



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN DISCO PARABÓLICO STIRLING,  
PARA USO DOCENTE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**EDGARDO MERINO RUIZ**

PROFESOR GUÍA:  
Nicolás Molina Godoy

PROFESOR CO-GUÍA:  
Álvaro Valencia Musalem

COMISIÓN:  
Juan Carlos Elicer Cortés

SANTIAGO DE CHILE  
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: EDGARDO MERINO RUIZ  
FECHA: 2024  
PROF. GUÍA: NICOLÁS MARTÍN MOLINA GODOY

## DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN DISCO PARABÓLICO STIRLING, PARA USO DOCENTE.

En el contexto de la Política Energética 2050 de Chile, que resalta la importancia de la energía solar en la matriz energética, y el curso ME-5240 Laboratorio de Energía, este trabajo se enfoca en el diseño y dimensionamiento de un concentrador solar de disco parabólico Stirling. La principal motivación es avanzar en el uso de energías renovables y proporcionar una herramienta docente para el laboratorio de energía del departamento de Ingeniería Mecánica, permitiendo a los estudiantes comprender y experimentar con tecnologías de energía solar térmica.

Para el dimensionamiento y diseño de este concentrador solar, se consideró una potencia requerida al eje del motor Stirling de 5 a 15 W. A partir de esta asunción, se determinaron las áreas necesarias para concentrar la irradiancia solar, considerando las eficiencias mecánicas y térmicas del motor, así como la eficiencia de concentración. El dimensionamiento determinó un radio de 0,5 m para el disco parabólico, que entregará calor concentrado a un motor Stirling tipo  $\beta$  capaz de producir hasta 20 W de potencia, según las condiciones de diferencia de temperaturas a las que se someta.

La metodología empleada en este trabajo incluyó el uso de software de modelado y simulación para diseñar el concentrador solar y el motor Stirling, escalando un motor Stirling tipo  $\beta$  seleccionado. Se realizaron estimaciones de irradiancia y eficiencias esperadas, seguidos de modelaciones de segundo orden para prever el rendimiento del motor bajo diferentes condiciones de temperatura. Se generaron múltiples planos y archivos CAD buscando un diseño ligero, modular y de fácil manufactura.

El diseño del concentrador solar y el motor Stirling se centró en ser ligero, modular y de relativa fácil manufactura. Se proporcionaron archivos CAD del diseño y planos para facilitar la manufactura y futuras modificaciones, en caso de llegar a ser fabricado el disco parabólico Stirling.

Este proyecto contribuye al avance de la investigación en energías renovables y proporciona una experiencia educativa práctica y sostenible para los estudiantes de ingeniería mecánica. La conceptualización y desarrollo de un concentrador solar de disco parabólico Stirling como herramienta docente sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la energía solar, promoviendo un futuro más verde y sostenible.

*“Twenty years from now  
you will be more disappointed  
by the things you didn’t do  
than by the ones you did do.”  
Mark Twain*

# Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por siempre apoyarme en este proceso por la universidad, especialmente a mi tía, quien me ha brindado su apoyo todos estos años; a mi mamá, que siempre estaba preocupada por mí y me enviaba kuchen de nuez; y a mi papá, quien me guio por la senda de la ingeniería, entre muchas otras cosas.

Gracias a esos grupitos de amigos que fueron parte de todo este proceso y me acompañaron, estudiando en la pajarera (por osmosis), escalando (seriamente) o jugando Catan hasta altas horas de la noche.

Finalmente, quiero agradecer a la comisión que me asistió con cada duda y desafío que surgió durante este trabajo. Su disposición para enseñar y su apertura para aceptar este trabajo de memoria de título fueron fundamentales para mi desarrollo y éxito en este proyecto.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.2.1. Objetivo General . . . . .	1
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	1
1.3. Alcances . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Energía solar . . . . .	3
2.1.1. Carta solar . . . . .	5
2.2. Concentración solar . . . . .	6
2.2.1. Concentrador solar de disco parabólico . . . . .	7
2.2.2. Simulación de concentración de rayos solares por software SolTrace . . . . .	8
2.3. Motor Stirling . . . . .	9
2.3.1. Ciclo termodinámico . . . . .	11
2.3.2. Componentes de un motor Stirling . . . . .	12
2.3.3. Configuraciones de motores Stirling cinemáticos . . . . .	13
2.3.4. Motor Stirling tipo $\beta$ Karabulut . . . . .	13
2.4. Modelación de motor Stirling . . . . .	16
2.4.1. Modelos termodinámicos . . . . .	16
2.5. Montaje de un concentrador solar Stirling . . . . .	17
2.6. Directrices de dimensionamiento y diseño de la experiencia de laboratorio . . . . .	19
2.6.1. Dimensionamiento: . . . . .	19
2.6.2. Diseño: . . . . .	20
<b>3. Metodología</b>	<b>21</b>
<b>4. Descripción de modelo termodinámico</b>	<b>23</b>
4.1. Modelos implementados por Urieli . . . . .	23
4.1.1. Modelo isotérmico ideal . . . . .	23
4.1.2. Modelo adiabático . . . . .	25
4.1.3. Modelo simplificado . . . . .	27
4.1.3.1. Análisis del Regenerador . . . . .	28
4.1.3.2. Análisis intercambiadores de calor . . . . .	30
4.1.4. Consideraciones para la modelación . . . . .	30
4.2. Algoritmo . . . . .	32
4.3. Validación . . . . .	33
4.4. Escalamiento del motor $\beta$ de Karabulut . . . . .	34

<b>5. Resultados</b>	<b>36</b>
5.1. Dimensionamiento . . . . .	36
5.1.1. Concentrador parabólico . . . . .	36
5.1.2. Motor Stirling tipo $\beta$ . . . . .	37
5.2. Diseño . . . . .	43
5.2.1. Concentrador parabólico . . . . .	43
5.2.1.1. Geometría . . . . .	43
5.2.1.2. Componentes . . . . .	44
5.2.2. Motor Stirling . . . . .	46
5.2.2.1. Cinemática . . . . .	46
5.2.2.2. Componentes . . . . .	48
5.2.3. Montaje . . . . .	52
5.3. Simulación de concentración de rayos por SolTrace . . . . .	55
5.4. Directrices de instrumentalización y puntos de medición . . . . .	58
5.5. Guía de laboratorio . . . . .	62
<b>6. Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>
<b>Anexos</b>	<b>66</b>
A. Configuraciones utilizadas en SolTrace . . . . .	66
B. Estructura de archivos MATLAB modelo Urieli . . . . .	69
C. Dimensionamiento de motor Stirling . . . . .	70
C.1. Condiciones iniciales entregadas al modelo . . . . .	70
C.2. Gráficos de diferentes condiciones . . . . .	71
D. Planos . . . . .	79
E. Guía de laboratorio . . . . .	133

# Índice de Tablas

2.1.	Especificaciones técnicas del motor $\beta$ [21]. . . . .	15
5.1.	Características geométricas de disco parabólico dimensionado. . . . .	37
5.2.	Escalamiento de la geometría característica del motor $\beta$ de Karabulut. . . . .	38
5.3.	Potencia máxima obtenida bajo las temperaturas de fuente fría y caliente, para motor $\beta$ escalado al 50 % y eficiencia mecánica 80 %. . . . .	43
5.4.	RPM a potencia máxima obtenida bajo las temperaturas de fuente fría y caliente, para motor $\beta$ escalado al 50 % y eficiencia mecánica 80 %. . . . .	43
C.1.	Valores entregados al programa de Urieli para las simulaciones (convertir a formato .dat). . . . .	70

# Índice de Figuras

2.1.	Mapa de recurso solar, irradiación directa normal [6]. . . . .	4
2.2.	Promedio de la radiación directa normal para cada hora y mes [7] . . . . .	5
2.3.	Carta solar en las inmediaciones de la FCFM para el año 2024 [10]. . . . .	6
2.4.	Concentrador solar parabólico [12]. . . . .	7
2.5.	Variables geométricas en disco solar parabólico [13]. . . . .	7
2.6.	Software SolTrace de NREL [14]. . . . .	9
2.7.	Ilustración del motor Stirling realizada por Robert Stirling [18]. . . . .	10
2.8.	Motor Stirling tipo $\beta$ ilustrando los distintos puntos de los diagramas $p$ - $V$ y $T$ - $s$ [19]. . . . .	11
2.9.	Motores Stirling Tipo $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ [16]. . . . .	13
2.10.	Esquema del motor $\beta$ y fotografía del motor ya construido [21]. . . . .	14
2.11.	Curvas de potencia del motor $\beta$ [21]. . . . .	16
2.12.	Esquema concentrador solar Stirling [24]. . . . .	17
4.1.	Modelo Isotérmico [26]. . . . .	24
4.2.	Modelo adiabático [26]. . . . .	25
4.3.	Análisis simple del Regenerador [26]. . . . .	28
4.4.	Análisis simple de los intercambiadores de calor [26]. . . . .	30
4.5.	Diagrama algoritmo utilizado por el modelo numérico de Urieli [22]. . . . .	33
4.6.	En azul curva de potencia de salida v/s velocidad resultante de la simulación del motor $\beta$ original, utilizando el modelo simple de Urieli. En negro curva obtenida por Karabulut [21]. . . . .	34
4.7.	Fotografía del motor Stirling desarrollado por Karabulut [27]. . . . .	35
5.1.	Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor $\beta$ de Karabulut según los valores de la tabla 5.2. En azul 80 %, verde 60 % y rojo 50 %. . . . .	38
5.2.	Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor $\beta$ de Karabulut al 80 % y además, considerando la eficiencia mecánica en azul 100 %, en verde 80 % y en rojo 60 %. . . . .	39
5.3.	Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor $\beta$ de Karabulut al 60 %, con fuente fría a 30 °C, fuente caliente a 300 °C y además, considerando la eficiencia mecánica en azul 100 %, en verde 80 % y en rojo 60 %. . . . .	40
5.4.	Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor $\beta$ de Karabulut al 50 %, con fuente fría a 30 °C, fuente caliente a 300 °C y además, considerando la eficiencia mecánica en azul 100 %, en verde 80 % y en rojo 60 %. . . . .	40
5.5.	Comparativa de potencia obtenida al eje, del motor $\beta$ escalado al 50 %, considerando una eficiencia mecánica del 80 %. En azul caso favorable, en verde caso esperado y en rojo caso desfavorable. . . . .	41



