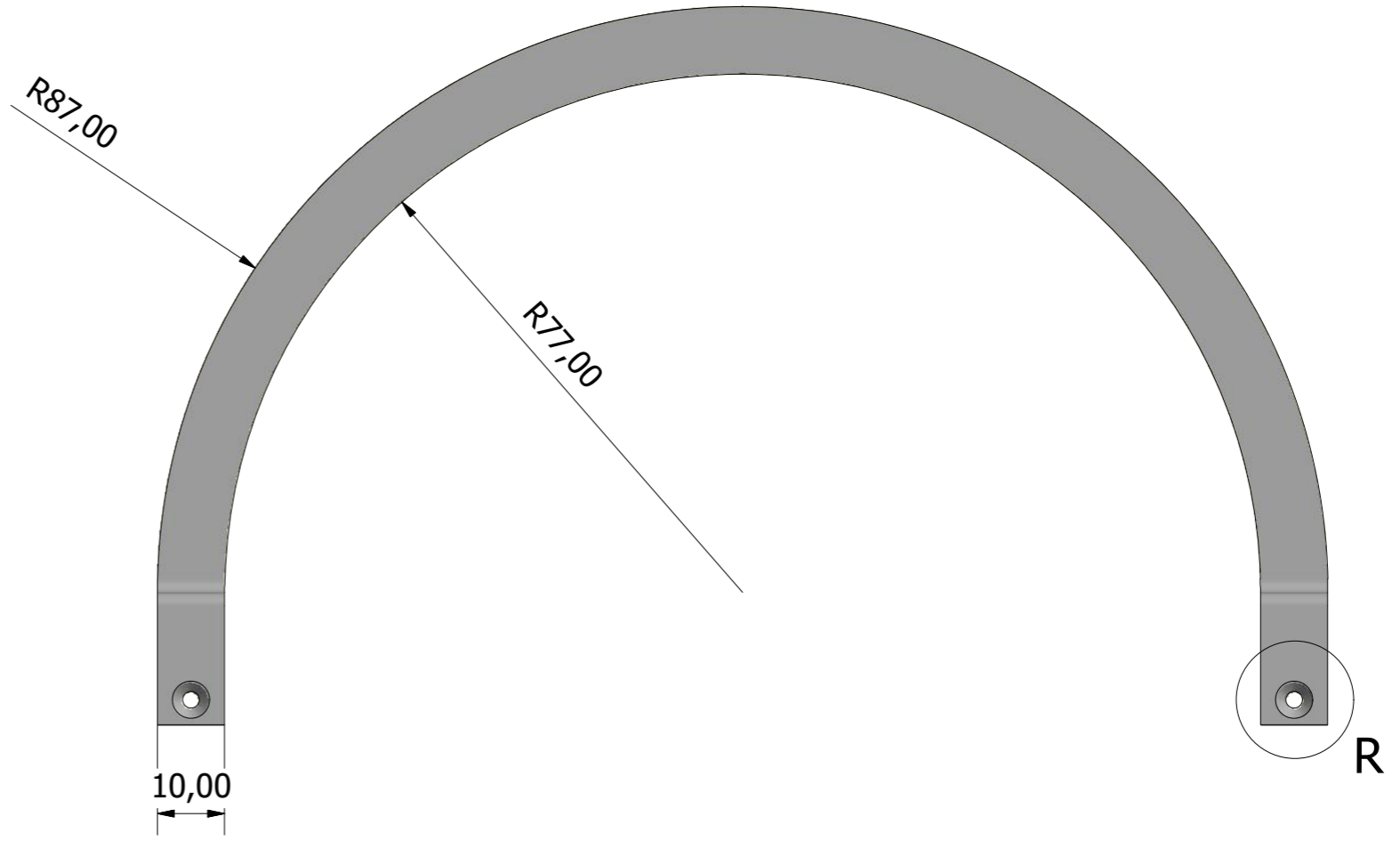
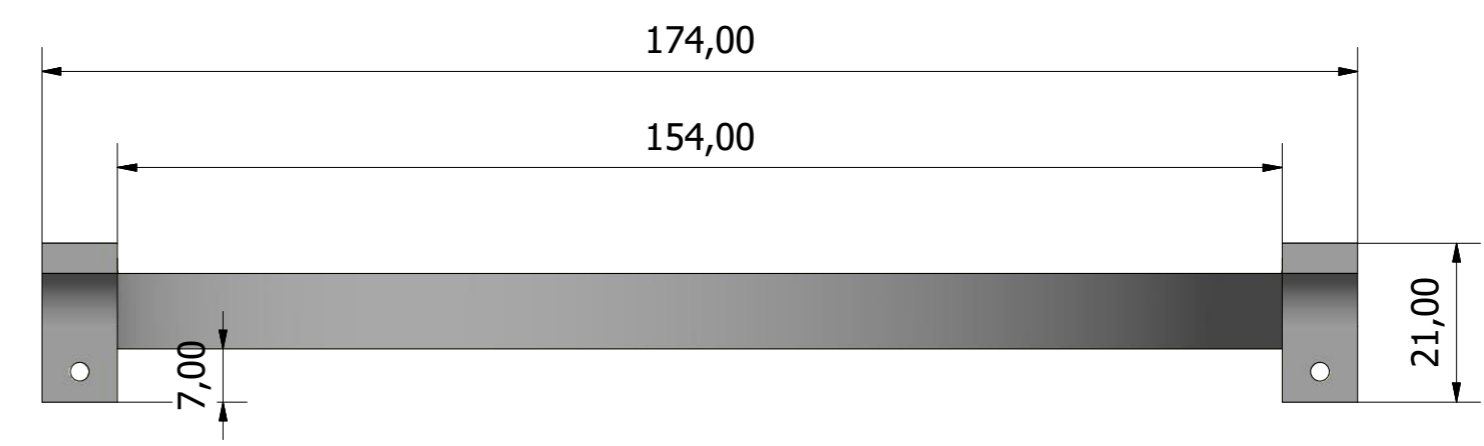
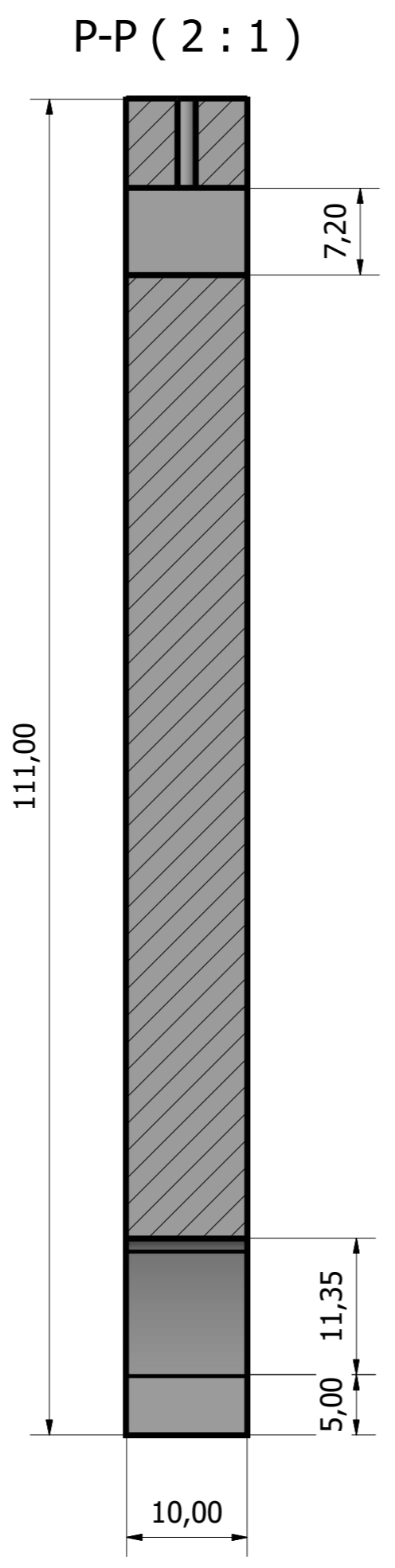
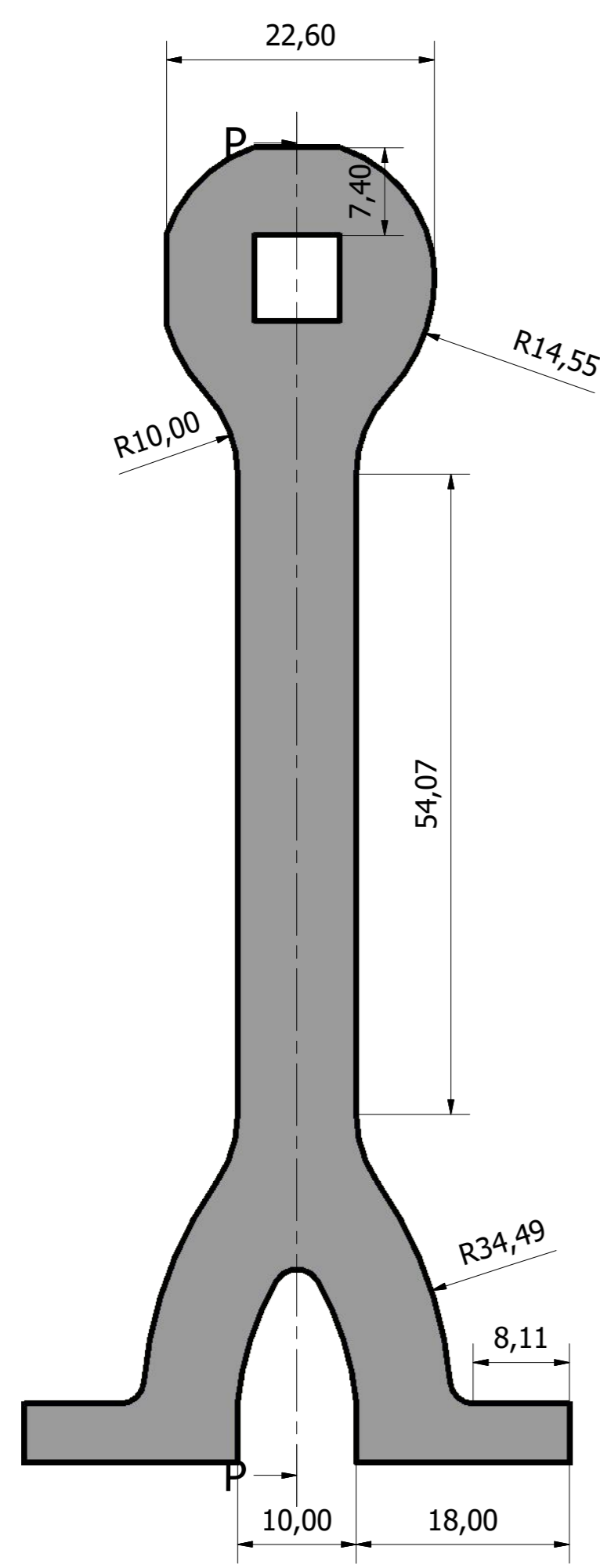
L-L (2 : 1)



N (4 : 1)

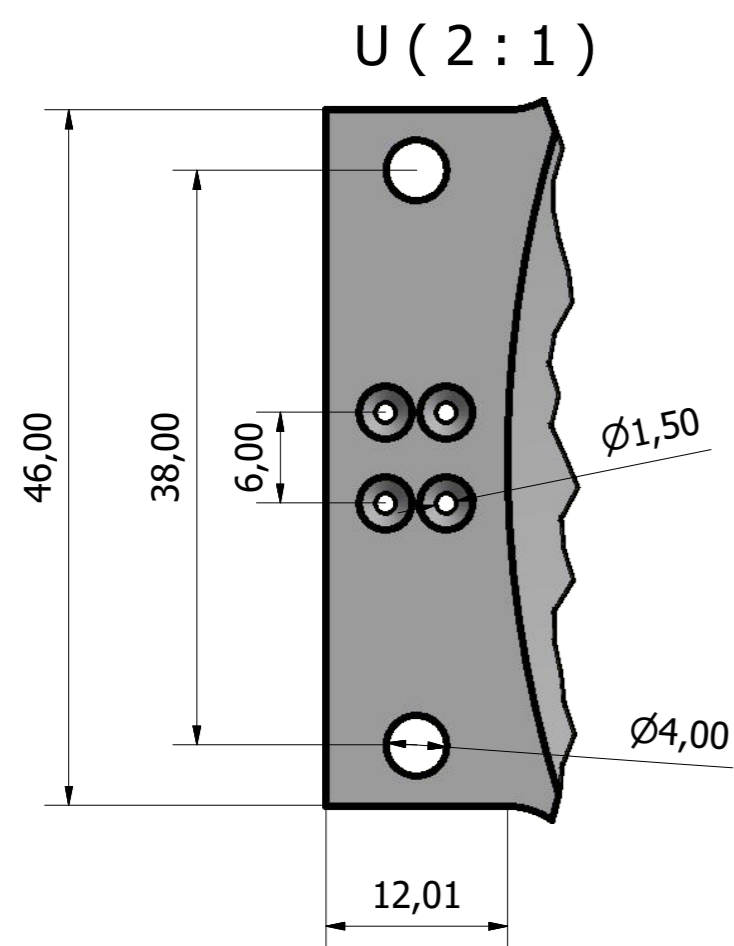
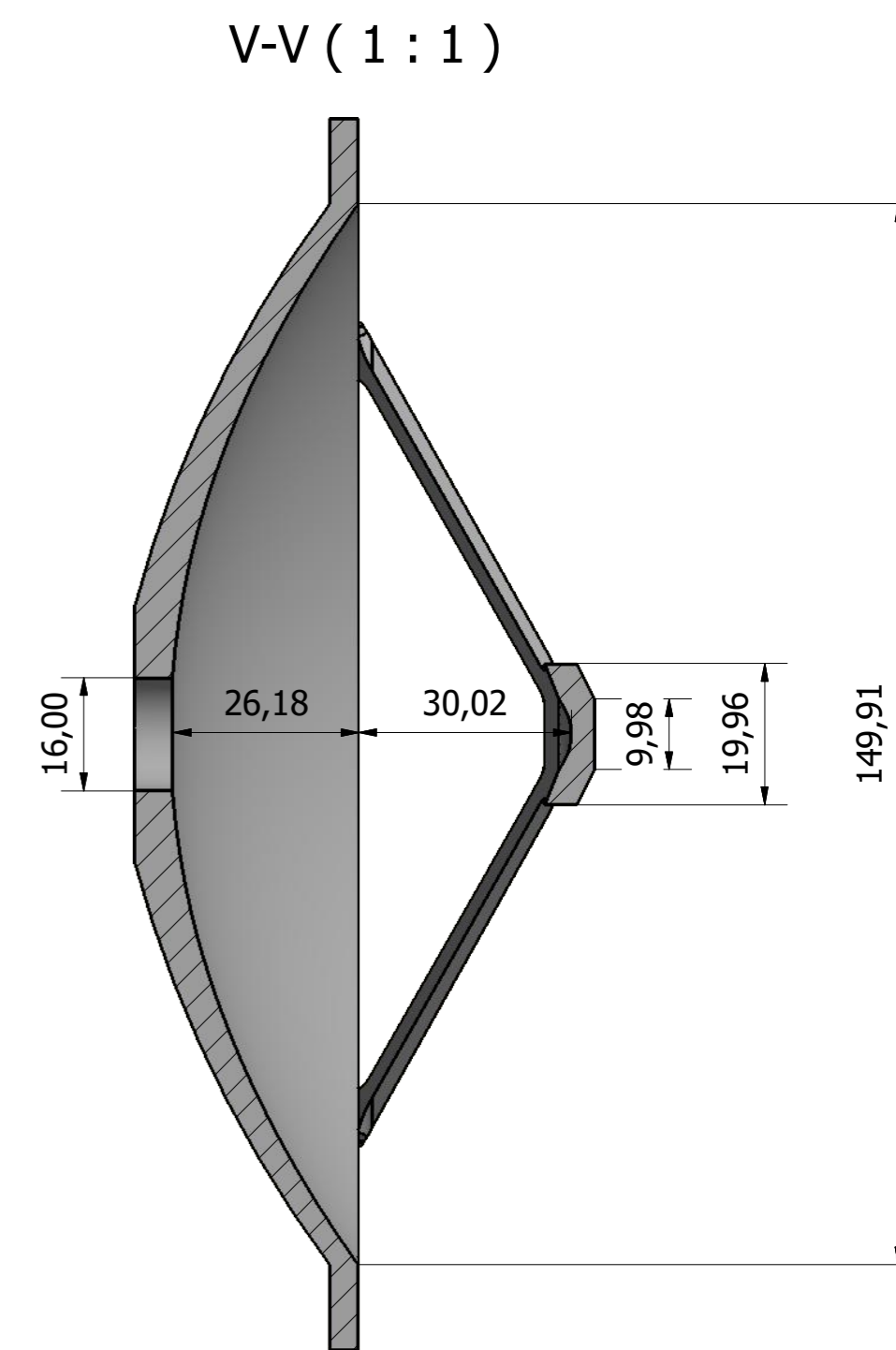
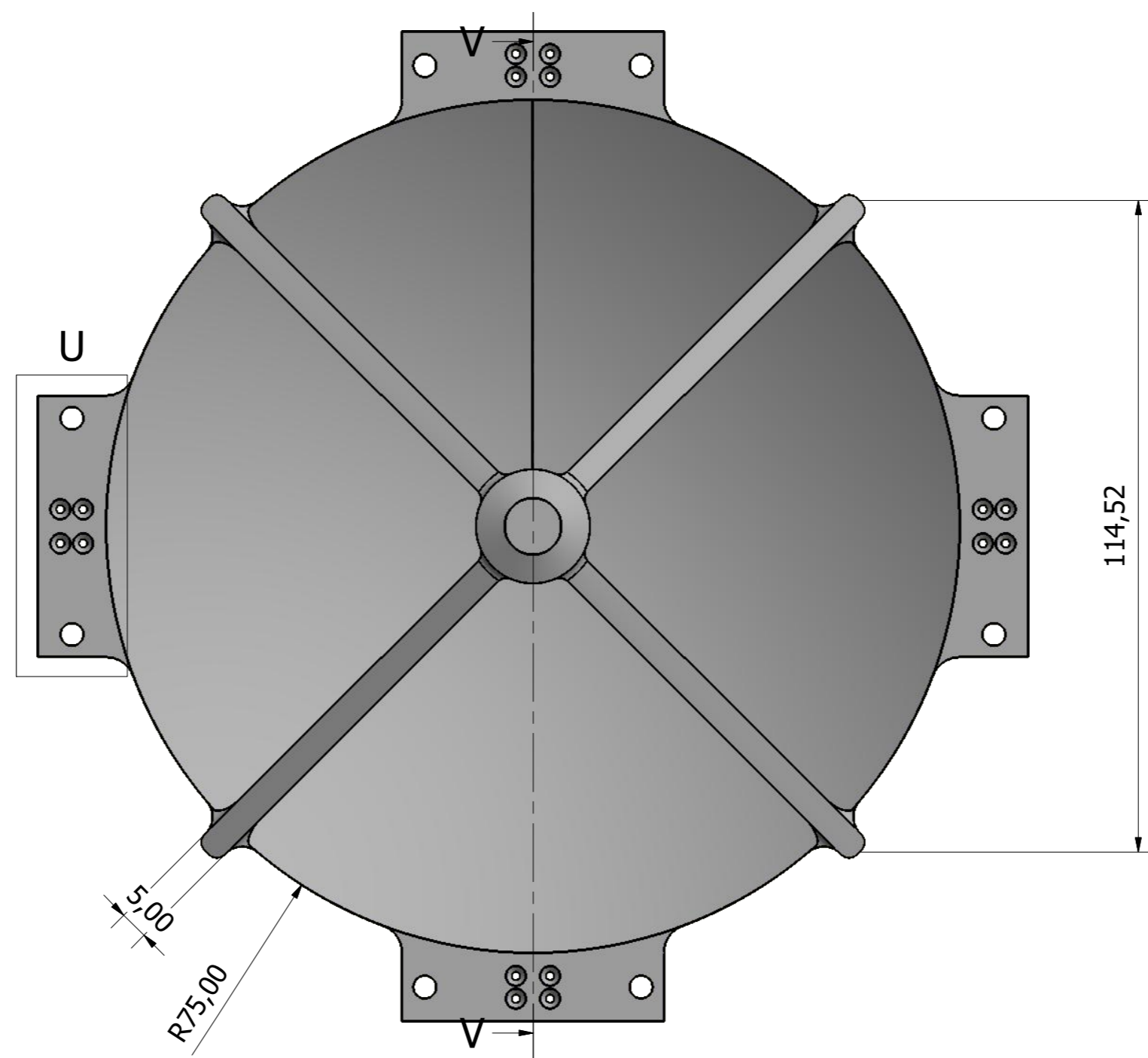
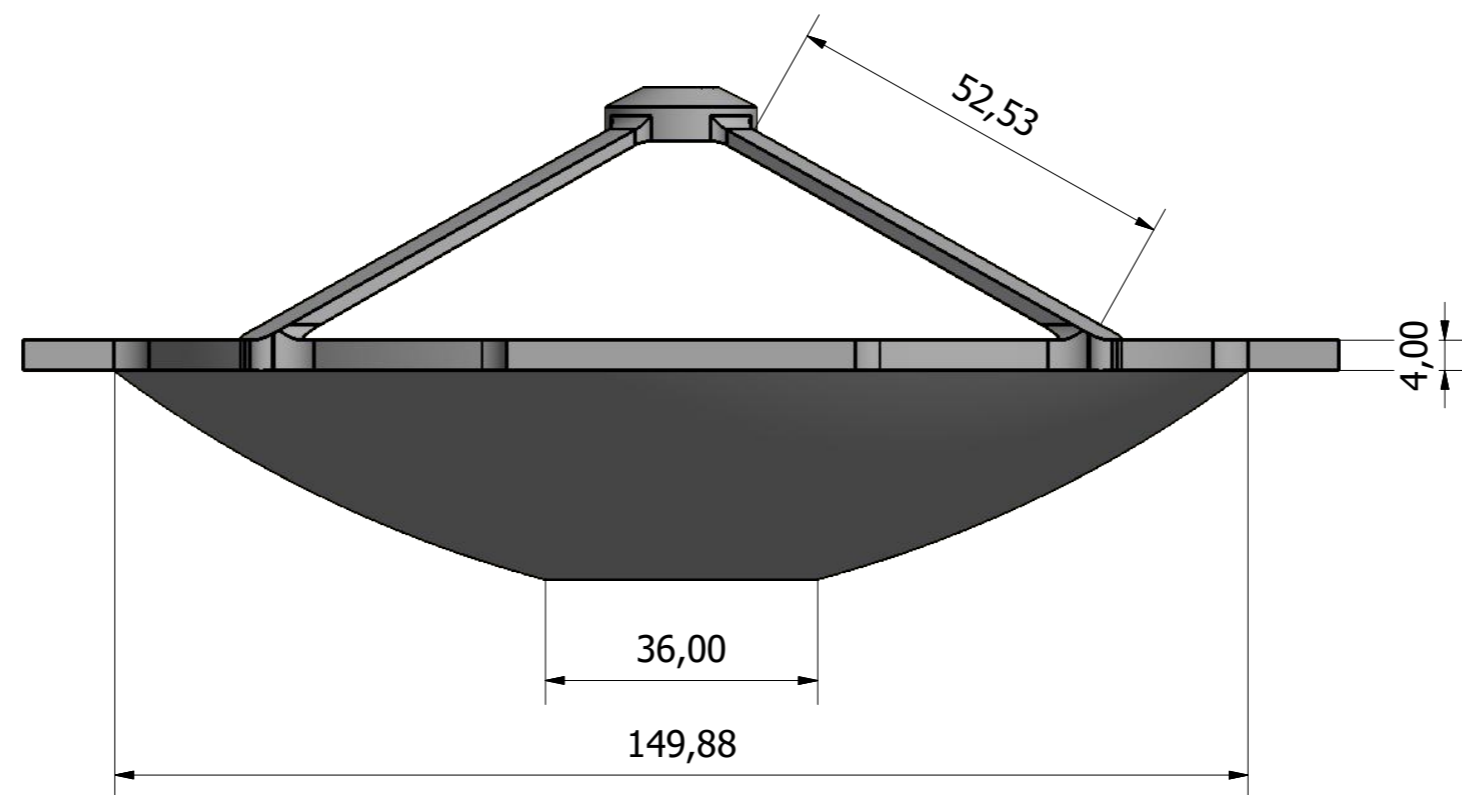
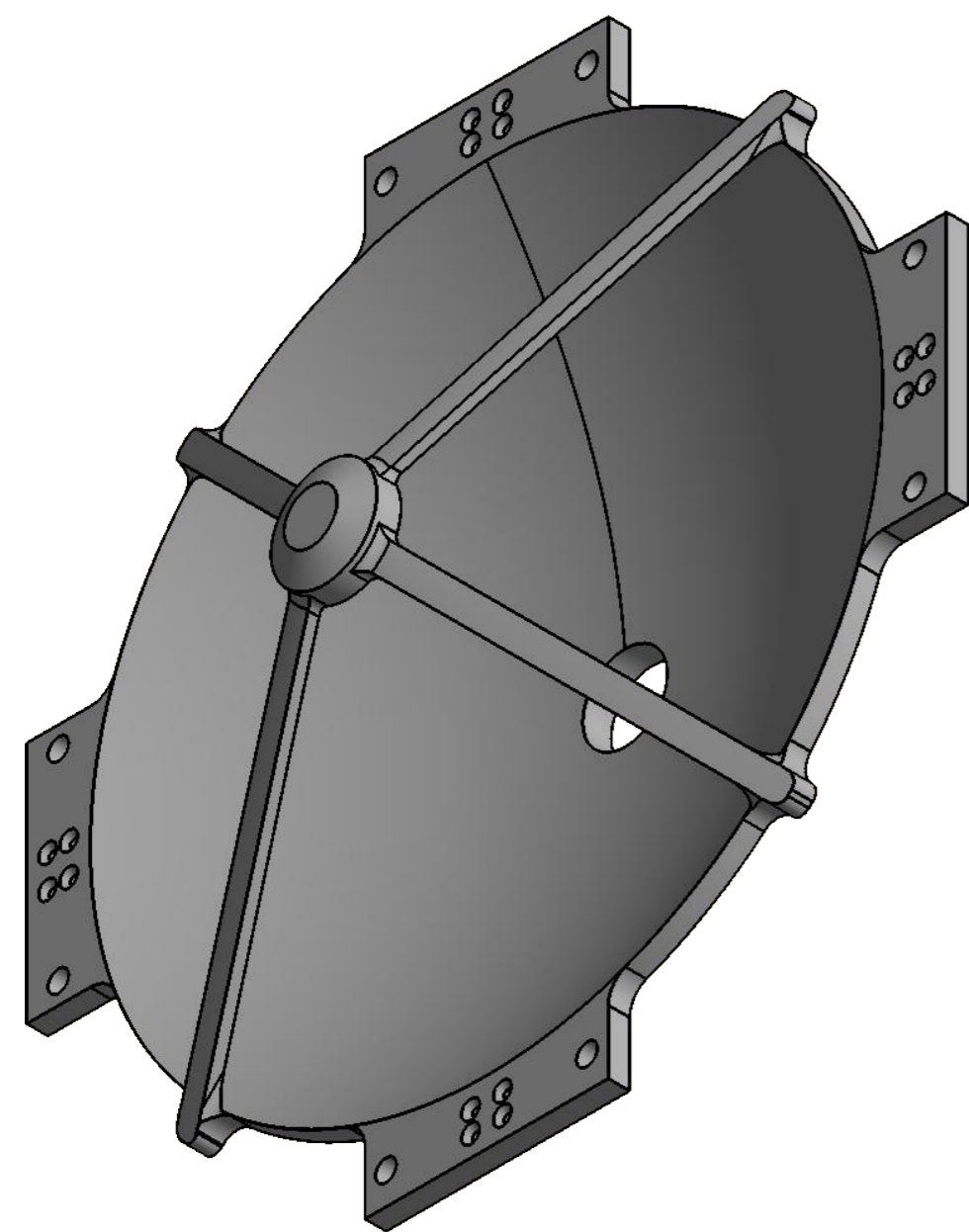


TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León	
PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 2	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Ejes y acoplamientos
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022

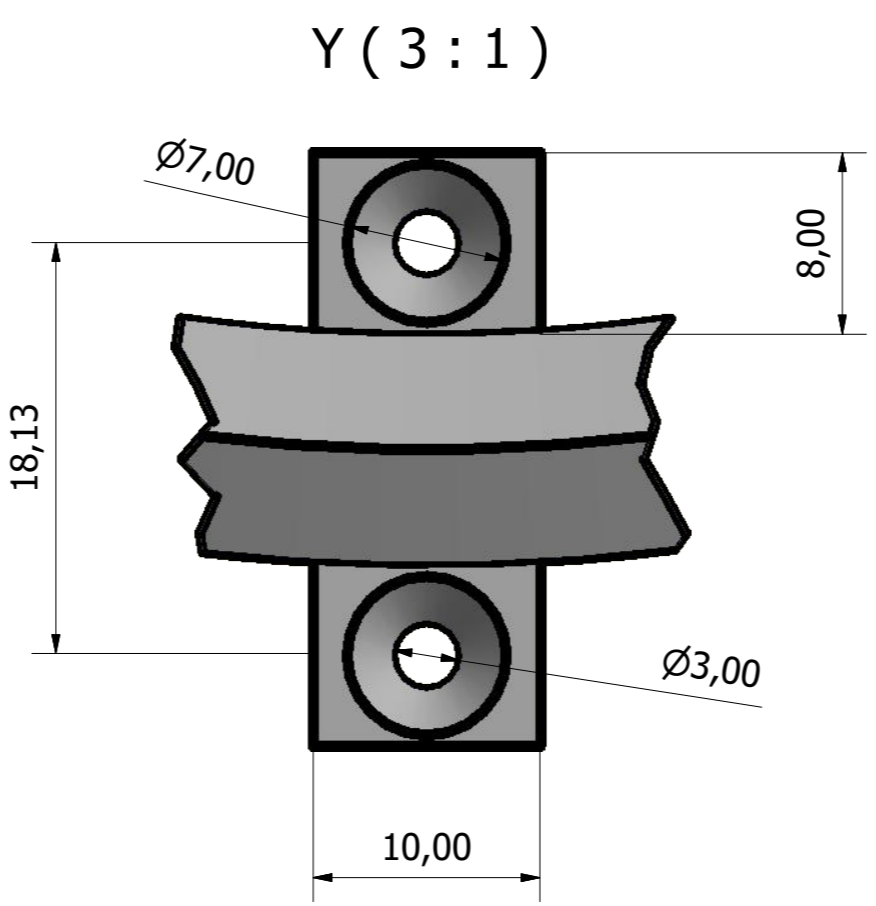
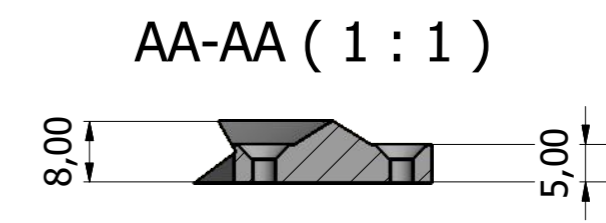
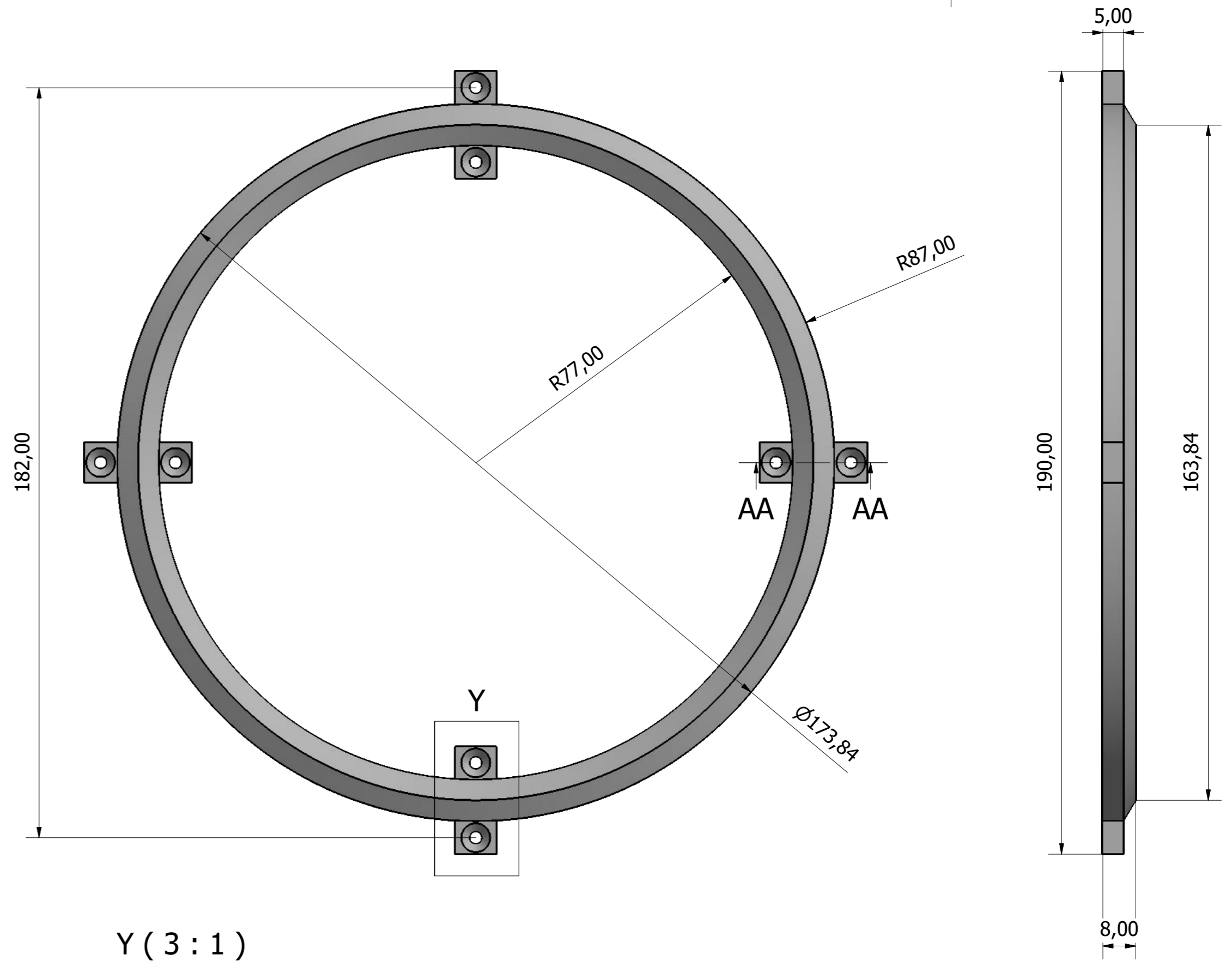
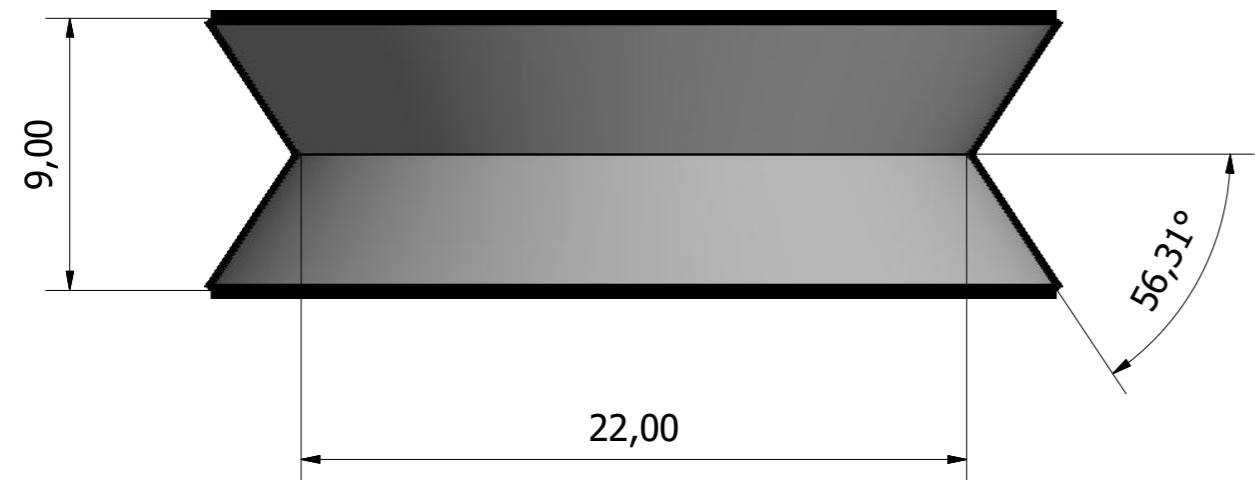
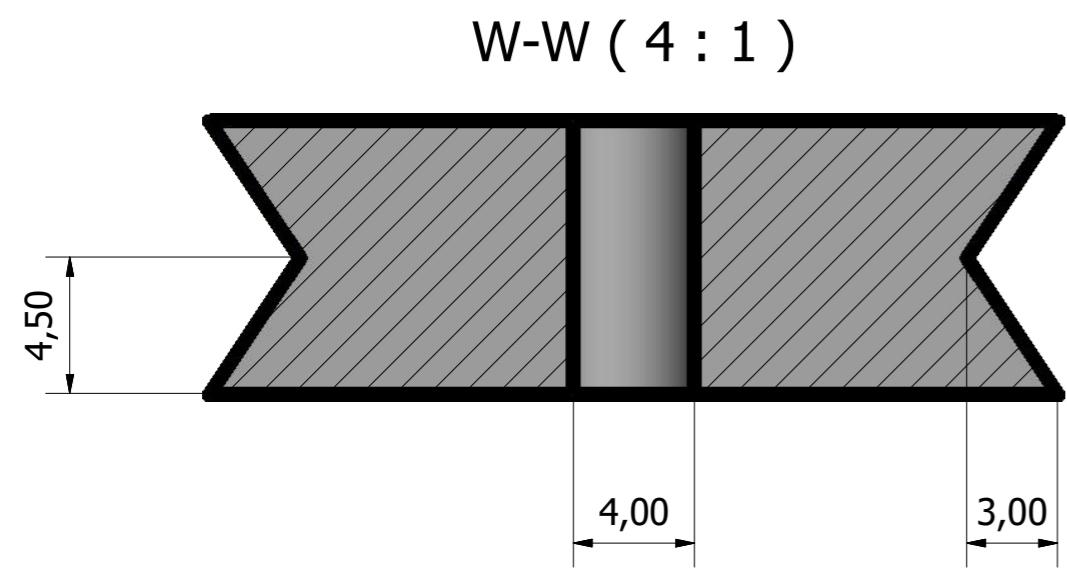
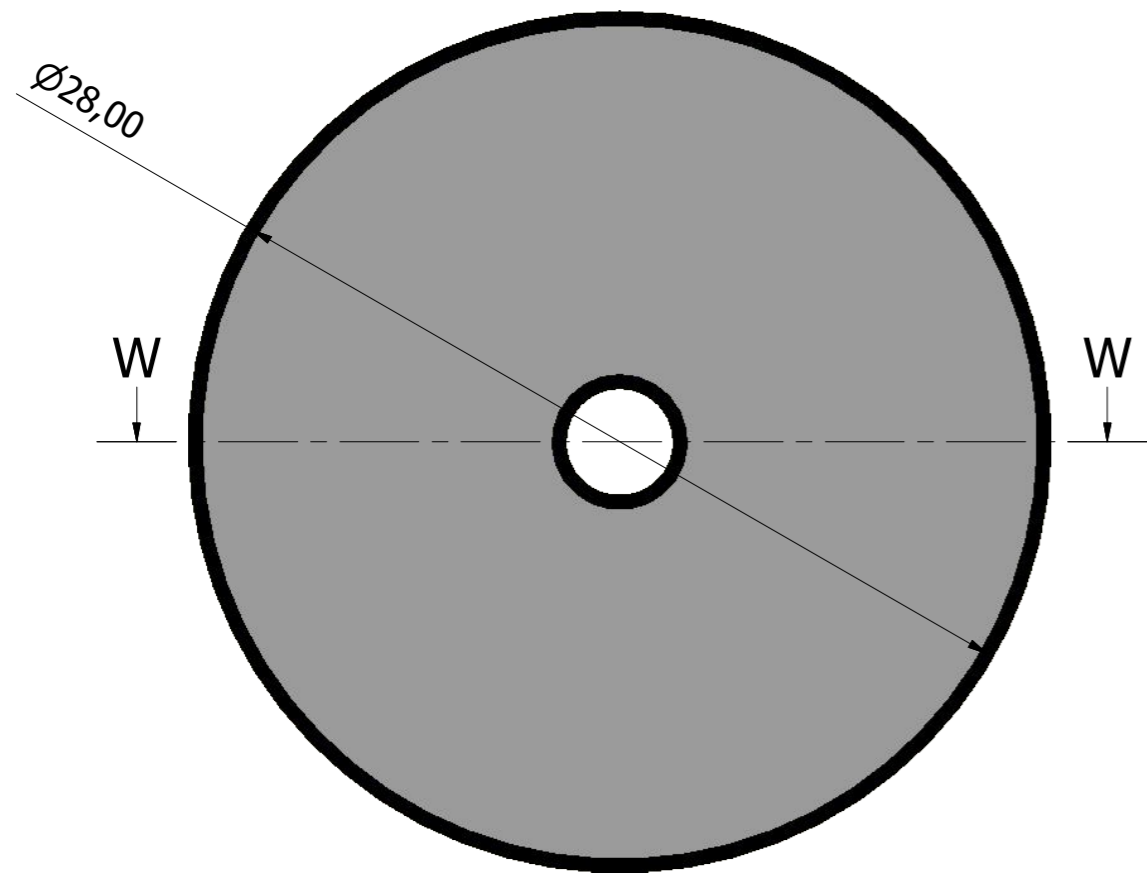


TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León	
PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 3	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Sujeción de parábolas - Arco y brazo
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022

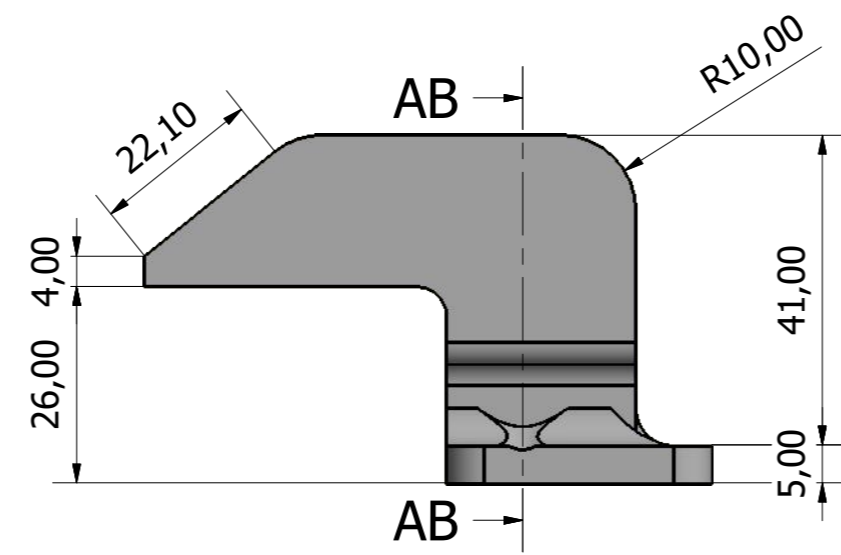
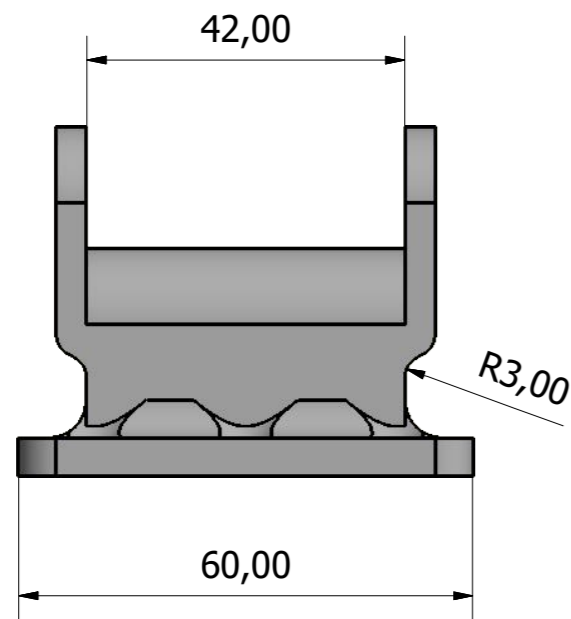
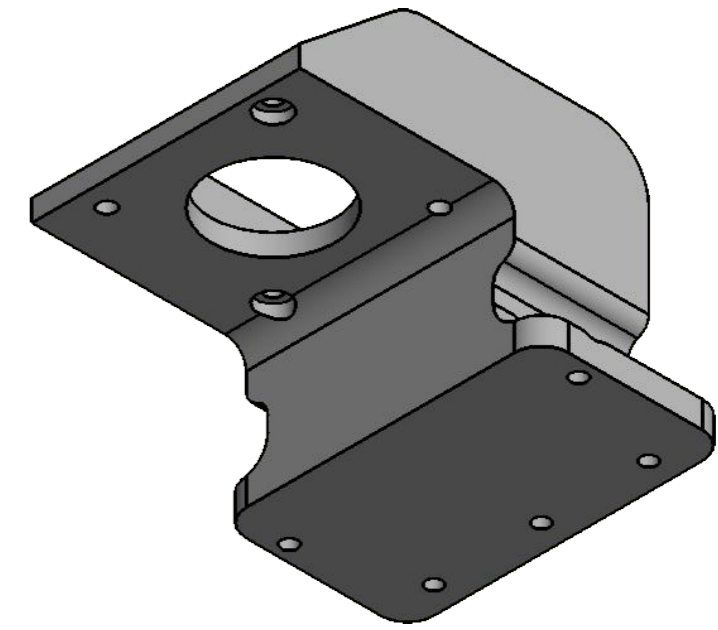
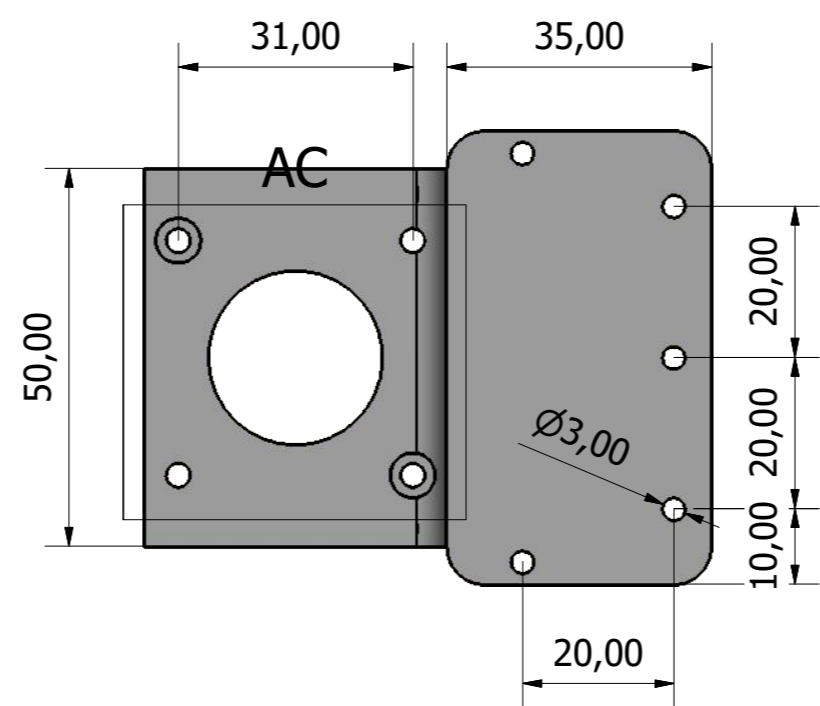
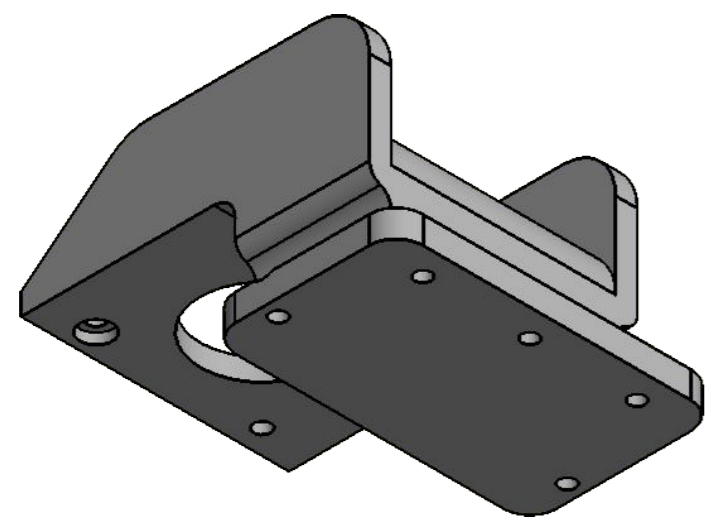




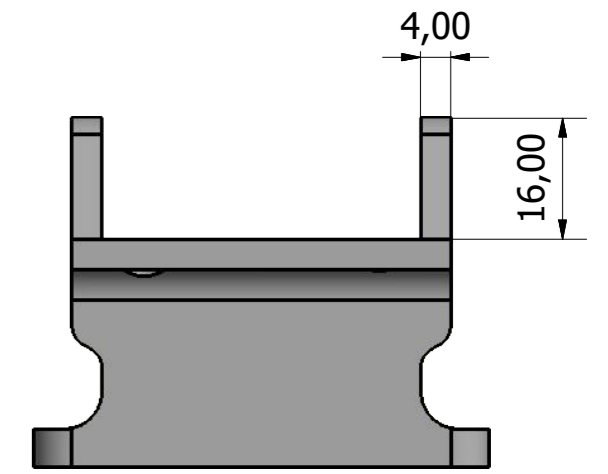
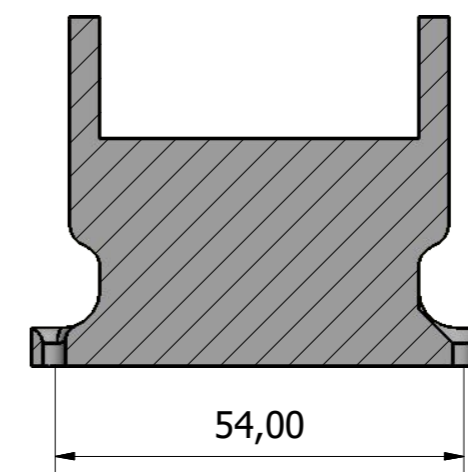
TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León	
PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 4	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Espejos parabólicos
ESCALA 1 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022