5.6.	Comparativa de potencia obtenida al eje, del motor $\beta$ escalado al 50%, considerando una eficiencia mecánica del 60%. En azul caso favorable, en verde caso esperado y en rojo caso desfavorable. . . . .	42
5.7.	Estructura de disco parabólico Stirling generada por [28]. . . . .	44
5.8.	Vistas generales del disco parabólico diseñado. . . . .	46
5.9.	Esquema general de la cinemática del motor Stirling tipo $\beta$ . Modificado de [29].	47
5.10.	Curvas de posición en Y vs. ángulo de revolución, generadas para evitar interferencias entre componentes. . . . .	48
5.11.	Vista en perspectiva del motor $\beta$ diseñado. . . . .	51
5.12.	Vista superior del motor $\beta$ diseñado. . . . .	51
5.13.	Puntos muertos del pistón y detalle del mecanismo de movimiento de pistón, desplazador, ejes y volantes de inercia. . . . .	52
5.14.	Vista en perspectiva del montaje de disco parabólico Stirling diseñado. . . . .	53
5.15.	Vista lateral disco parabólico Stirling. . . . .	54
5.16.	Detalle de regulación de ángulo de inclinación del disco parabólico Stirling. . . . .	54
5.17.	Detalle regulación de posición del motor Stirling con respecto al origen del disco parabólico. . . . .	55
5.18.	Simulación concentrando los rayos a 599 mm del centro de la parábola, 5 mm más próximos que el punto focal. . . . .	56
5.19.	Simulación de la concentración de los rayos en la tapa pistón, ubicada a 599 del centro de la parábola. . . . .	57
5.20.	Simulación concentrando los rayos a 544 mm del centro de la parábola, 60 mm más próximos que el punto focal. . . . .	57
5.21.	Simulación de la concentración de los rayos en la tapa pistón, ubicada a 544 del centro de la parábola. . . . .	58
5.22.	Puntos de instrumentalización disco parabólico Stirling. . . . .	59
5.23.	Ejemplo de instrumentalización en una máquina de vapor. En azul zona de termocupla y en amarillo conjunto volante de inercia correa generador. . . . .	61
5.24.	Panel de control con LCD y perilla de ejemplo [30]. . . . .	61
A.1.	Configuraciones de rayos solares generados para la simulación. . . . .	66
A.2.	Configuraciones ópticas de reflectividad, transmisividad y errores ópticos. . . . .	67
A.3.	Configuraciones geométricas consideradas para la simulación. Incluye en orden: tapa motor Stirling, parábola y carcasa del motor. . . . .	67
A.4.	Configuraciones de trazado de rayos solares. . . . .	68
B.1.	Estructura de archivos modelo simple [26]. . . . .	69
C.1.	Resultado motor $\beta$ 50%, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 350 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%. . . . .	71
C.2.	Resultado motor $\beta$ 50%, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 350 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%. . . . .	71
C.3.	Resultado motor $\beta$ 50%, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 350 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%. . . . .	72
C.4.	Resultado motor $\beta$ 50%, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 300 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%. . . . .	72
C.5.	Resultado motor $\beta$ 50%, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 300 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%. . . . .	73
C.6.	Resultado motor $\beta$ 50%, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 300 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%. . . . .	73

C.7.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 250 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	74
C.8.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 250 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	74
C.9.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 250 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	75
C.10.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 200 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	75
C.11.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 200 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	76
C.12.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 200 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	76
C.13.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 150 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	77
C.14.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 150 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % . . . . .	77
C.15.	Resultado motor $\beta$ 50 %, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 150 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 % (Según el modelo el motor no debería girar). . . . .	78

# Nomenclatura

$f$	Distancia focal.	$T_k$	Temperatura en el <i>Cooler</i> .
$a$	Radio del disco parabólico.	$T_r$	Temperatura en el Regenerador.
$\phi$	Ángulo de borde.	$M$	Masa de aire en el motor.
$r$	Radio al punto focal.	$V_c$	Volumen en el espacio de compresión.
$W$	Ancho de imagen focal.	$V_k$	Volumen en el <i>Cooler</i> .
$\delta$	Ángulo de dispersión.	$V_r$	Volumen en el Regenerador.
$p$	Presión.	$V_h$	Volumen en el <i>Heater</i> .
$V$	Volumen.	$V_e$	Volumen en el espacio de expansión.
$T$	Temperatura.	$Q_e$	Calor transferido en expansión.
$s$	Entropía.	$Q_c$	Calor transferido en compresión.
$W_c$	Trabajo compresión.	$T_c$	Temperatura en compresión.
$n$	Número de moles.	$T_e$	Temperatura en expansión.
$R$	Constante de gases ideales.	$c_p$	Calor específico.
$W_e$	Trabajo de expansión.	$c_v$	Capacidad calórica.
$T_{he}$	Temperatura de interfaz, <i>Heater</i> y espacio de expansión.	$T_{ck}$	Temperatura de interfaz, compresión y <i>Cooler</i> .
$\alpha$	Configuración alpha.	$m'_{ck}$	Flujo másico de espacio de compresión a <i>Cooler</i> .
$\beta$	Configuración beta.	$m'_{kr}$	Flujo másico del <i>Cooler</i> al Regenerador.
$\gamma$	Configuración gamma.	$m'_{he}$	Flujo másico del <i>Heater</i> al espacio de expansión.
$T_h$	Temperatura en el <i>Heater</i> .	$m'_{rh}$	Flujo másico del Regenerador al <i>Heater</i> .
$m_c$	Masa de aire en el espacio de compresión.	$m_k$	Masa de aire en <i>Cooler</i> .
$m_e$	Masa de aire en el espacio de expansión.	$m_h$	Masa de aire en el <i>Heater</i> .
$Q_k$	Calor transferido en el <i>Cooler</i> .	$Q_r$	Calor transferido en el Regenerador.
$Q_h$	Calor transferido en el <i>Heater</i> .	$A_{wg}$	Área de interacción del Regenerador.
$h$	Coefficiente de transferencia de calor general.	$NTU$	Número de unidades de transferencia.
$K_R$	Conductancia térmica de la pared del Regenerador.	$T_{wh}$	Temperatura pared del Regenerador cercana a <i>Heater</i> .
$T_{wk}$	Temperatura pared del Regenerador cercana a <i>Cooler</i> .	$N$	Frecuencia de funcionamiento del motor.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En el transcurso de los últimos años, el estado de Chile delineó su visión energética a largo plazo mediante la presentación de la Política Energética 2050 en el ex-congreso nacional [1]. Este plan estratégico estableció objetivos fundamentales para la matriz energética del país y delineó los caminos para alcanzarlos. En este contexto, la energía solar emergió como un componente central, manifestándose en una significativa proliferación de proyectos de energía fotovoltaica y de concentración solar, como la planta termosolar Cerro Dominador.

En este trabajo de memoria de título, se propone explorar una tecnología de concentración solar alternativa que utiliza un motor Stirling. Este motor opera mediante un ciclo térmico con cámara de combustión externa, permitiendo la contención del fluido de trabajo y la transferencia de calor por diversas vías. La irradiación solar se convierte en un factor crucial, ya que al concentrarla en la cámara caliente del motor, se genera trabajo de manera limpia y escalable.

La conceptualización de este sistema como una herramienta de uso docente busca enriquecer el laboratorio de energía del departamento de ingeniería civil mecánica, incorporando nuevas experiencias centradas en tecnologías renovables. Este enfoque no solo contribuye al avance de la investigación, sino que también promueve un aprendizaje práctico y sostenible en el ámbito de la ingeniería mecánica y las energías renovables.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo General

Dimensionar y concebir un sistema de energía solar a través de un concentrador de disco parabólico Stirling, diseñado para su puesta en marcha como herramienta docente en el laboratorio de energía ME-5240.

#### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Dimensionar un disco parabólico considerando la irradiancia en las cercanías de la facultad.
- Dimensionar un motor Stirling considerando su manufactura.
- Especificar una configuración y fluido de trabajo del motor Stirling.

- Realizar cálculos de irradiancia solar concentrada y potencia obtenida del ciclo Stirling.
- Diseñar un montaje de laboratorio con el concentrador solar Stirling dimensionado.
- Designar puntos de medición de datos como: Potencia eléctrica, Irradiancia solar, Temperaturas, entre otros parámetros.
- Crear una experiencia de laboratorio usando el concentrador solar Stirling.
- Calcular resultados teóricos de dicha experiencia.

### **1.3. Alcances**

- Se usarán datos del explorador solar y se calculará un promedio de irradiancia mensual.
- Este trabajo se centrará en el modelamiento teórico del ciclo térmico y su eficiencia, sin realizar simulaciones numéricas (nodales).
- Se realizará un análisis simplificado sin múltiples iteraciones de configuraciones.
- Se limitará el diseño del montaje experimental a la generación de planos de componentes principales y directrices de manufactura.
- El diseño del montaje se enfocará en aspectos técnicos, sin considerar los costos asociados a manufactura, instrumentos, entre otros. Llegando hasta un nivel de ingeniería básica.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Energía solar

En un mundo que busca soluciones energéticas sostenibles y renovables, la energía solar emerge como, el camino hacia un futuro más verde. Su capacidad para aprovechar la luz que el sol produce, siendo una fuente de energía inagotable y abundante, la convierte en una alternativa atractiva como recambio o complemento a los combustibles fósiles.

La historia de la energía solar se remonta a miles de años atrás, cuando las civilizaciones antiguas utilizaban principios básicos de diseño pasivo solar para calentar sus hogares y baños [2]. Sin embargo, fue en el siglo XIX cuando la tecnología solar moderna comenzó a tomar forma. En 1839, Alexandre Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, allanando el camino para la conversión de la luz solar en electricidad. Un hito crucial llegó en 1954 con el desarrollo de la primera célula solar de silicio eficiente en los Laboratorios Bell, marcando el inicio de la era moderna de la energía solar [3].

La energía solar se manifiesta en dos formas principales: la energía solar fotovoltaica (FV) y la energía solar térmica. La energía solar FV utiliza paneles solares compuestos por células fotovoltaicas para convertir la luz solar directamente en electricidad. Esta tecnología es ampliamente utilizada en instalaciones residenciales, comerciales y a gran escala en plantas solares.

Por otro lado, la energía solar térmica aprovecha la radiación solar para producir energía térmica, la cual se busca utilizar en este trabajo. Este potencial solar se puede utilizar para calentar agua en sistemas domésticos o industriales y para generar electricidad en plantas solares térmicas de concentración, donde espejos o lentes concentran la luz solar para producir vapor que impulsa turbinas generadoras de electricidad.

La energía solar ofrece una multitud de beneficios que la convierten en una opción atractiva para un futuro sostenible. Es una fuente de energía renovable e inagotable, ya que el sol proporciona más energía a la Tierra en una hora de la que la humanidad consume en un año [4]. Además, La energía solar tiene emisiones muy bajas en comparación con otras fuentes convencionales, siendo aproximadamente 10 veces menores por kWh que un ciclo combinado, lo que la convierte en una herramienta crucial para combatir el cambio climático [5].

Asimismo, la energía solar puede generar independencia energética y seguridad al reducir la dependencia de los combustibles fósiles, contribuyendo a un futuro energético más resiliente y sostenible. Si bien la energía solar presenta un futuro prometedor, también enfrenta algunos desafíos. La intermitencia de la radiación solar y la necesidad de almacenamiento de energía

para garantizar un suministro constante son obstáculos importantes que se están abordando con avances en tecnologías de almacenamiento de energía como las baterías de iones de litio.

A medida que la energía solar se vuelve más eficiente, asequible y confiable, se perfila como una pieza fundamental en la transición hacia un sistema energético sostenible. Su adopción a gran escala, junto con otras fuentes de energía renovable, tiene el potencial de transformar el panorama energético global, reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático, creando un futuro más verde y próspero para las generaciones venideras. A continuación se presenta un mapa con la irradiancia a nivel mundial:

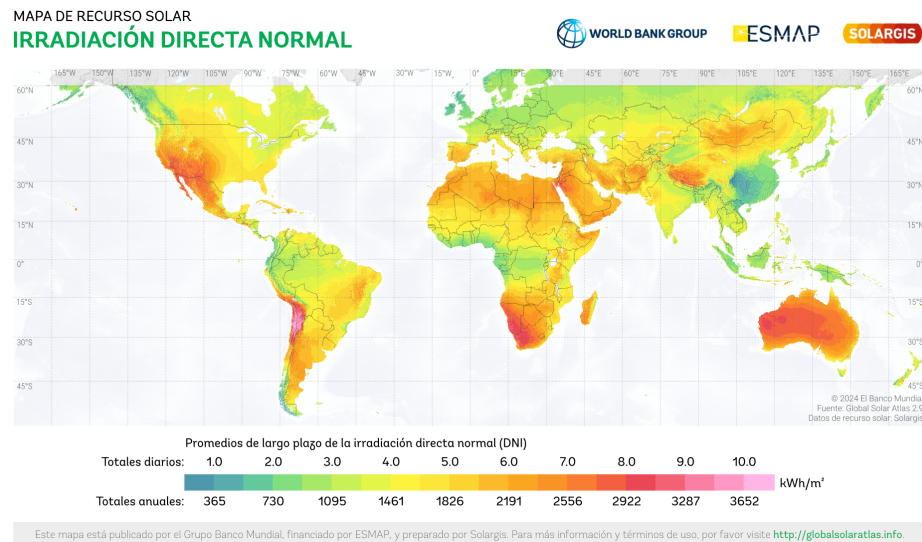


Figura 2.1: Mapa de recurso solar, irradiancia directa normal [6].

Como se puede apreciar en la figura 2.1 de irradiancia solar mundial, Chile es un país privilegiado en términos de irradiancia. Esto se debe a múltiples factores, siendo especialmente relevante la presencia del desierto de Atacama y el bajo porcentaje de nubes en los valles centrales. Considerando esto, se seleccionó en el explorador solar el centro del patio central de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile 2.2 para obtener información detallada de la irradiancia solar normal directa por horas durante el año. A partir de ahí, se trabajará calculando el recurso disponible y dimensionando el disco parabólico Stirling.

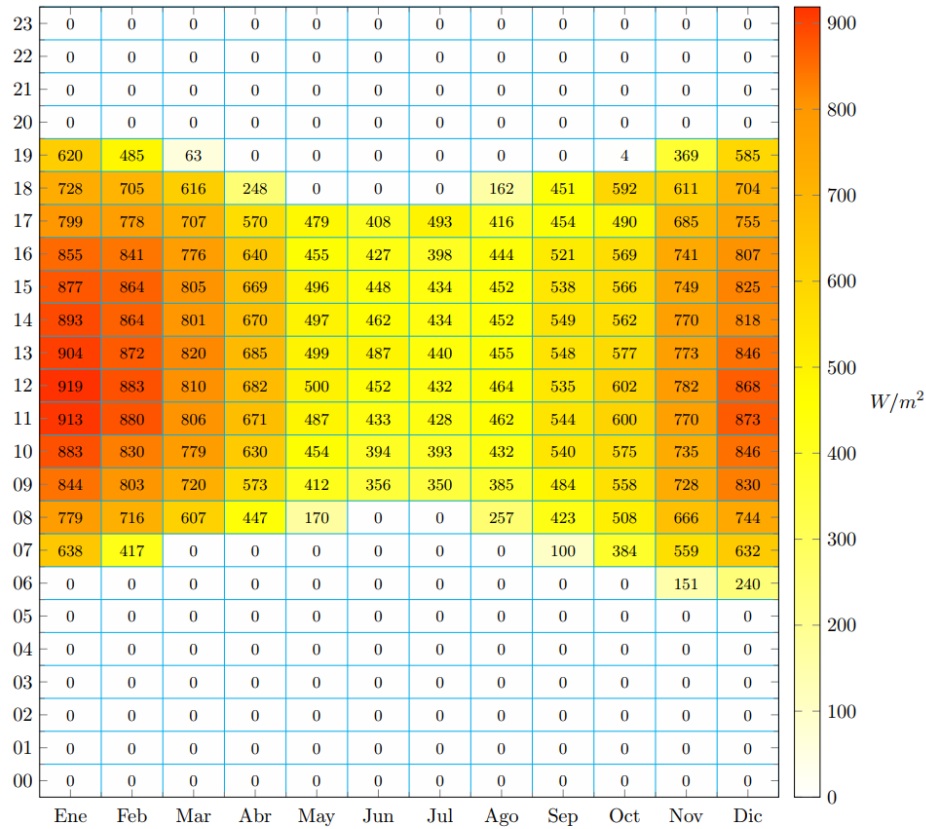


Figura 2.2: Promedio de la radiación directa normal para cada hora y mes [7]

### 2.1.1. Carta solar

La carta solar es una herramienta gráfica utilizada en el ámbito de la arquitectura y la ingeniería para representar la trayectoria del sol en el cielo a lo largo de un día, durante diferentes épocas del año [8]. Esta representación permite entender cómo varía la posición del sol con el tiempo y es esencial para el diseño eficiente y sostenible de edificios y espacios urbanos. La carta solar será utilizada para poder determinar los ángulos en los que estará ubicado el sol a lo largo del año, de tal manera de poder diseñar adecuadamente el montaje experimental en lo que a ángulos respecta.

La carta solar ha sido una herramienta fundamental en el diseño desde la antigüedad. Las civilizaciones antiguas, como los egipcios y los griegos, ya estudiaban el movimiento del sol para orientar y diseñar sus edificaciones de manera óptima [9]. Con el avance de la ciencia y la tecnología, la carta solar se ha desarrollado y refinado, permitiendo una mayor precisión y aplicaciones más diversas. En lo que respecta a ingeniería mecánica se puede utilizar para:

**Mejorar la eficiencia energética:** Utilizar una carta solar permite diseñar sistemas de calefacción pasiva y refrigeración natural, reduciendo la necesidad de sistemas electromecánicos de climatización. Al conocer la posición del sol en diferentes épocas del año, se pueden implementar estrategias como la colocación estratégica de ventanas, la utilización de materiales con alta inercia térmica y la incorporación de elementos de sombreado ajustables.



**Instalación de Sistemas Solares:** Para la instalación de paneles solares fotovoltaicos o térmicos, la carta solar es crucial. Permite determinar la inclinación y orientación óptimas de los paneles para maximizar la captación de energía solar a lo largo del año. También ayuda a identificar posibles obstrucciones que puedan causar sombras y reducir la eficiencia del sistema.

La carta solar muestra la trayectoria del sol principalmente desde el amanecer hasta el atardecer para diferentes días del año, típicamente los solsticios y equinoccios. Estas trayectorias se representan en forma de arcos que varían en altura y longitud según la época del año. Estos arcos incluyen marcas para los ángulos de altura (elevación) y azimut (dirección) del sol. La altura se refiere al ángulo del sol sobre el horizonte, mientras que el azimut indica la dirección cardinal desde donde proviene la luz solar. A continuación se presenta la carta solar obtenida para las inmediaciones de la facultad.

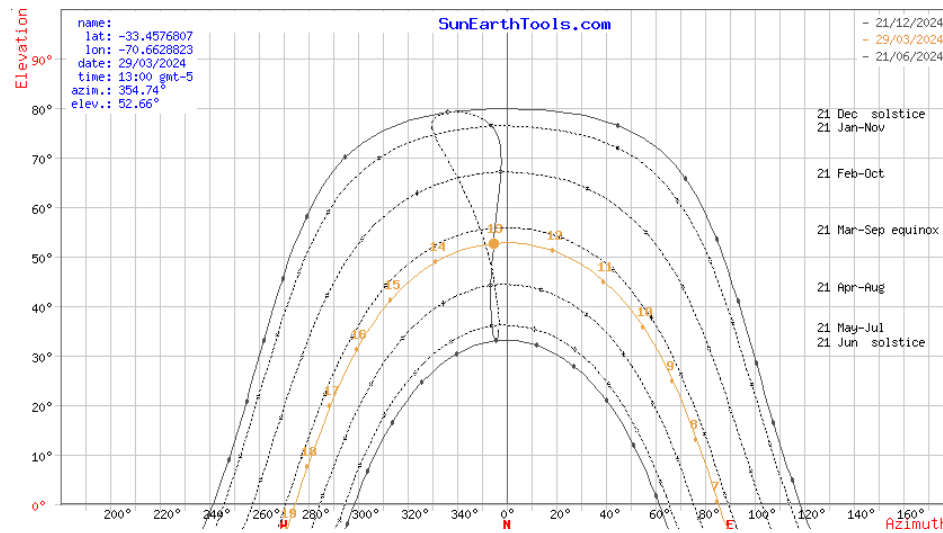


Figura 2.3: Carta solar en las inmediaciones de la FCFM para el año 2024 [10].

## 2.2. Concentración solar

Existen diversos sistemas para la generación de energía solar, entre los cuales se destacan los colectores solares térmicos y los sistemas de concentración solar. Cada uno de estos sistemas tiene sus beneficios y desventajas según las necesidades de diseño y del entorno.

Los colectores solares térmicos aprovechan la energía solar para calentar fluidos, que luego pueden utilizarse para generar electricidad o para aplicaciones térmicas directas. Mientras que, los sistemas de concentración solar utilizan espejos o lentes para concentrar la luz solar en un receptor, donde se genera calor a medias-altas temperaturas, que puede transformarse en energía eléctrica mediante motores térmicos o turbinas. Para este estudio, se seleccionó un sistema de concentración solar con disco parabólico Stirling, debido a su alta eficiencia y la forma en la que concentra los rayos solares [11].

### 2.2.1. Concentrador solar de disco parabólico

Un concentrador solar es un dispositivo diseñado para recolectar y enfocar la radiación solar incidente en un área extensa hacia un área más reducida, donde se ubica un receptor o punto focal. Su objetivo es incrementar la intensidad de la radiación solar en el punto focal, lo que posibilita diversas aplicaciones, desde la generación de electricidad hasta la obtención de calor para usos industriales o sistemas de calefacción.

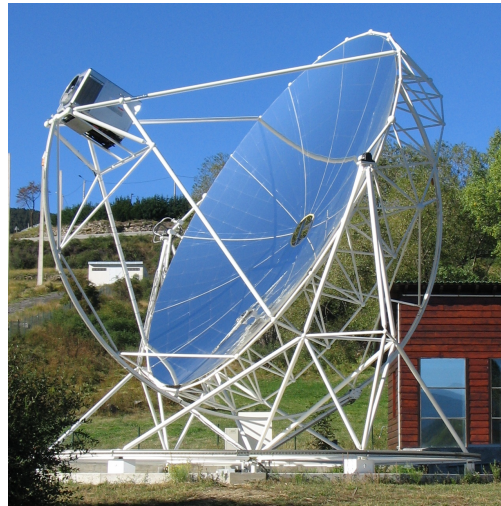


Figura 2.4: Concentrador solar parabólico [12].

En el contexto de concentradores solares parabólicos, estos están compuestos por un reflector con forma de parábola que enfoca la luz solar hacia un punto focal a lo largo del eje de simetría del reflector. En este punto focal se coloca el receptor, que en el caso específico de la tecnología del motor Stirling, puede ser un motor que opera directamente con esta irradiación concentrada o un intercambiador de calor que redirige el calor por medio de tuberías a un motor Stirling indirecto.

Para dimensionar el disco parabólico se debe determinar la apertura máxima  $a$  y el ángulo de borde  $\varphi$  a manera de situar el punto focal a una distancia adecuada  $f$ , ángulo de dispersión  $\delta$  y con un ancho de imagen en el punto focal  $W$ .

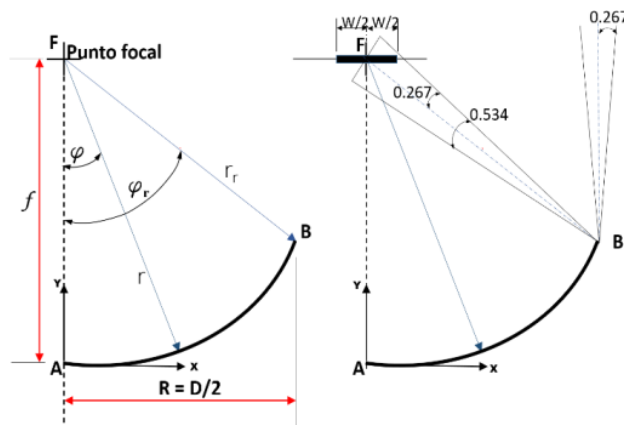


Figura 2.5: Variables geométricas en disco solar parabólico [13].