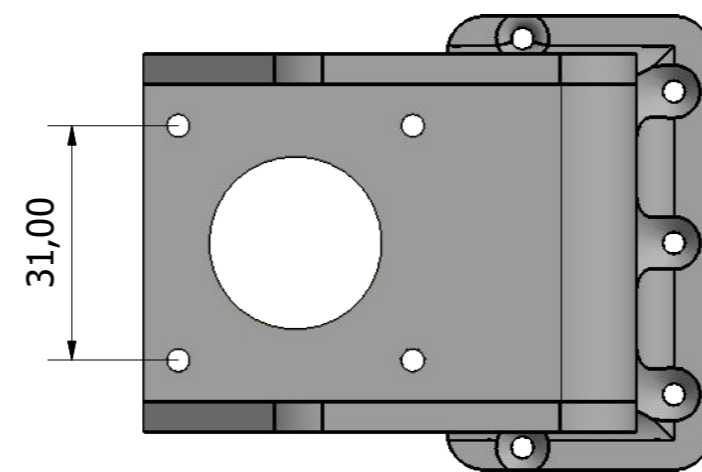
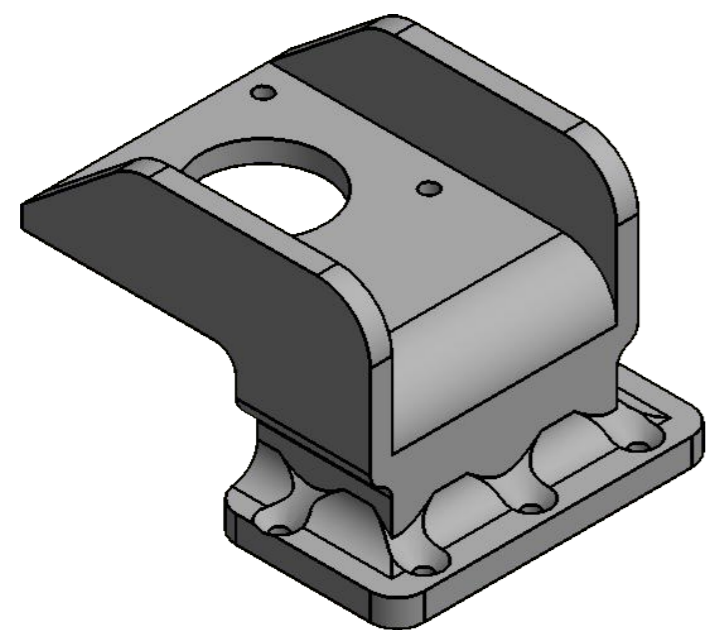
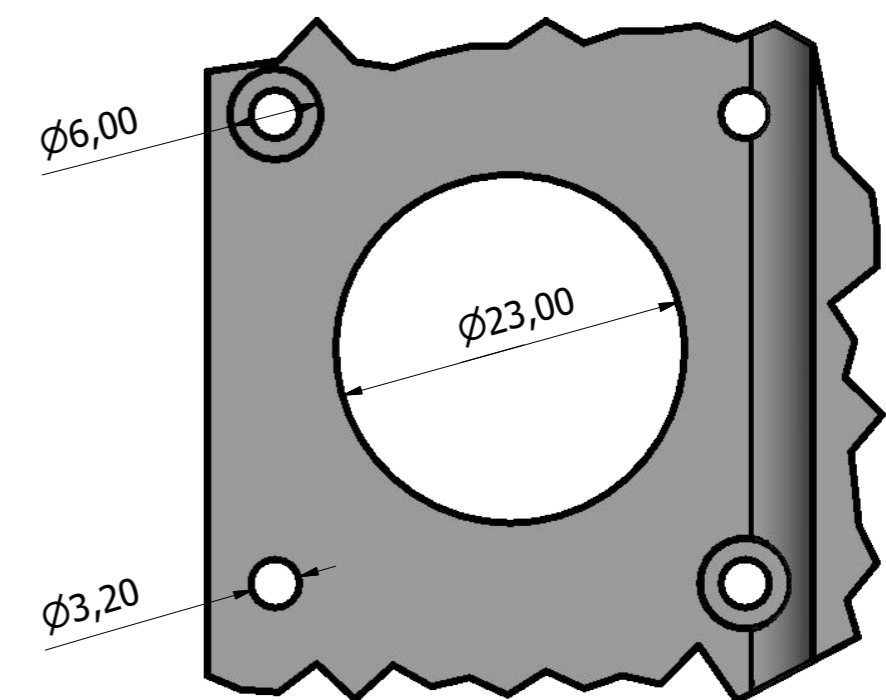
TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León	
PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 5	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Raíl y ruedas
ESCALA 1 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022



AB-AB ( 1 : 1 )

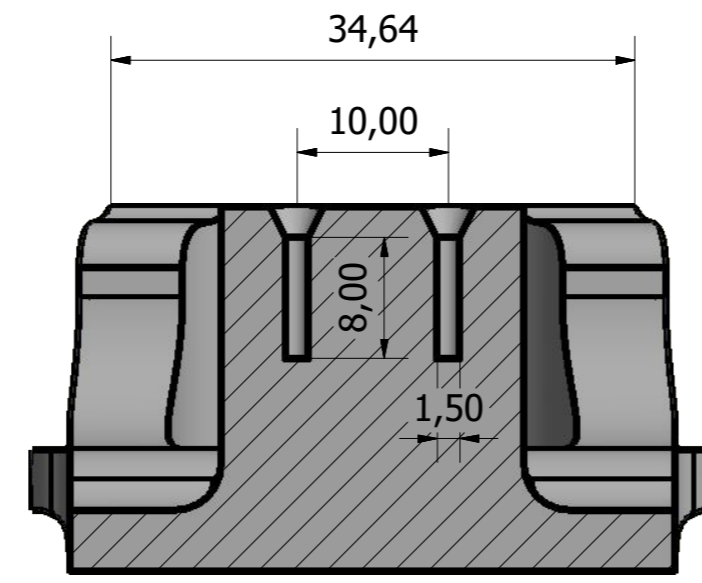
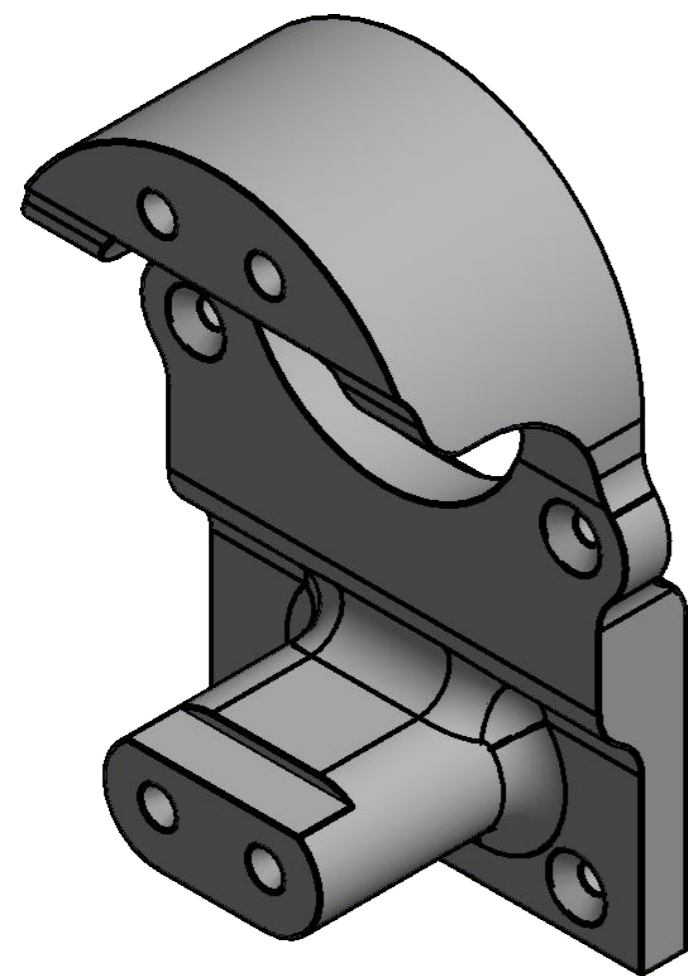
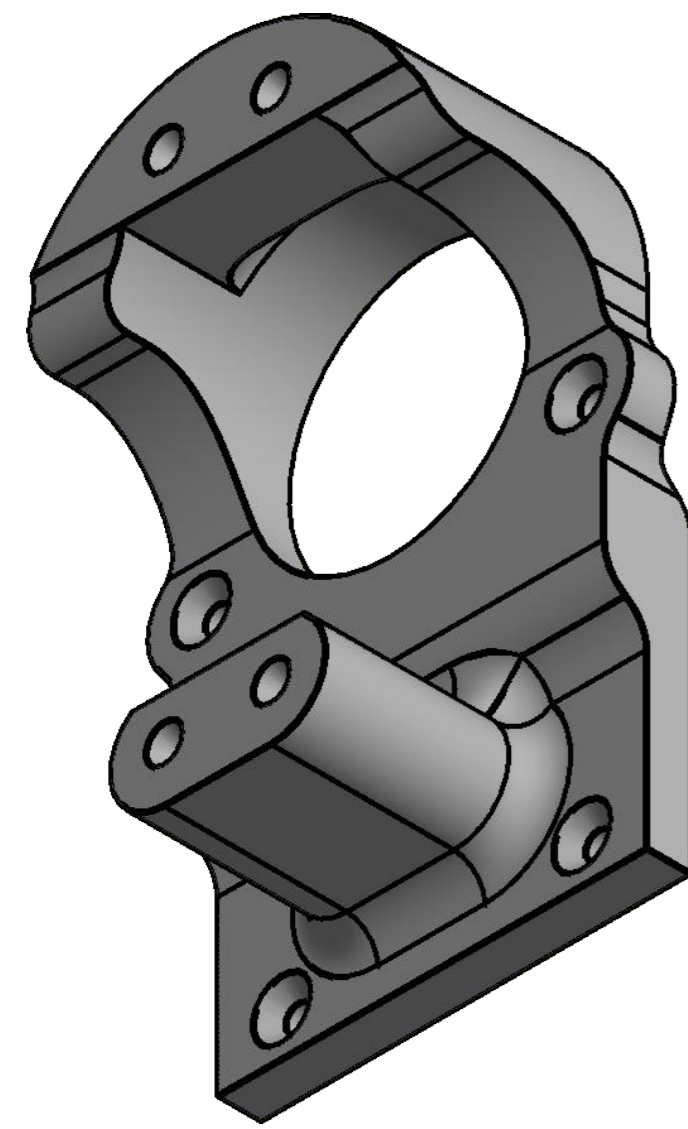


AC ( 2 : 1 )

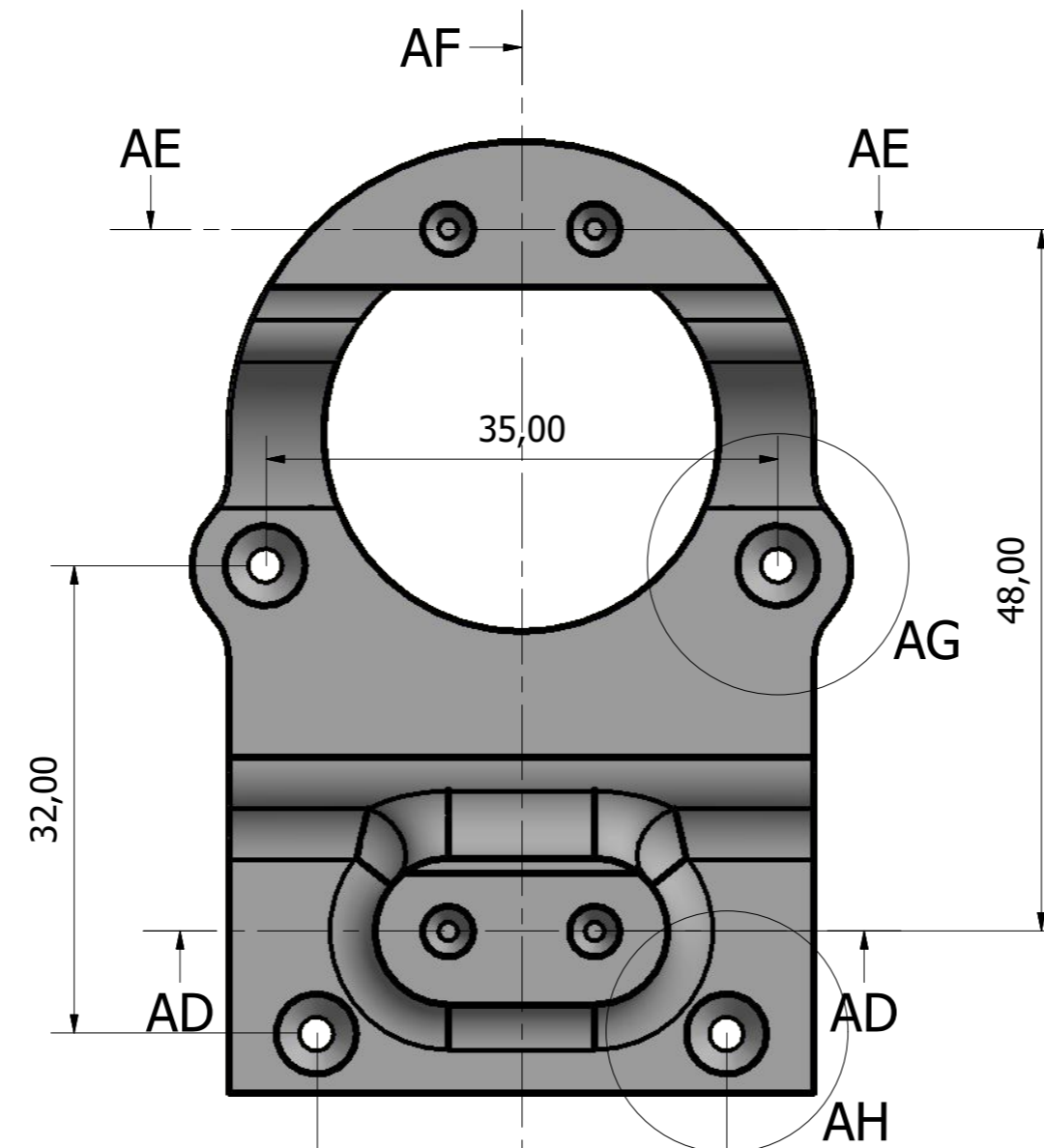


TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León	
PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 6	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Base de sujeción motor de pasos
ESCALA 1 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022