Algunas ecuaciones necesarias para el cálculo de la parábola:

$$\text{Distancia focal: } f = \frac{a}{4 \cdot \tan\left(\frac{\varphi r}{2}\right)} \quad (2.1)$$

$$\text{Forma parábola: } x^2 = 4 \cdot f \cdot y \quad (2.2)$$

$$\text{Ancho imagen focal: } W = \frac{2 \cdot r_r \cdot \sin\left(0,267 + \frac{\delta}{2}\right)}{\cos\left(0,267\right) + \frac{\delta}{2}} \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Simulación de concentración de rayos solares por software SolTrace

SolTrace es un software de trazado de rayos desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos. Está diseñado específicamente para modelar y simular sistemas de energía solar térmica, particularmente aquellos que utilizan tecnologías de concentración solar, como los sistemas de torre solar y los colectores parabólicos. Este software permite a los ingenieros y científicos analizar el rendimiento óptico de diferentes configuraciones de sistemas solares y optimizar sus diseños.

SolTrace fue desarrollado por el NREL, una institución líder en la investigación y desarrollo de tecnologías de energía renovable. El NREL ha estado a la vanguardia de la innovación en energía solar, proporcionando herramientas y recursos que apoyan la adopción y el avance de tecnologías sostenibles. La creación de SolTrace responde a la necesidad de herramientas precisas y accesibles para el modelado de sistemas solares de concentración, que son esenciales para maximizar la eficiencia y el rendimiento de estos sistemas. El software SolTrace se utiliza principalmente para:

- **Diseño y optimización de sistemas de concentración solar:** Los ingenieros utilizan SolTrace para diseñar y optimizar sistemas solares que concentran la luz del sol en un receptor, donde la energía térmica se convierte en electricidad o se utiliza en procesos industriales. El software ayuda a evaluar la eficiencia óptica y a identificar pérdidas en el sistema, lo que permite realizar ajustes en el diseño para mejorar el rendimiento.
- **Análisis de rendimiento:** SolTrace permite realizar simulaciones detalladas del comportamiento de los sistemas solares bajo diferentes condiciones operativas y ambientales. Esto incluye la evaluación de cómo varían la eficiencia y la producción de energía en función de factores como la orientación de los espejos, la intensidad de la radiación solar y las condiciones meteorológicas.
- **Investigación y desarrollo:** Investigadores y científicos utilizan SolTrace para explorar nuevas tecnologías y materiales que pueden mejorar el rendimiento de los sistemas solares de concentración. El software proporciona una plataforma para experimentar con diferentes configuraciones y evaluar su viabilidad antes de pasar a la etapa de prototipos físicos.
- **Educación y capacitación:** SolTrace también se utiliza en entornos académicos para enseñar a los estudiantes sobre los principios del trazado de rayos y el diseño de sistemas solares de concentración. Proporciona una herramienta interactiva que ayuda a

los estudiantes a comprender cómo los rayos solares se reflejan y se concentran en los receptores.

SolTrace es una herramienta de código abierto, lo que significa que está disponible gratuitamente para el público. Sus características principales incluyen:

- **Interfaz gráfica de usuario (GUI):** Ofrece una interfaz intuitiva que facilita la configuración de modelos y la visualización de resultados.
- **Simulación de trazado de rayos:** Permite realizar simulaciones detalladas del comportamiento de los rayos solares en sistemas de concentración, considerando factores como la reflexión, refracción y absorción.
- **Modelado de componentes:** Los usuarios pueden modelar diferentes componentes del sistema, como espejos, heliostatos, y receptores, con un alto grado de precisión.
- **Resultados visuales y numéricos:** Proporciona resultados tanto en forma de gráficos como de datos numéricos, lo que facilita el análisis y la interpretación de los resultados.

SolTrace es una herramienta esencial en el campo de la energía solar térmica de concentración. Su desarrollo por parte del NREL ha proporcionado a los ingenieros, científicos y educadores una plataforma para el diseño, análisis y optimización de sistemas solares de concentración. Al ser una herramienta de código abierto, también promueve la colaboración y la innovación en la comunidad de energía renovable, contribuyendo al avance de tecnologías sostenibles y eficientes a cualquier interesado.

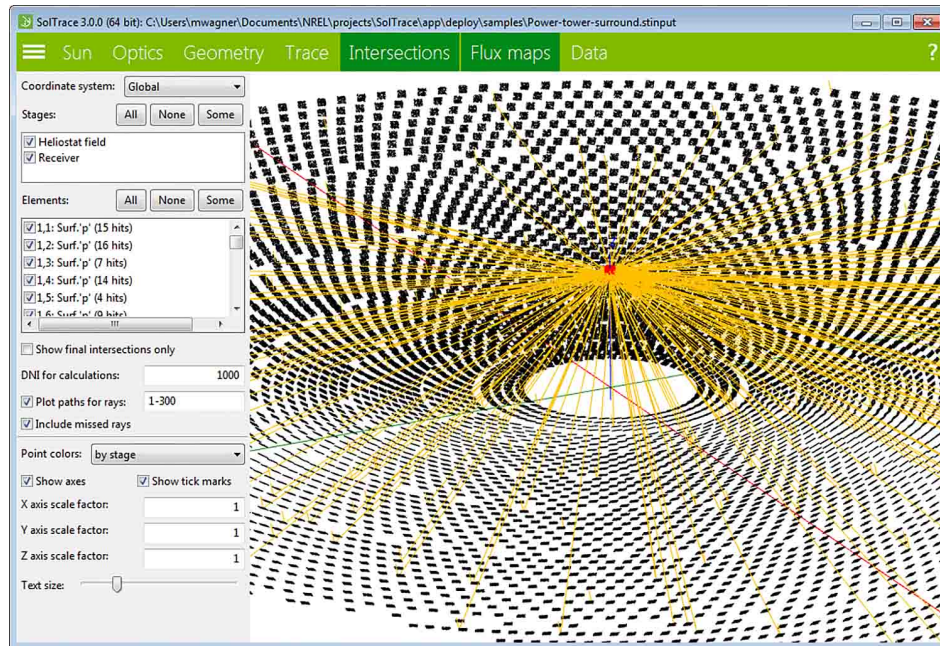


Figura 2.6: Software SolTrace de NREL [14].

## 2.3. Motor Stirling

La historia del Motor Stirling se remonta a 1816, cuando el escocés Robert Stirling lo inventó con el objetivo de crear una alternativa menos peligrosa a la máquina de vapor de la

época. Este dispositivo opera según el principio termodinámico de expansión y contracción de un gas, típicamente aire, helio o hidrógeno. El gas sigue un ciclo de enfriamiento en un foco frío, donde se contrae, y de calentamiento en un foco caliente, donde se expande. La esencia de su funcionamiento radica en la presencia de una diferencia de temperaturas entre estos dos focos, definiéndolo como un motor térmico [15].

A pesar de su antigüedad, el Motor Stirling sigue siendo objeto de investigación, gracias a su versatilidad en la utilización de fuentes de calor [16]. Al requerir solo una fuente de calor y una diferencia de temperatura con la zona fría, puede aprovechar diversas fuentes energéticas como: la energía solar, nuclear, combustión, biomasa y calor geotérmico. Esta adaptabilidad lo ha mantenido relevante en el panorama de la investigación y desarrollo de tecnologías energéticas.

Hoy en día, existen diversos dispositivos que aplican el principio del Motor Stirling, algunos de ellos con aplicaciones en sistemas de generación eléctrica y refrigeración [17]. Lo más destacado es su capacidad teórica para aproximarse, al rendimiento máximo conocido como rendimiento de Carnot. Aunque su potencia es inferior en comparación con otros motores, y su rendimiento óptimo se logra a velocidades bajas, el Motor Stirling sigue siendo considerado la mejor opción en términos de eficiencia para motores térmicos.

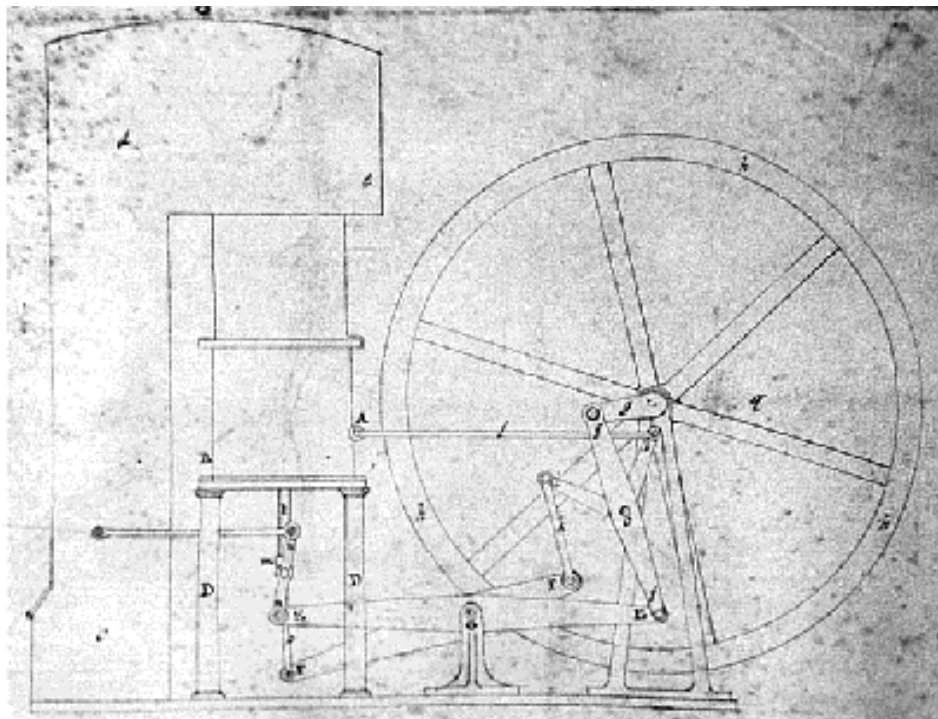


Figura 2.7: Ilustración del motor Stirling realizada por Robert Stirling [18].

### 2.3.1. Ciclo termodinámico

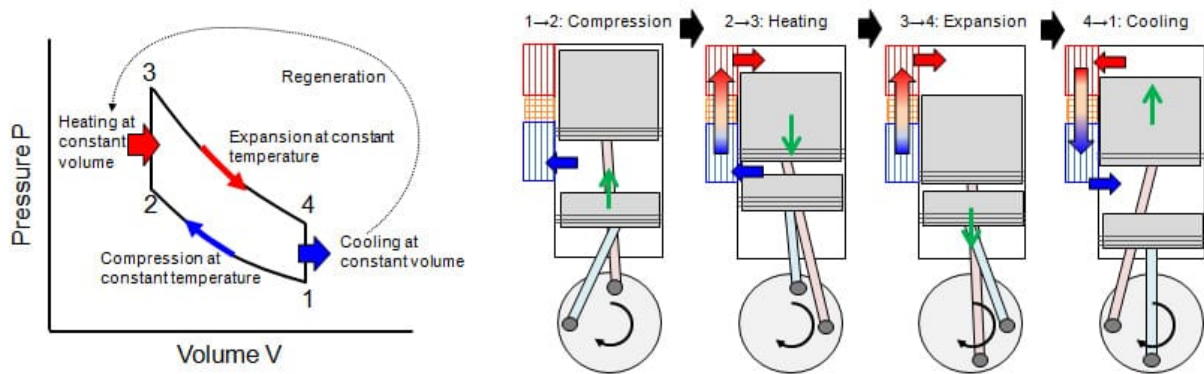


Figura 2.8: Motor Stirling tipo  $\beta$  ilustrando los distintos puntos de los diagramas  $p$ - $V$  y  $T$ - $s$  [19].