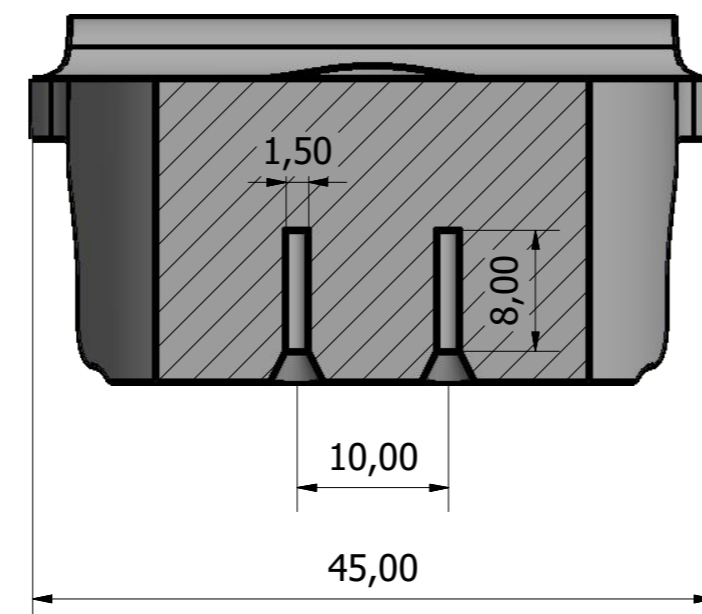




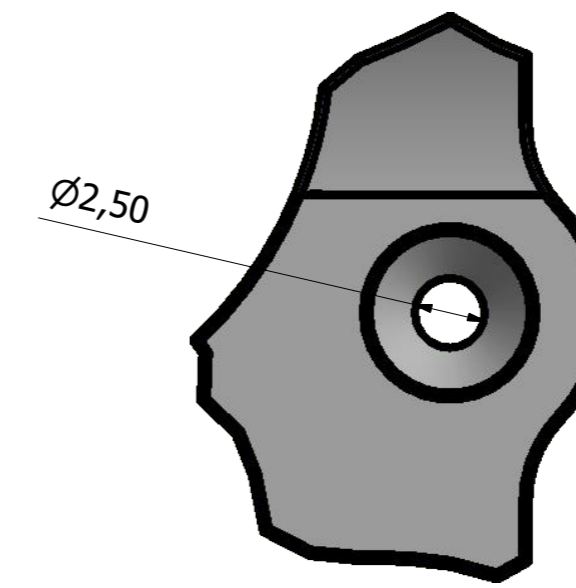
AD-AD ( 2 : 1 )



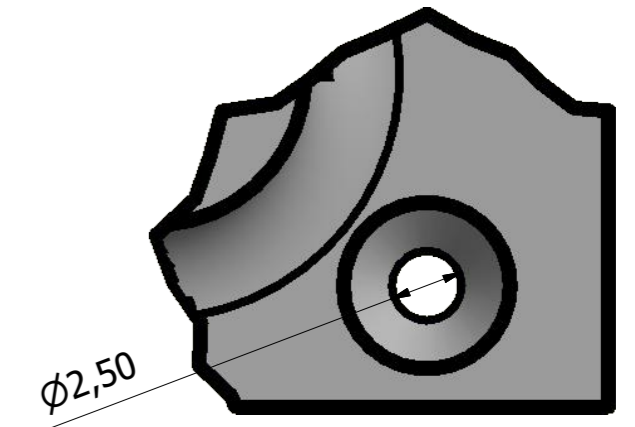
AE-AE ( 2 : 1 )



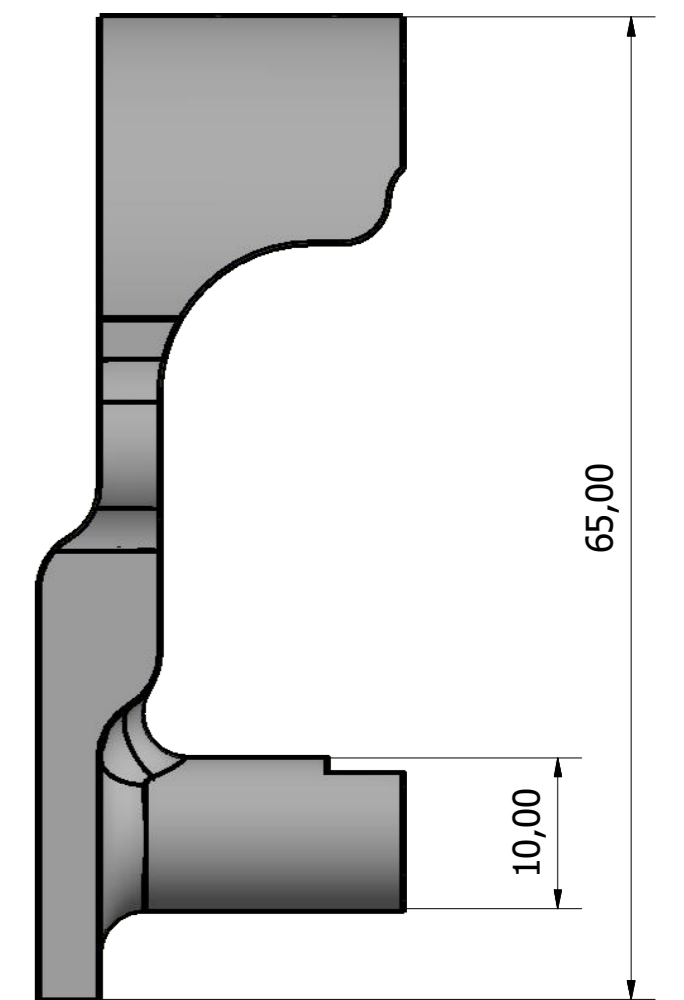
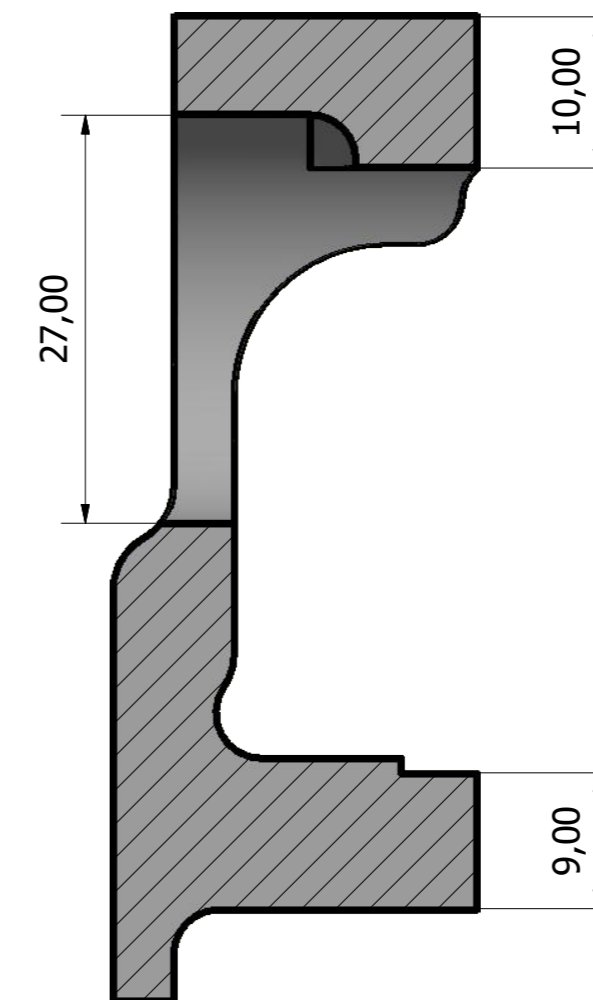
AG ( 4 : 1 )



AH ( 4 : 1 )