Como se ilustra en la figura 2.8, el ciclo Stirling se compone de dos procesos isotérmicos y dos isocóricos. Además, se indican las distintas etapas de un motor tipo  $\beta$  a medida que este realiza los distintos procesos involucrados en el ciclo. Se debe tener en cuenta que la zona superior de la figura 2.8, se produce la entrada de calor por algún tipo de fuente externa, representada por un mallado rojo. Mientras, en la zona inferior tiene lugar la disipación de calor, gracias a una fuente de menor temperatura, representada con un mallado azul. El mallado anaranjado indica la posición del Regenerador [20].

- **Compresión isotérmica (1→2):** El pistón de trabajo es impulsado por la inercia restante del ciclo anterior, moviéndose hacia adentro, comprimiendo y reduciendo el volumen total del gas de trabajo al interior del cilindro, es decir, se realiza trabajo sobre el gas  $W_c$ . Para garantizar que la temperatura del gas no aumenta durante la compresión ocurrida en la zona fría, el calor es retirado por el disipador.
- **Calentamiento isocórico (2→3):** El gas de trabajo a baja temperatura fluye desde la zona fría o espacio de compresión, pasando por el Regenerador, donde recibe calor, y llega a la zona caliente del pistón o espacio de expansión. En esta etapa el segundo pistón, llamado pistón desplazador, se encuentra aproximadamente en posición TDC, manteniendo el volumen total relativamente constante. A medida que el gas de trabajo se acumula en el espacio de expansión, su presión y la del espacio de compresión se vuelven casi iguales. Finalmente, la presión de la zona de caliente supera a la de la zona fría, generando el movimiento del pistón desplazador a su punto BDC.
- **Expansión isotérmica (3→4):** En esta etapa el pistón de trabajo está desplazándose a su punto BDC, esto se traduce en trabajo por expansión desde el gas hacia el pistón de trabajo  $W_e$ . A medida que este se mueve, incrementa el volumen en la zona fría y comienza a disminuir la presión. Durante esta etapa la temperatura de la zona caliente se mantiene gracias a la fuente de calor externa.
- **Enfriamiento isocórico (4→1):** Aquí, el pistón de trabajo se encuentra en posición BDC y permanece aproximadamente quieto. Dado que la presión en la zona fría es menor

gas de trabajo, el gas fluye hacia la zona fría, por lo cual, el calor se entrega desde el gas hacia el Regenerador. Simultáneamente, el pistón desplazador se mueve a su posición TDC, ayudando a que el gas se mueva de la zona caliente a la fría. En esta etapa no se realiza trabajo.

A continuación se muestran algunas ecuaciones principales del ciclo Stirling ideal:

$$\text{Trabajo compresión: } W_c = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (2.4)$$

$$\text{Trabajo expansión: } W_e = n \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (2.5)$$

$$\text{Eficiencia del ciclo: } \eta_{Stirling} = \frac{W_e - W_c}{Q_e} = \frac{T_3 - T_2}{T_3} = \eta_{Carnot} \quad (2.6)$$

### 2.3.2. Componentes de un motor Stirling

Los elementos que componen este tipo de motores se dividen en tres subgrupos: componentes de intercambio de calor, de transmisión mecánica y zonas de trabajo [12].

- **Calentador o “Heater”:** Se le llama así al intercambiador de calor que recibe energía de una fuente a cierta temperatura “caliente” proporcionándole calor al fluido de trabajo contenido en el motor.
- **Enfriador o “Cooler”:** Este elemento es un intercambiador de calor que absorbe energía desde el fluido de trabajo en el motor, cediéndola a una fuente térmica de menor temperatura que el calentador.
- **Regenerador:** La característica esencial de este componente es que permite calentar o enfriar el fluido de trabajo de manera teóricamente reversible. Este elemento actúa como un almacenador térmico, atrapando el calor desde el fluido de trabajo cuando este se desplaza desde el lado caliente al frío, a la vez que lo entrega cuando el fluido va en sentido contrario. Normalmente, el Regenerador está compuesto por una o varias capas de mallas metálicas.
- **Pistones y cilindros:** Normalmente, los motores Stirling están compuestos de dos pistones: uno dirigido a captar el trabajo mecánico del motor y el otro llamado desplazador que tiene el fin de desplazar el fluido de trabajo desde el área en contacto con la fuente caliente a la fría y viceversa. Los cilindros son donde se ubican los pistones, pudiendo estar ambos pistones en el mismo, o en cilindros independientes (ver figura 2.9).
- **Sistema de acoplamiento:** Dependiendo del tipo de motor, se tendrán distintos sistemas de acoplamiento entre ambos pistones y hacia el eje transmisor de la potencia, variando desde bielas hasta acoplamientos por medio de fluidos.
- **Zona de Compresión:** Zona del motor donde el fluido de trabajo se encuentra cuando el volumen total es el mínimo, lo que en general es la sección que sigue al enfriamiento en el “Cooler”. Sin embargo, en algunos casos este espacio es uno solo con el “Cooler”, dependiendo del tipo de motor.

- **Zona de Expansión:** Zona del motor donde el fluido de trabajo se expande después de aumentar su temperatura gracias al “Heater”. Al igual que el espacio de compresión, este espacio puede ser uno solo con el “Heater”.

### 2.3.3. Configuraciones de motores Stirling cinemáticos

Existen tres configuraciones principales de motores Stirling, cada una optimizada para distintas aplicaciones y características de diseño. A continuación, se describen brevemente estas configuraciones:

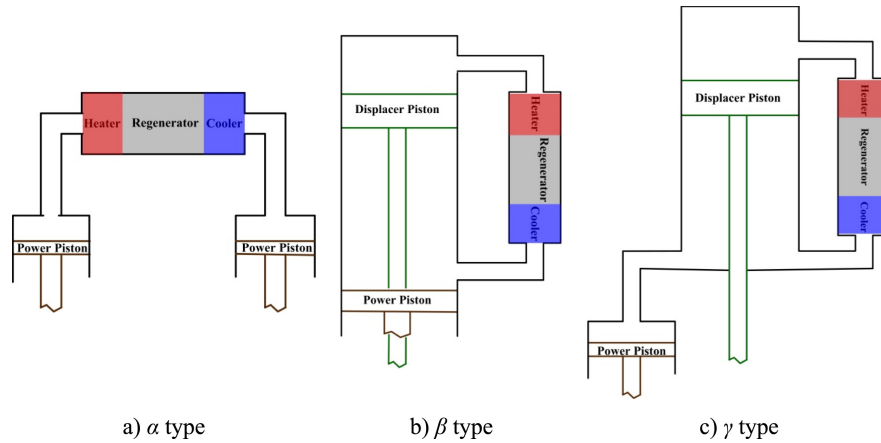


Figura 2.9: Motores Stirling Tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  [16].

- **Alpha ( $\alpha$ ):** En este tipo de configuración los pistones se encuentran separados en dos cilindros diferentes, los cuales están conectados por medio de un Regenerador. Son los de diseño más simple, pero tienen problemas para mantener el fluido de trabajo dentro de los cilindros, debido a que ambos pistones se encuentran expuestos directamente al exterior.
- **Beta ( $\beta$ ):** Este sistema utiliza un arreglo que posibilita la inclusión de ambos pistones dentro del mismo cilindro, utilizando un mismo eje en su movimiento. El problema que supone este tipo de sistema es la complejidad asociada a la coordinación de los movimientos de ambos pistones.
- **Gamma ( $\gamma$ ):** Similar a la configuración  $\beta$  pero con los pistones en cilindros separados. En este tipo de motor, la compresión ocurre también en la conexión existente entre cilindros.

### 2.3.4. Motor Stirling tipo $\beta$ Karabulut

A continuación se presenta un breve resumen de lo que trata el profesor Karabulut en su trabajo sobre motores Stirling tipo  $\beta$  [21]. A continuación, en la figura 2.10 se puede apreciar el motor construido para sus estudios y un diagrama de las principales partes de este.



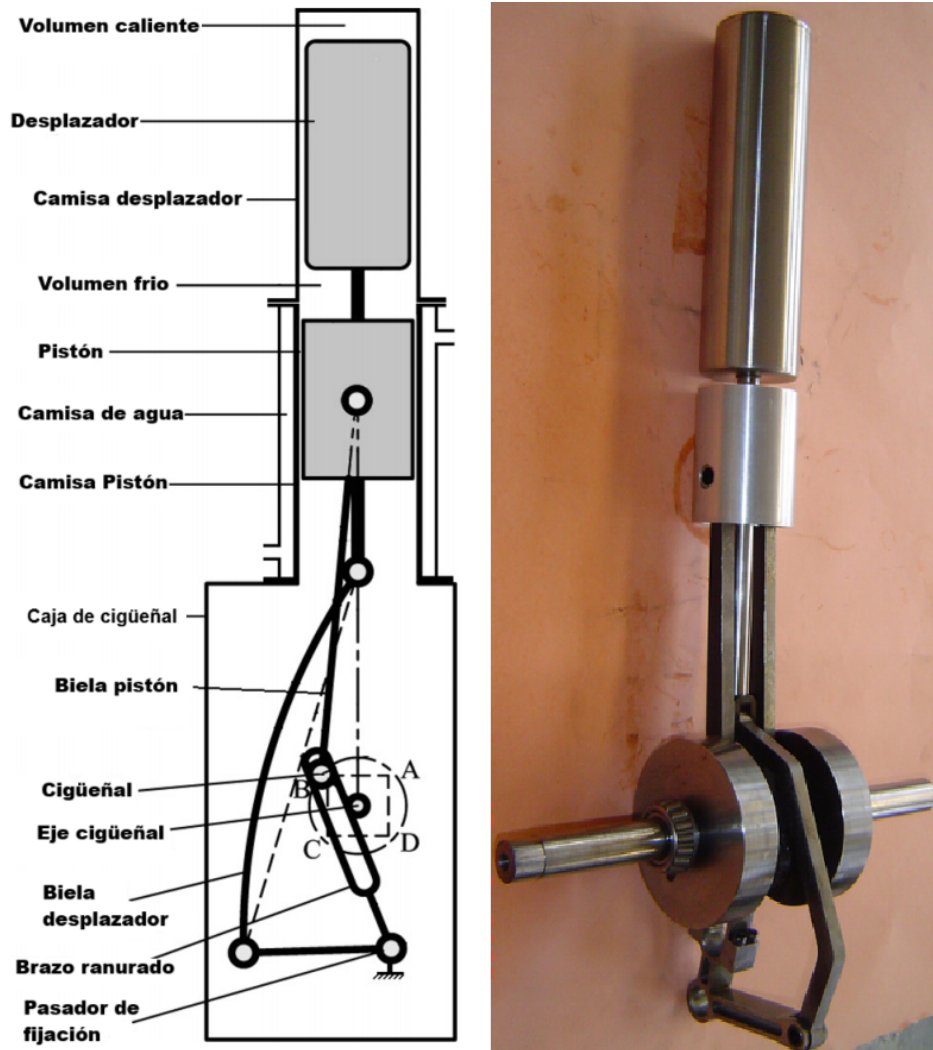


Figura 2.10: Esquema del motor  $\beta$  y fotografía del motor ya construido [21].

El estudio del profesor Karabulut se centró en el diseño, fabricación y prueba de un motor Stirling tipo  $\beta$ . El objetivo principal era desarrollar un motor que pudiera operar eficientemente con fuentes de energía de baja y moderada temperatura (200-500 °C), utilizando aire ambiente y helio como fluidos de trabajo. El diseño del motor apuntaba a una velocidad de operación de 1200 RPM y una potencia de salida de 500 W, orientado a la generación de energía solar a pequeña escala para aplicaciones domésticas.