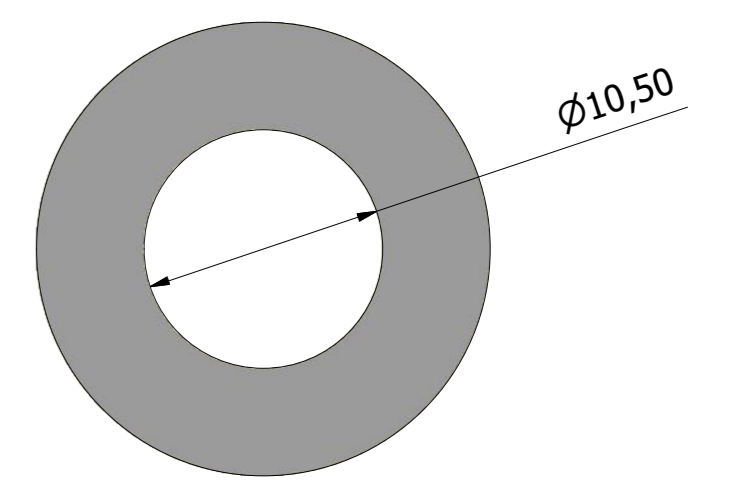
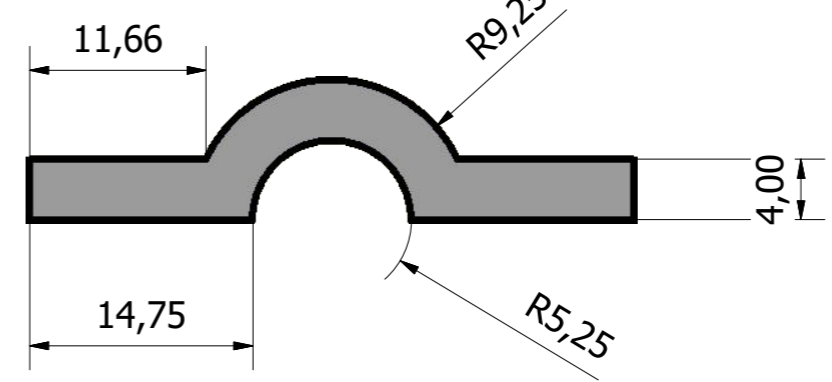
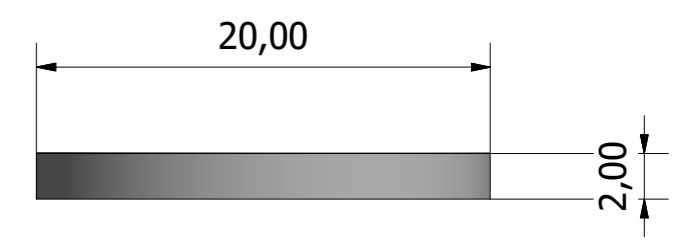
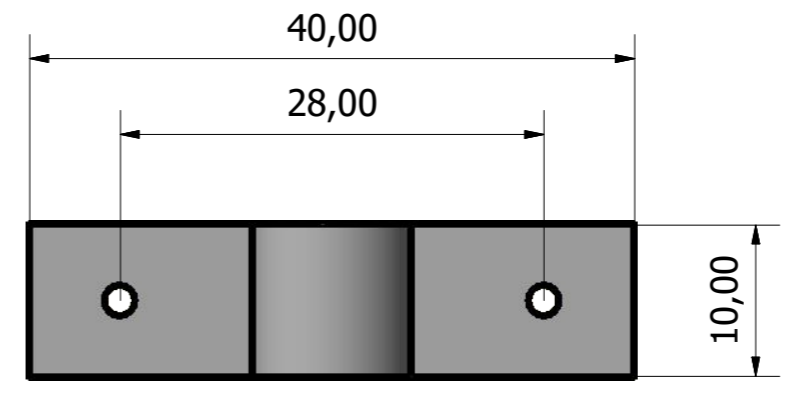
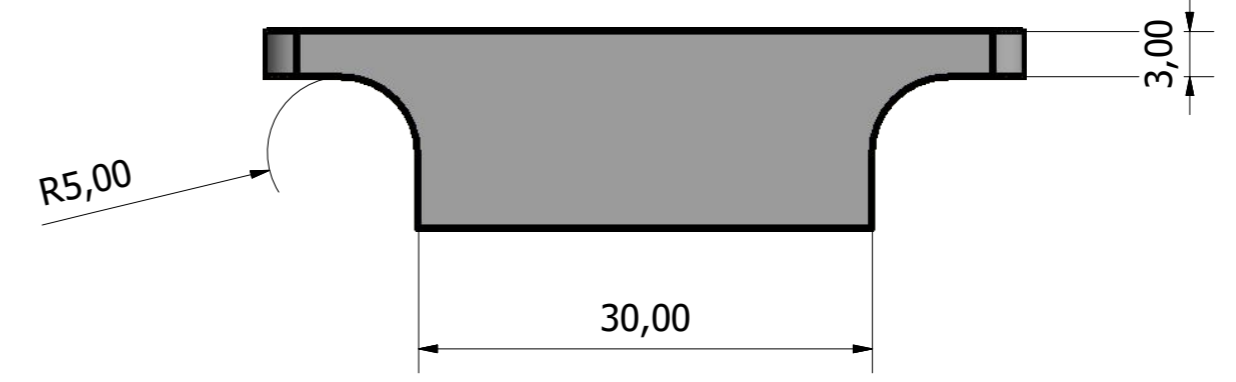
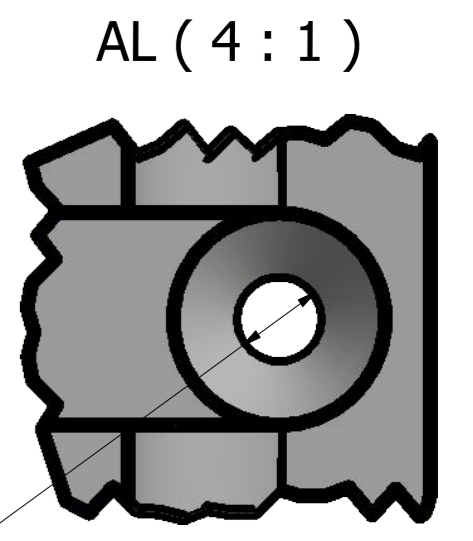
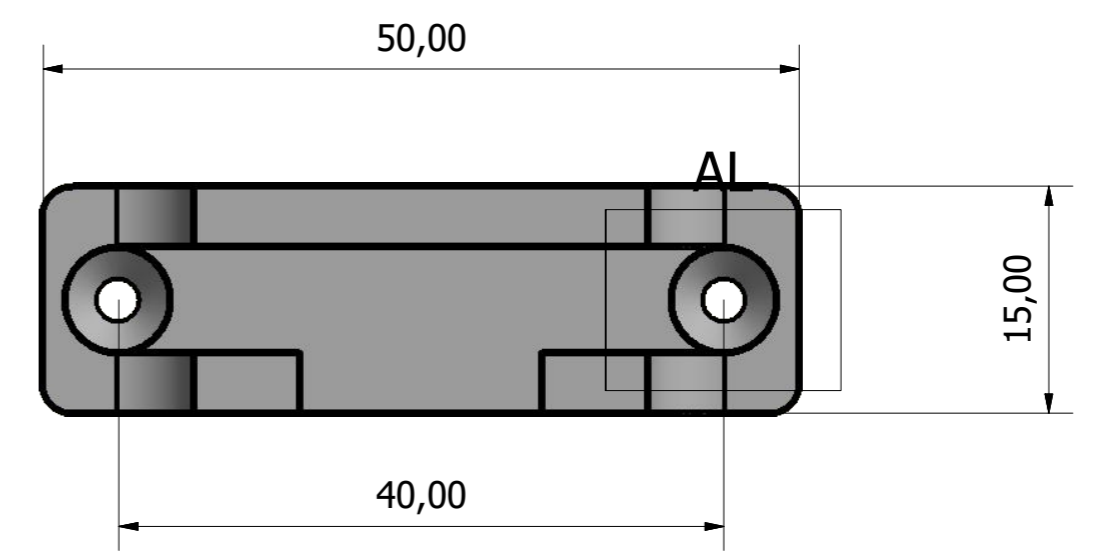
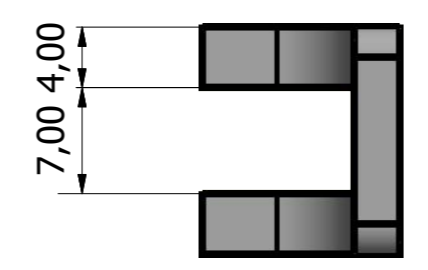
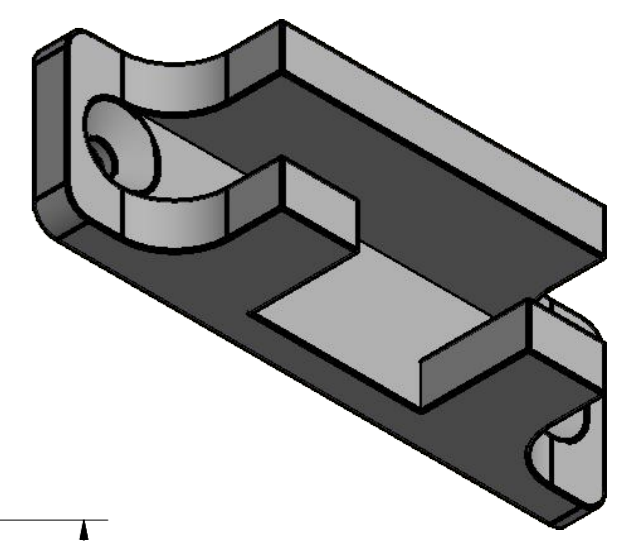
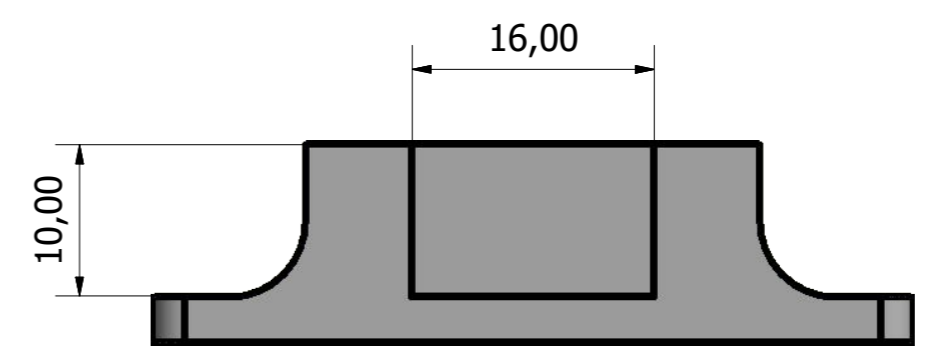
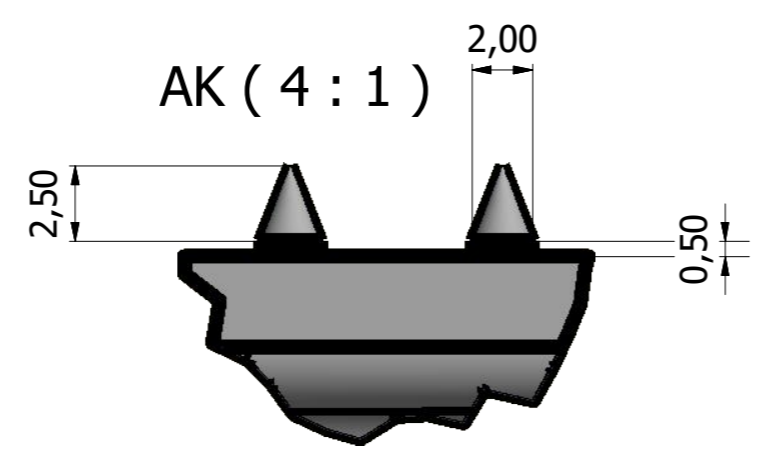
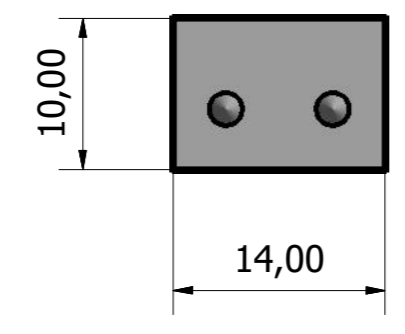
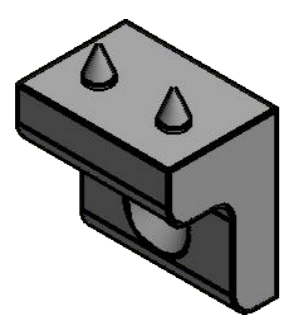
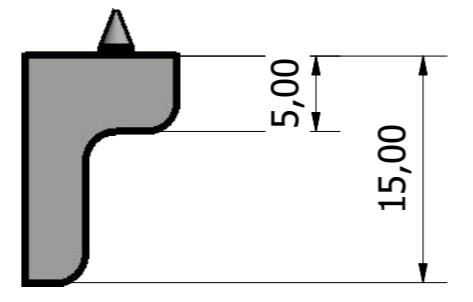
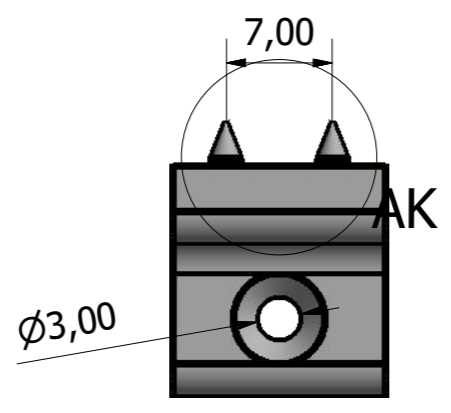
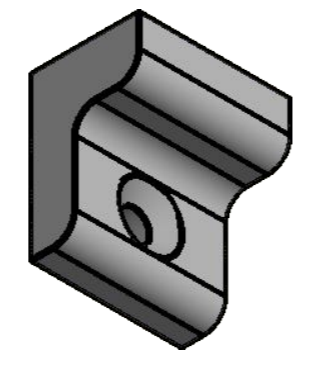
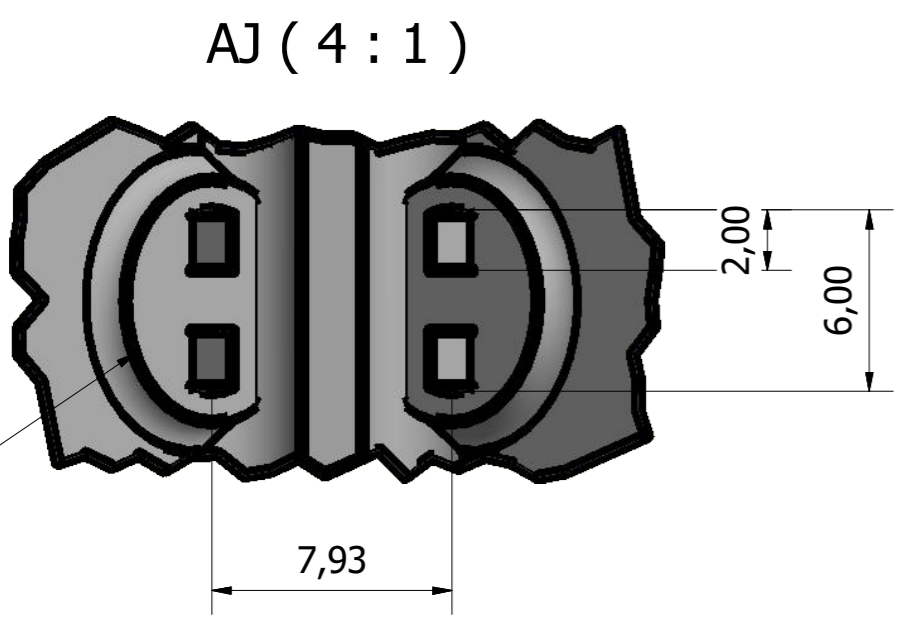
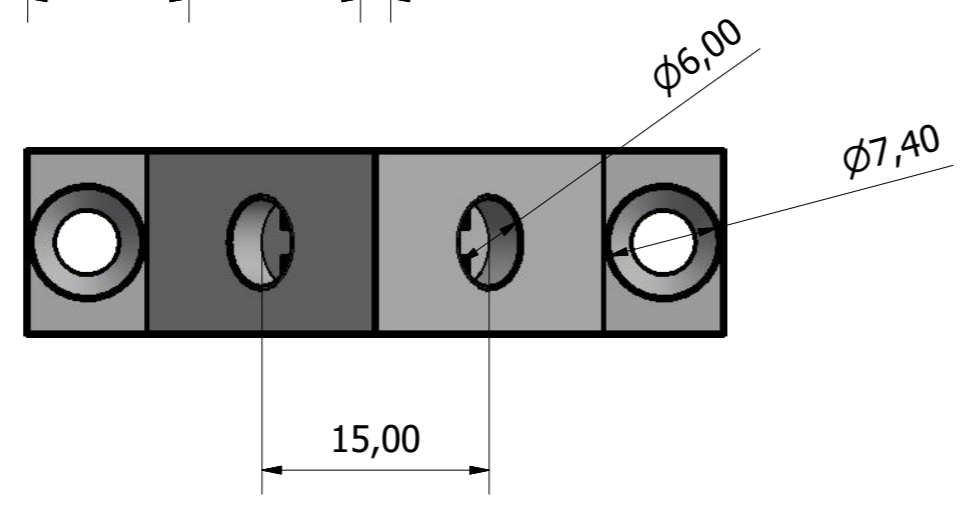
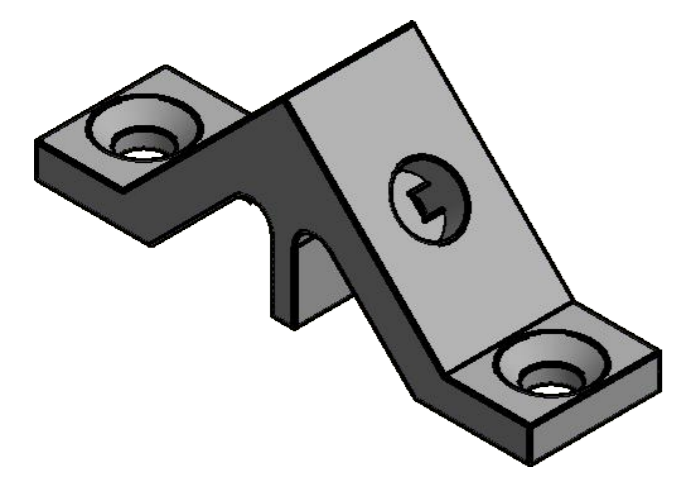
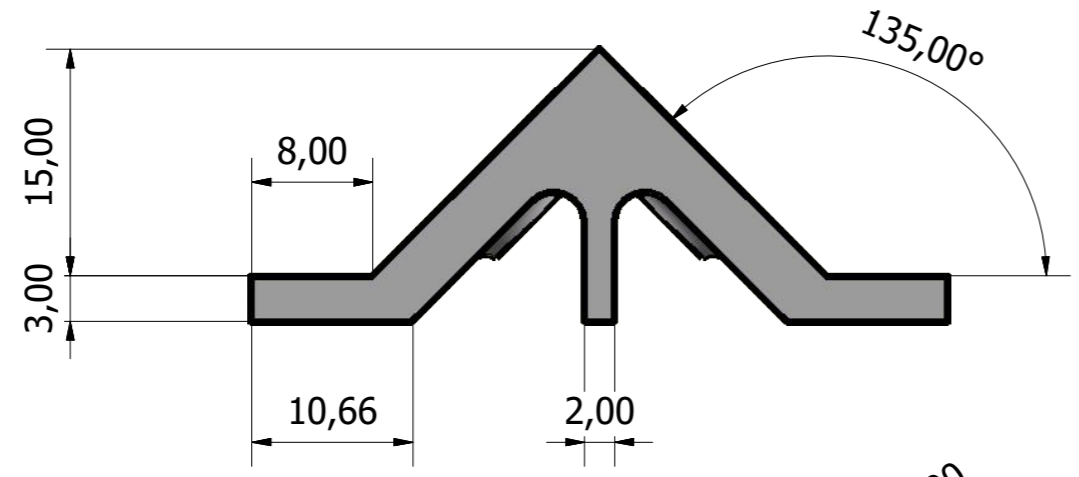
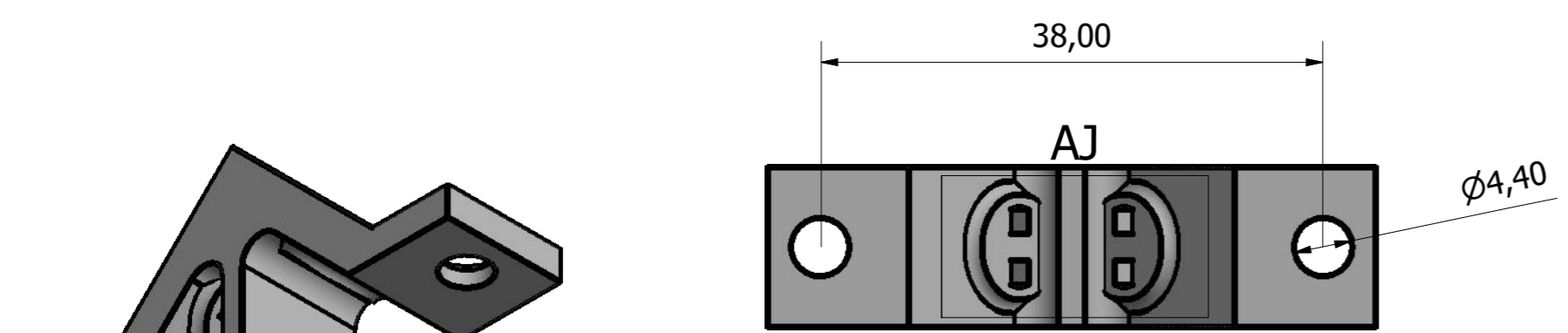


AF-AF ( 2 : 1 )



TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 7	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Sujeción lateral servomotor
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022





TFM Máster en Ingeniería Industrial - EIIIA - Universidad de León PARÁBOLAS TERMOSOLARES CON DOBLE REFLECTOR	
PLANO 8.2.3 - 8	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR DE LUZ SOLAR DOBLE-PARABÓLICO
	PIEZA: Sensor de luz, sujeciones final de carrera, cubre eje y arandela
ESCALA 2 : 1	AUTOR: Jorge Candanedo Moral
	DISEÑO FINALIZADO EL 06/06/2022

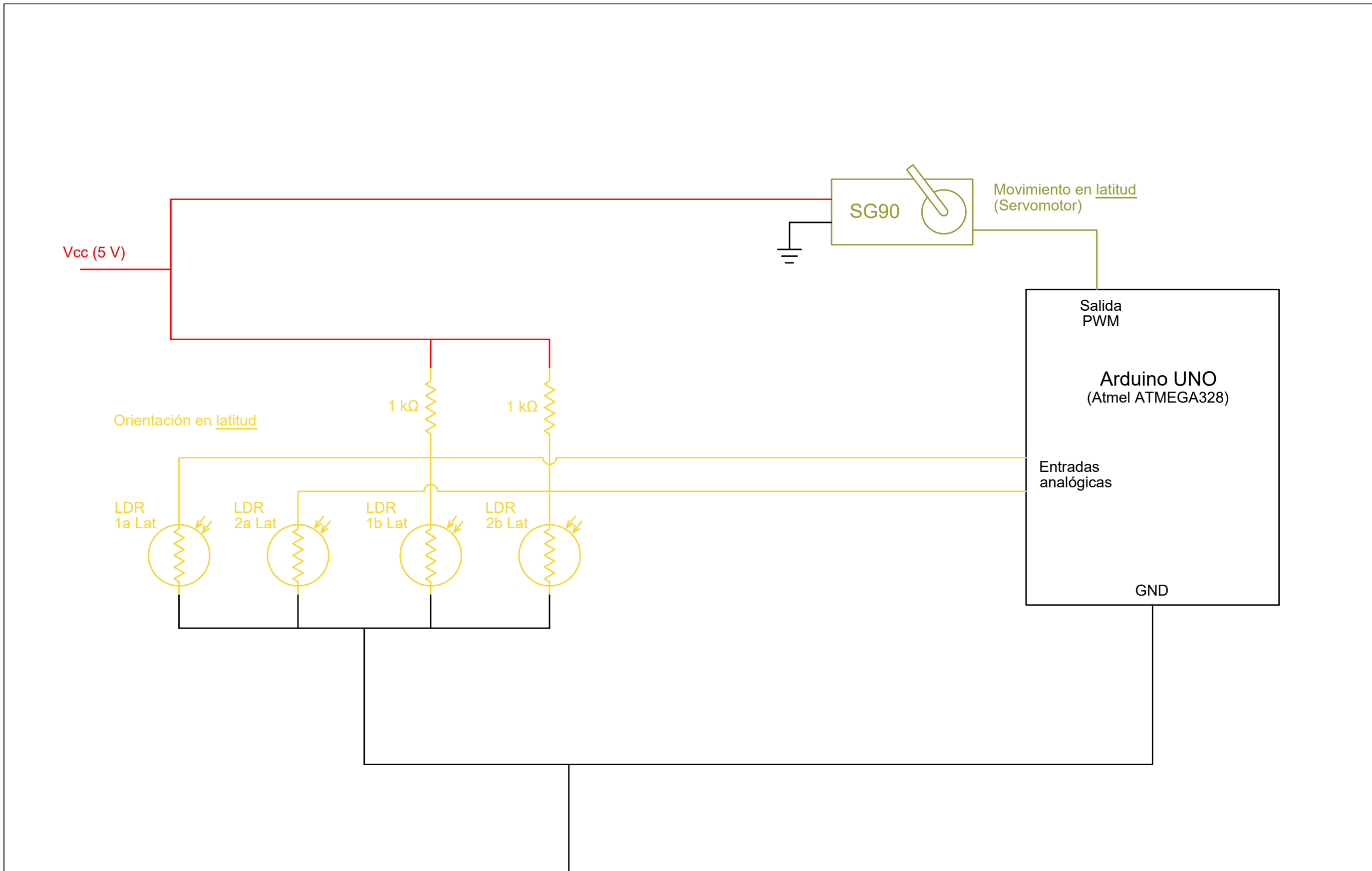
Parábolas termosolares con doble reflector

8.3 – Anexo III – Esquemas eléctricos

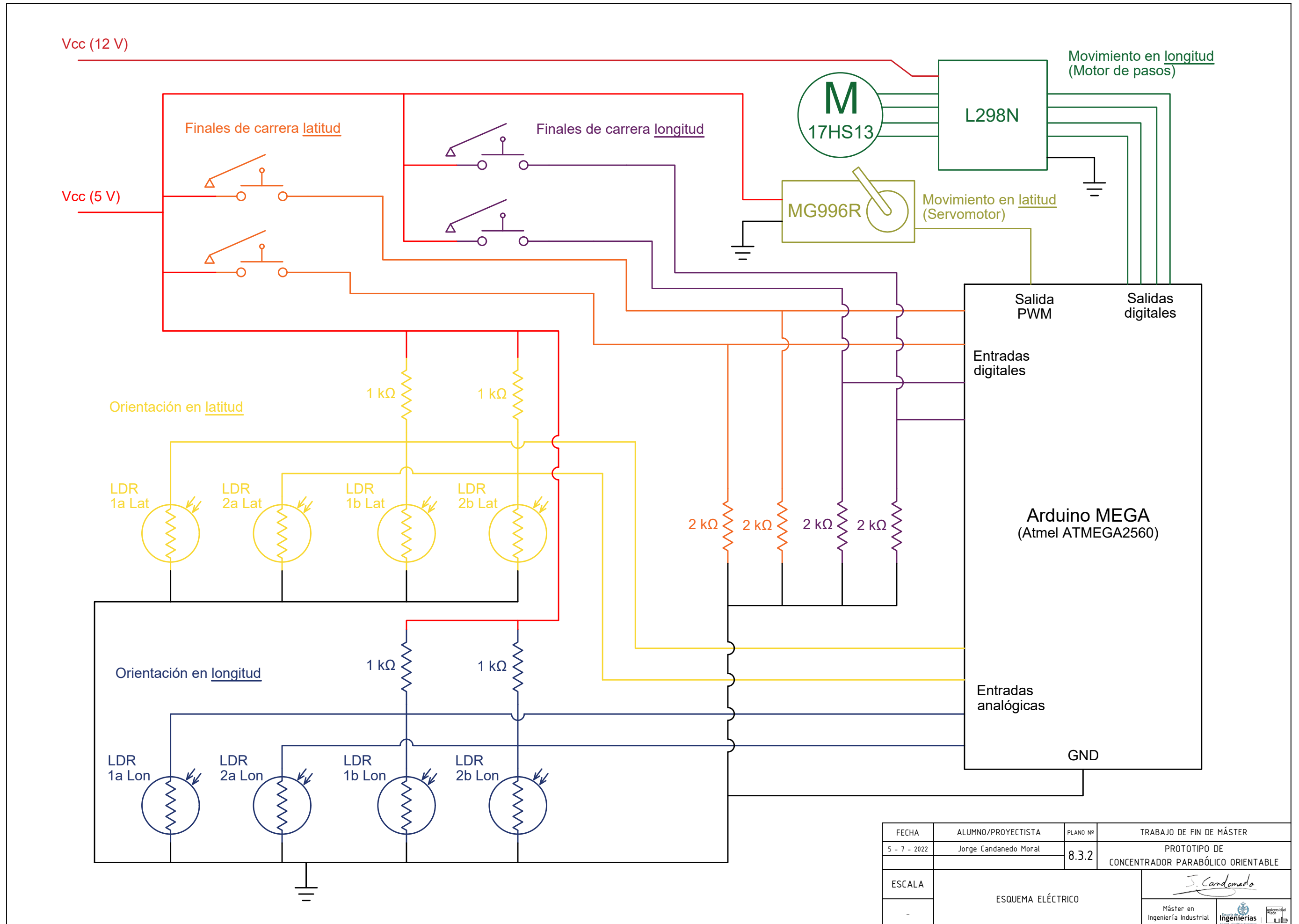
### **8.3. ANEXO III – ESQUEMAS ELÉCTRICOS**

#### **8.3.1. Sistema de orientación de un prototipo de panel fotovoltaico**

#### **8.3.2. Sistema de orientación de un prototipo de concentrador parabólico**



FECHA	ALUMNO/PROYECTISTA	PLANO Nº	TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
5 - 7 - 2022	Jorge Candanedo Moral	8.3.1	PROTOTIPO DE PANEL SOLAR ORIENTABLE EN UN EJE
ESCALA	ESQUEMA ELÉCTRICO		<i>J. Candanedo</i>
-			Máster en Ingeniería Industrial



FECHA	ALUMNO/PROYECTISTA	PLANO Nº	TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
5 - 7 - 2022	Jorge Candanedo Moral	8.3.2	PROTOTIPO DE CONCENTRADOR PARABÓLICO ORIENTABLE
ESCALA	ESQUEMA ELÉCTRICO		<i>J. Candanedo</i>
-			Máster en Ingeniería Industrial