El motor Stirling tipo  $\beta$  desarrollado en este estudio consta de varias componentes clave:

- **Cilindro del Motor:** El cilindro está dividido en dos secciones conectadas, donde una actúa como revestimiento del pistón y la otra como cilindro del desplazador.
- **Desplazador:** Se fabricaron dos tipos de cilindros de desplazador: uno con superficie interna lisa y otro con ranuras rectangulares para aumentar la transferencia de calor.
- **Control del Desplazador:** El movimiento del desplazador está controlado por una palanca, asegurando una sincronización adecuada con el pistón.
- **Sistema de Enfriamiento:** El sistema de enfriamiento utiliza agua para mantener la temperatura del extremo frío del cilindro del desplazador, lo que es crucial para la

eficiencia del ciclo térmico.

Las pruebas del motor se llevaron a cabo utilizando aire y helio como fluidos de trabajo. El extremo caliente del cilindro del desplazador fue calentado con una llama de LPG, manteniendo una temperatura constante de aproximadamente 200 °C. Se evaluaron diversas condiciones de operación, incluyendo diferentes presiones del fluido de trabajo y velocidades del motor, para determinar el rendimiento óptimo del motor.

Los resultados experimentales indicaron que la potencia máxima de salida del motor fue de 51.93 W a una presión de carga de 2.8 bares y una velocidad del motor de 453 RPM. Este rendimiento se obtuvo utilizando aire como fluido de trabajo. Se observó que el uso de helio como fluido de trabajo podría mejorar significativamente la eficiencia del motor debido a sus mejores propiedades térmicas en comparación con el aire.

El estudio demostró que el motor Stirling tipo  $\beta$  diseñado y fabricado puede operar eficientemente con fuentes de energía de baja y moderada temperatura. Los resultados experimentales sugieren que, con mejoras adicionales en el diseño del desplazador y el sistema de transferencia de calor, el motor podría alcanzar mayores niveles de eficiencia y potencia de salida. Este tipo de motor tiene un gran potencial para aplicaciones en la generación de energía solar a pequeña escala, ofreciendo una alternativa sostenible y eficiente a los sistemas de generación de energía convencionales.

En lo que respecta de utilidad a este trabajo, se extrajeron las especificaciones técnicas del motor y las curvas de potencia obtenidas por Karabulut.

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del motor  $\beta$  [21].

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tipo de motor	$\beta$
Pistón de potencia (Diámetro x Carrera [mm])	70x60
Desplazador (Diámetro x Carrera [mm])	69x79
Fluido de trabajo	Aire
Sistema de enfriado	Agua
Razón de compresión	1.65
Área total de transferencia en el desplazador [cm <sup>2</sup> ]	1705
Máxima potencia del motor	51.93 W (a 453 rpm)

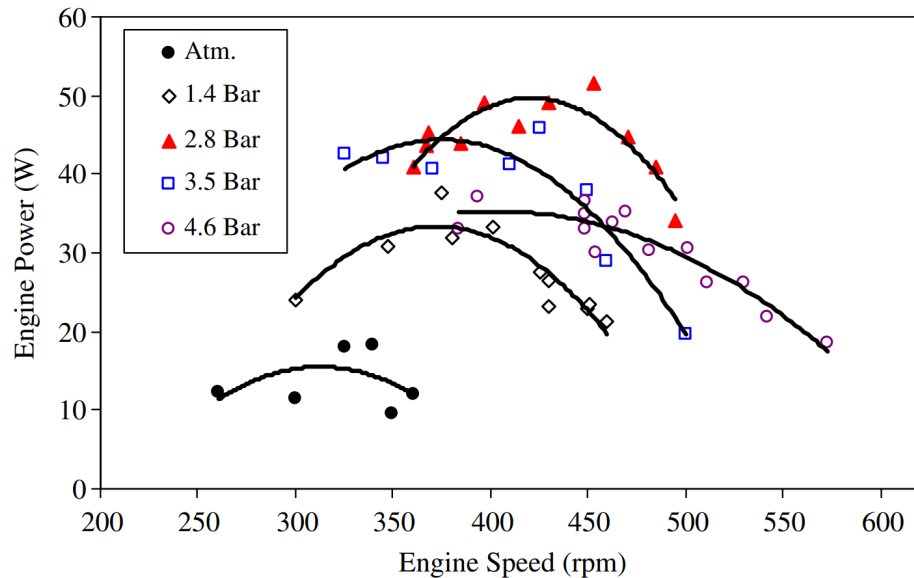


Figura 2.11: Curvas de potencia del motor  $\beta$  [21].

Cabe mencionar que, luego de buscar las dimensiones específicas utilizadas en la manufactura y diseño de este motor, no fue posible encontrarlas incluso al buscar en otras publicaciones y papers del mismo autor. Es por esto que, al generar el diseño del motor, se considerarán los parámetros más relevantes expuestos en la tabla 2.1.

## 2.4. Modelación de motor Stirling

### 2.4.1. Modelos termodinámicos

Para diseñar un motor Stirling se requiere entender lo que sucede dentro de esta máquina, por ello es necesario establecer una serie de suposiciones, que pueden progresar desde las más simples hacia suposiciones cada vez más realistas, dando pie a la existencia de varios modelos matemáticos utilizados para el análisis termodinámico de motores Stirling [22].

- **Primer orden (aproximado):** Los modelos de diseño correspondientes a esta categoría se utilizan para obtener predicciones de la potencia de salida y el rendimiento del motor Stirling. En este caso, el cálculo se realiza con base en un análisis ideal del ciclo, a continuación, se utilizan distintos factores de corrección simples para encontrar la potencia de frenado, eficiencia real e incluir las diversas pérdidas posibles del motor (englobadas en un solo factor general). Estos factores de corrección de eficiencia y potencia se determinan a partir de la experiencia con motores reales. Por lo anterior, los métodos de diseño de primer orden comienzan con información limitada, calculando la potencia y la eficiencia para un motor de tamaño particular. El uso del método de primer orden asume que otros han diseñado o realmente diseñarán el motor Stirling.[23]
- **Segundo orden (desacoplado):** A diferencia del caso anterior, los métodos de diseño de segundo orden tienen en cuenta tanto aspectos termodinámicos como geométricos más detallados, por lo cual, se utilizan ecuaciones diferenciales de estado y energía del sistema analizadas por medio de cálculo numérico, proporcionando un análisis mucho más exhaustivo del motor. Este tipo de modelos a su vez se dividen en: Isotérmicos,

adiabáticos y semi-adiabáticos. La mayor mejora de los modelos de segundo orden, en comparación a los de primer orden, es que las distintas pérdidas de potencia o calor son identificadas y cuantificadas individualmente. Sin embargo, se asume que dichas pérdidas de energía son independientes entre sí y no existe interacción, es decir, están desacopladas.[23]

- **Tercer orden (nodal):** Los métodos de diseño de tercer orden, también conocidos como análisis nodales, consisten en tres procedimientos básicos: Dividir el motor en una red de nodos o volúmenes de control. Para luego, establecer ecuaciones diferenciales para la conservación de masa, momento y energía, más la ecuación de estado para el gas de trabajo. Finalmente, se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales mediante algún método numérico adecuado. Este modelo se puede simplificar desacoplado algunas pérdidas de calor.[23]

## 2.5. Montaje de un concentrador solar Stirling

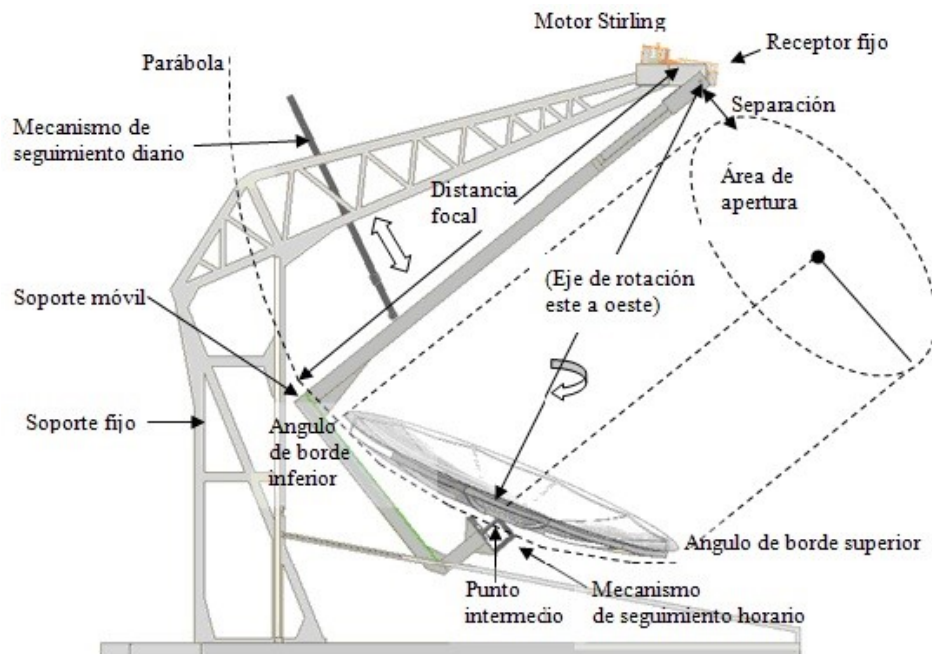


Figura 2.12: Esquema concentrador solar Stirling [24].

Como se puede apreciar en la figura 2.12, un concentrador solar Stirling involucra más partes que solo un motor Stirling y un espejo parabólico. Para su diseño, es crucial considerar una estructura de soporte robusta para el motor Stirling y el espejo parabólico, así como un generador eléctrico y zonas para instrumentación, entre otros componentes. Este enfoque debe facilitar su desmontaje, transporte, manipulación y asegurar la seguridad tanto del cuerpo docente como de los alumnos.

Un concentrador solar Stirling combina tecnología de concentración solar con un motor Stirling para convertir la energía solar en electricidad. Utiliza espejos parabólicos para enfocar la luz solar en un receptor, transfiriendo el calor al motor Stirling. A continuación se describen

las partes del montaje:

- **Estructura de soporte:** Debe ser robusta, capaz de sostener el espejo parabólico y el sistema de seguimiento solar. Esta base debe ubicarse en un lugar con óptima exposición solar.
- **Espejo parabólico:** Concentra la luz solar en un punto focal preciso. El espejo está compuesto por un material reflectante ajustado a una estructura que mantiene su forma parabólica. Es crucial alinear correctamente el espejo para maximizar la eficiencia de la concentración solar.
- **Receptor en el punto focal del espejo parabólico:** Este componente absorbe la energía solar concentrada y la transfiere al motor Stirling. Debe estar firmemente asegurado y diseñado para soportar altas temperaturas.
- **Motor Stirling:** montado el receptor convierte el calor del receptor en energía mecánica. El motor está compuesto generalmente por un cilindro con su respectivo pistón y un desplazador, diseñados para transferir calor de manera eficiente y sincronizar el movimiento de sus componentes.
- **Generador eléctrico:** Dispositivo encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Esta conexión debe ser calculada para mejorar la eficiencia del sistema adecuando las RPM del motor.
- **Sistema de seguimiento solar:** Asegura que el espejo parabólico siempre esté orientado hacia el sol para maximizar la captura de energía. Este sistema puede ser de un eje o de dos ejes y debe ser calibrado adecuadamente.

Para fines docentes, es esencial construir una versión a escala reducida del concentrador solar Stirling. Este modelo permite a los estudiantes comprender los principios de funcionamiento y montaje sin los desafíos logísticos y de costos de un sistema a tamaño completo. El montaje a escala para uso docente sigue los mismos principios que un sistema a tamaño real, pero con componentes más pequeños y manejables. Se utiliza un espejo parabólico pequeño, hecho de materiales más livianos y económicos, como aluminio o plástico con recubrimiento reflectante. Este espejo debe ser montado en una base estable y ligera, permitiendo su fácil ajuste manual para seguir el sol.

El receptor en miniatura se coloca en el punto focal del espejo parabólico y está diseñado para manejar menores cantidades de energía térmica. El motor Stirling pequeño se conecta al receptor y debe ser compacto y eficiente para demostraciones educativas. También se conecta a un generador de baja potencia, suficiente para encender una bombilla o cargar un dispositivo móvil, con el cual regular la carga que se le somete al motor. Debe tener un sistema de seguimiento solar simplificado, manual o semi-automatizado, se configura para permitir a los estudiantes ajustar la posición del espejo parabólico, maximizando así la captación de luz.

Una vez montado el modelo a escala, se realizan demostraciones prácticas que permiten a los estudiantes experimentar con diferentes ángulos de incidencia solar y observar resultados en tiempo real. Esta experiencia práctica facilita la comprensión de conceptos complejos y fomenta el interés en las tecnologías de energía renovable, algo estipulado en el programa del curso ME-5240.

## 2.6. Directrices de dimensionamiento y diseño de la experiencia de laboratorio

En esta sección se tiene como objetivo proporcionar un conjunto de pautas y recomendaciones para la correcta planificación y ejecución de actividades experimentales en entornos educativos y de investigación. Para esto se separa esta sección en dos partes fundamentales.

La primera parte es el dimensionamiento de la experiencia de laboratorio, donde se abordarán los criterios y consideraciones necesarios para determinar las dimensiones óptimas de un laboratorio. Esto incluye el espacio físico, la capacidad de los equipos y la distribución de los recursos. La segunda parte es el diseño de la experiencia de laboratorio, en el que se establecen los requerimientos para obtener un disco parabólico Stirling que cubra temas como: la selección de experiencias, la secuenciación de actividades, la implementación de medidas de seguridad, y el uso de tecnologías y materiales.

Con estas directrices, se busca establecer las bases para la creación de una experiencia de laboratorio con las herramientas necesarias para crear entornos de aprendizaje eficientes, seguros y enriquecedores. Siguiendo las ideas planteadas y expuestas en una, guía sobre el papel de la actividad experimental en la educación científica [25].

### 2.6.1. Dimensionamiento:

Para dimensionar el disco parabólico Stirling, es necesario considerar su uso docente como el principal indicador de tamaño, lo que implica que debe ser transportable y maniobrable. Después de revisar la inmediatez de la facultad, se determinó que el solar en el centro del patio central de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile sería un lugar ideal para realizar las experiencias, debido a la alta exposición a la luz solar que se obtiene allí, sin grandes fuentes de sombra al mediodía durante el verano, primavera, y parcialmente en invierno.

La elección del solar se basó en la observación de que, durante la mayor parte del día, se mantiene libre de sombras durante las horas de máxima irradiación solar, lo que garantiza una irradiación solar continua y eficiente. Además, su ubicación dentro del campus facilita el acceso y la logística para el transporte del equipo necesario para las experiencias.

Considerando estos factores, el disco parabólico Stirling debe ser transportable idealmente sin la necesidad de equipo adicional, como un carrito con ruedas. Para lograr esto, se estableció que el disco parabólico no debe superar 1.5 m de diámetro, permitiendo su manejo por una o dos personas sin dificultad. Asimismo, se determinó que el montaje completo no debe exceder los 25 kg, asegurando que sea lo suficientemente ligero para ser movido con facilidad.

El tamaño final del disco parabólico también dependerá de la potencia al eje del motor Stirling que se diseñe y dimensione. Junto con el profesor guía, se definió que la potencia al eje debería ser similar a la obtenida en otras experiencias de laboratorio de energía, estimando un rango de 5 a 15 Watts. Este rango de potencia es adecuado para los objetivos educativos, proporcionando suficiente energía para realizar demostraciones y experimentos significativos.

Teniendo en cuenta estos valores y los requisitos previamente mencionados, se procederá

a dimensionar el disco parabólico Stirling. La combinación de transportabilidad, tamaño adecuado, modularidad y potencia específica al eje garantizará que el equipo cumpla con los objetivos educativos y sea práctico para su uso en las instalaciones de la facultad.

### **2.6.2. Diseño:**

La modularidad del diseño es crucial para el disco parabólico Stirling. Un diseño modular permitirá desensamblar el equipo en componentes más pequeños, facilitando enormemente su transporte y maniobrabilidad. Esta característica es esencial, especialmente en el ámbito docente, donde la facilidad de montaje y desmontaje puede mejorar significativamente la eficiencia de las clases prácticas y experimentos.

En cuanto a las directrices del diseño del disco parabólico Stirling, es fundamental asegurar que el montaje pueda ser manufacturado prácticamente en su totalidad en el taller de Abate Molina, perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica. Esto debido a que uno de los objetivos principales de este trabajo de título es su finalidad docente, donde la construcción y posterior utilización del montaje se convierte en una experiencia formativa. Siguiendo la línea de otros proyectos previos de memorias de título o trabajos dirigidos, como la reciente “turbina a gas”, desarrollada en colaboración con alumnos como parte de un trabajo dirigido avanzado.

Considerando lo anterior, el montaje del disco parabólico Stirling debe ser relativamente sencillo de manufacturar y operar, además de ser flexible para adaptarse a cambios o disponibilidad de partes y componentes. Esto implica la emisión de múltiples planos y la disponibilidad del archivo CAD con el diseño, permitiendo que los estudiantes que trabajen con él en el futuro puedan llevar a cabo la etapa de manufactura y puesta en marcha de la experiencia. Además, el diseño debe ser instrumentalizable para poder adaptarlo a los sensores seleccionados y disponibles. Se utilizarán componentes industriales comunes y dimensiones estándar, con espesores que permitan su manufactura utilizando tornos, fresadoras y cortadoras CNC 3D y 5D disponibles en el FATLAB. Los materiales seleccionados deben ser soldables mediante métodos convencionales, asegurando que la fabricación sea accesible con los recursos disponibles en los talleres de la facultad.

En términos de seguridad, se implementarán medidas para garantizar un entorno seguro durante la operación y uso del disco parabólico. Esto incluirá el diseño de protecciones adecuadas para prevenir riesgos de quemaduras por la concentración de la luz solar en el receptor, así como el uso de protocolos de seguridad establecidos para el manejo de equipos en el entorno educativo.

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología consistirá en seguir los siguientes pasos:

1. **Realizar una revisión bibliográfica de motores Stirling de baja entalpía:** Este paso implica llevar a cabo una búsqueda de literatura sobre motores Stirling de baja entalpía utilizando bases de datos académicas como: ScienceDirect, Google Scholar y Google en general. Se definirán palabras clave específicas como “motor Stirling”, “baja entalpía” y “eficiencia térmica” para guiar la búsqueda. Luego, se seleccionarán los estudios más relevantes y se realizará un análisis de estos trabajos, enfocándose en sus métodos, resultados y conclusiones, para establecer un marco teórico que sustente la memoria.
2. **Realizar una revisión bibliográfica de concentradores solares, como diseñarlos y dimensionarlos:** Este paso implica buscar y analizar literatura académica sobre concentradores solares. Se buscarán estudios que detallen el diseño y dimensionamiento de concentradores solares. Se definirán palabras clave como “concentradores solares”, “diseño de concentradores”, y “dimensionamiento solar”. Se seleccionarán artículos relevantes que aborden los principios de diseño, materiales utilizados, métodos de dimensionamiento y eficiencia. El análisis de estos estudios proporcionará una base para el diseño y la implementación del concentrador solar de disco parabólico.
3. **Utilizar datos de irradiación solar en las cercanías de la facultad para estimar el recurso disponible:** Este paso implica recolectar datos de irradiación solar específicos de la ubicación de la facultad. Se utilizará el explorador solar como fuente de estos datos. Los datos recolectados incluirán mediciones diarias y estacionales de irradiación solar. Estos datos serán analizados para estimar el recurso solar disponible, lo que permitirá dimensionar adecuadamente.
4. **Con base en el recurso disponible, dimensionar y diseñar el concentrador solar:** Utilizando los datos de irradiación solar recolectados, se procederá a dimensionar y diseñar el concentrador solar. Este paso incluye calcular el área de captación necesaria para maximizar la potencia del motor según el recurso solar disponible. Se seleccionarán materiales adecuados y se determinará la geometría óptima del concentrador. El diseño incluirá planos y especificaciones de construcción, asegurando que el concentrador sea capaz de proporcionar la energía térmica requerida para el funcionamiento del motor Stirling de baja entalpía.



5. **Con el concentrador solar dimensionado, diseñar un motor Stirling adecuado:** Basado en el diseño del concentrador solar, se procederá a diseñar un motor Stirling que sea compatible con la energía térmica generada. Este paso implica seleccionar el tipo de motor Stirling, en este caso, un motor tipo  $\beta$ , y calcular sus parámetros de diseño, como el volumen de los cilindros, el tamaño de los pistones y el desplazamiento. Se considerarán materiales y métodos de construcción. El diseño incluirá planos técnicos detallados y especificaciones que aseguren que el motor pueda operar con el calor suministrado por el concentrador solar.
6. **Calcular los resultados teóricos esperados, considerando diferentes irradiancias solares:** Este paso implica utilizar modelos matemáticos para predecir el rendimiento del motor Stirling bajo distintas condiciones de irradiancia solar. Se aplicarán ecuaciones termodinámicas para calcular la eficiencia y la potencia de salida del motor en función de la irradiancia. Estos cálculos ayudarán a anticipar el comportamiento del sistema y a identificar las condiciones óptimas de operación. Los resultados teóricos se compararán posteriormente con los datos experimentales para validar el diseño y la metodología.
7. **Crear un diseño del montaje de concentrador solar Stirling para uso docente, considerando criterios de manufactura e instrumentación:** El diseño del montaje incluirá un esquema detallado donde se integren el concentrador solar y el motor Stirling, asegurando accesibilidad y seguridad para fines docentes. Se seleccionarán materiales y técnicas de manufactura que faciliten la construcción. El montaje considerará la facilidad de ensamblaje y des-ensamblaje para su uso en prácticas docentes. La instrumentación incluirá sensores de temperatura, irradiancia y RPM, todos conectados a un sistema de adquisición de datos para monitorizar y analizar el rendimiento del sistema en tiempo real, permitiendo una experiencia docente completa y práctica.
8. **Generar directrices de instrumentalización y una guía de laboratorio:** Esto con el objetivo de clarificar los puntos de interés necesarios para obtener las curvas características del motor y la eficiencia global en trabajos futuros, así como proporcionar una guía de la experiencia de laboratorio al tener el concentrador solar Stirling construido.

# Capítulo 4

## Descripción de modelo termodinámico

### 4.1. Modelos implementados por Urieli

A continuación, se desarrollarán los 3 modelos que incluye el modelo numérico desarrollado por Urieli y sus ecuaciones fundamentales. La información para recabar estos resúmenes de los modelos fue obtenida, parafraseada y modificada de las siguientes fuentes expuestas [26], [12] y [22].

#### 4.1.1. Modelo isotérmico ideal

Gustav Schmidt publicó en 1871 uno de los primeros análisis del ciclo Stirling, en el cual, mediante ecuaciones analíticas, representa un ciclo Stirling ideal. Por lo tanto, este análisis solo sirve como una primera aproximación al rendimiento de un motor de este tipo.

Los principales supuestos de este modelo son los siguientes:

1. Todas las etapas se comportan de forma ideal: son reversibles, no existen fugas del fluido de trabajo ni pérdidas de carga, el gas se comporta de manera ideal, el proceso de regeneración es perfecto y no existen gradientes de temperatura en los intercambiadores de calor (intercambio perfecto).
2. La velocidad de la máquina es constante y los procesos tienen un comportamiento estacionario.
3. La variación del volumen en los espacios de trabajo es sinusoidal.
4. El pistón de potencia y su cilindro tienen una temperatura constante.
5. La temperatura en el *Heater* y el espacio de expansión es constante a  $T_h$ .
6. La temperatura en el *Cooler* y el espacio de compresión es constante a  $T_k$ .
7. La temperatura en el Regenerador y los espacios muertos es constante a  $T_d$ .

Con estos lineamientos se puede obtener una expresión del cambio en la presión del gas en función de las variaciones volumétricas y las temperaturas impuestas. A partir de aquí se puede estimar la potencia de salida del motor modelado. Cabe destacar que, aunque este modelo no proporciona una solución realista, permite comparar rendimientos entre diferentes modelos.

El modelo se compone de cinco secciones interconectadas, como se muestra en la figura 4.1: espacio de compresión  $c$ , Cooler  $k$ , Regenerador  $r$ , Heater  $h$  y espacio de expansión  $e$ , con las temperaturas expresadas en los supuestos del modelo.

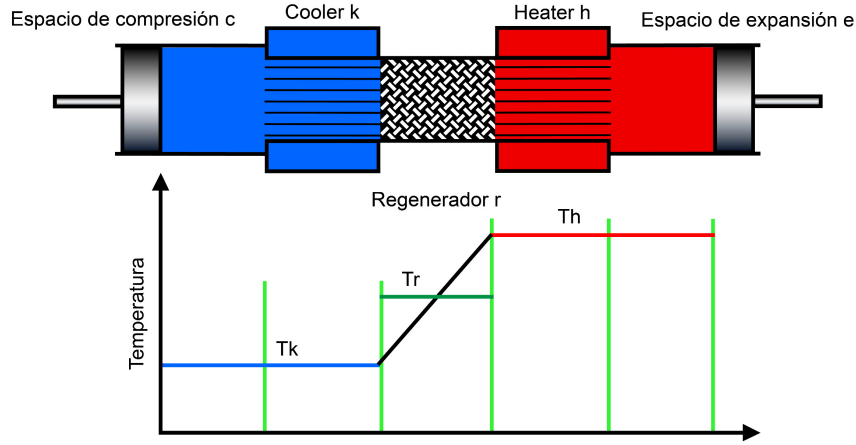


Figura 4.1: Modelo Isotérmico [26].

Resumiendo las ecuaciones para un sistema isotérmico ideal son las siguientes:

**Presión:**

$$p = \frac{MR}{\frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h}} \quad (4.1)$$

Donde la temperatura media efectiva del Regenerador se escribe según la diferencia logarítmica de temperatura  $T_r = \frac{T_h - T_k}{\ln(T_h - T_k)}$ .

**Calor transferido:**

$$Q_e = W_e = \oint p \left( \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta \quad (4.2)$$

$$Q_c = W_c = \oint p \left( \frac{dV_c}{d\theta} \right) d\theta \quad (4.3)$$

**Trabajo total:**

$$W = W_e + W_c \quad (4.4)$$

**Eficiencia:**

$$\eta = \frac{W}{Q_e} \quad (4.5)$$

## 4.1.2. Modelo adiabático

Un modelo más cercano a la realidad que el isotérmico asume que las paredes del espacio de compresión, expansión y Regenerador son adiabáticos, por lo que todo el intercambio térmico ocurre en el *Heater* y el *Cooler*. Se asume que el Regenerador funciona de manera perfecta y que los gases, una vez que salen de los intercambiadores de calor hacia los volúmenes de trabajo, lo hacen con la temperatura de los primeros.

Una vez dentro de los espacios de trabajo, al ser estos adiabáticos, la temperatura se ve necesariamente modificada con el cambio de volumen y presión. El modelo adiabático, debido a su configuración, no tiene una solución analítica.

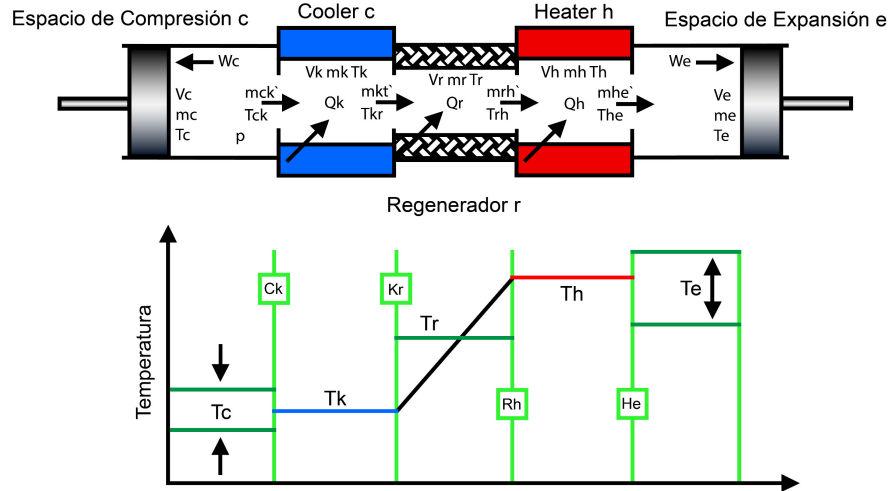


Figura 4.2: Modelo adiabático [26].

Este modelo divide el motor en cinco subsistemas: volumen de espacio de expansión y compresión, Regenerador, *Cooler* y *Heater*. Todos ellos interactúan mediante su temperatura y flujo másico, como se muestra en la figura 4.2, manteniéndose una presión constante en todo el sistema. Cabe destacar que las temperaturas en los intercambiadores de calor se asumen constantes.

En las ecuaciones del modelo numérico, descritas a continuación, cada término se identifica según subíndices con la letra relativa al subsistema. En variables que involucren más de un subsistema se utilizan los subíndices de ambas secciones según la dirección de su flujo. Por ejemplo, la temperatura en la interfaz Regenerador-*Heater* con flujo en dirección al *Heater* se escribirá  $T_{rh}$  y  $T_{hr}$  en caso contrario.

La energía que fluye por los subsistemas se define en términos del flujo másico por ángulo del ciclo desde la sección  $i$  a la sección contigua  $j$  ( $m'_{ij} = \frac{dm_{ij}}{d\theta}$ ), donde la dirección del flujo se impone de forma positiva desde el espacio de compresión al de expansión. El trabajo realizado se calcula según la variación volumétrica de los espacios de trabajo generada por el intercambio de calor en el sistema. Este modelo, al igual que el isotérmico, supone un comportamiento del gas como ideal y no toma en cuenta pérdidas de carga en el fluido, ni la pérdida de masa por concepto de fugas del fluido de trabajo. A continuación, se resumen las principales ecuaciones utilizadas en el modelo. Para un desarrollo más extenso, ver los trabajos: [26], [12] y [22].

**Presión:**

$$p = \frac{MR}{\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e}} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{-\gamma p \left( \frac{\partial V_c}{T_{ck}} + \frac{\partial V_e}{T_{he}} \right)}{\frac{V_c}{T_{ck}} + \gamma \left( \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} \right) + \frac{V_e}{T_{he}}} \quad (4.7)$$

**Masa en el sistema:**

Para  $i = \{h, k, r, e, c\}$ ,  $j = \{h, k, r\}$ .

$$m_i = p \frac{V_i}{RT_i} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial m_j}{\partial \theta} = \frac{m_j \frac{\partial p}{\partial \theta}}{p} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial m_e}{\partial \theta} = \frac{p \frac{\partial V_e}{\partial \theta} + \frac{V_e \frac{\partial p}{\partial \theta}}{\gamma}}{RT_{eh}} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial m_c}{\partial \theta} = \frac{p \frac{\partial V_c}{\partial \theta} + \frac{V_c \frac{\partial p}{\partial \theta}}{\gamma}}{RT_{ck}} \quad (4.11)$$

**Flujo másico:**

$$m'_{ck} = -\frac{\partial m_c}{\partial \theta} \quad (4.12)$$

$$m'_{kr} = m'_{ck} - \frac{\partial m_k}{\partial \theta} \quad (4.13)$$

$$m'_{he} = -\frac{\partial m_e}{\partial \theta} \quad (4.14)$$

$$m'_{rh} = m'_{he} - \frac{\partial m_h}{\partial \theta} \quad (4.15)$$

**Temperaturas:**

$$\frac{\partial T_c}{\partial \theta} = T_c \left( \frac{\frac{\partial p}{\partial \theta}}{p} + \frac{\frac{\partial V_c}{\partial \theta}}{V_c} - \frac{\frac{\partial m_c}{\partial \theta}}{m_c} \right) \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial \theta} = T_e \left( \frac{\frac{\partial p}{\partial \theta}}{p} + \frac{\frac{\partial V_e}{\partial \theta}}{V_e} - \frac{\frac{\partial m_e}{\partial \theta}}{m_e} \right) \quad (4.17)$$

**Flujos de calor:**

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta} = \frac{V_k \frac{\partial p}{\partial \theta} c_v}{R} - c_p (T_{ck} m'_{ck} - T_{kr} m'_{kr}) \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial Q_r}{\partial \theta} = \frac{V_r \frac{\partial p}{\partial \theta} c_v}{R} - c_p (T_{kr} m'_{kr} - T_{rh} m'_{rh}) \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial Q_h}{\partial \theta} = \frac{V_h \frac{\partial p}{\partial \theta} c_v}{R} - c_p (T_{rh} m'_{rh} - T_{he} m'_{he}) \quad (4.20)$$

**Trabajo realizado:**

$$W = W_c + W_e \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} + \frac{\partial W_e}{\partial \theta} \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial W_e}{\partial \theta} = p \frac{\partial V_c}{\partial \theta} \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial W_e}{\partial \theta} = p \frac{\partial V_e}{\partial \theta} \quad (4.24)$$

**Eficiencia:**

$$\eta = \frac{W}{Q_e} \quad (4.25)$$

Considerando entonces el conjunto de ecuaciones anterior y la no linealidad del problema, este se resuelve de forma numérica como sigue:

- La configuración geométrica del motor define los volúmenes de los espacios de trabajo y los intercambiadores de calor (ICs), en función de la posición angular del ciclo Stirling.
- El fluido de trabajo utilizado define su caracterización ( $R$ ,  $c_p$ ,  $c_v$  y  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ ).
- Las temperaturas de los ICs se definen por las condiciones de operación, con  $T_r = \frac{(T_h - T_k)}{\ln(T_h/T_k)}$  como temperatura media efectiva del Regenerador.
- La masa del gas se obtiene desde el modelo de Schmidt, según la presión y temperatura de ingreso al sistema.

Para resolver el conjunto de ecuaciones, se trata al sistema con un flujo másico estacionario (cuasi-estacionario) para un intervalo  $d\theta$  del ciclo, desde donde, a partir de las condiciones iniciales del ciclo, se integran las ecuaciones descritas para todo el ciclo, teniendo como condición que la última solución debe igualar a la primera para la continuidad del proceso.

### 4.1.3. Modelo simplificado

Para un análisis más detallado, Urieli [26] introdujo correcciones al modelo adiabático, obteniendo una mayor precisión en la evaluación de la transferencia de calor. En este enfoque, los intercambiadores de calor se modelan como equipos no ideales, considerando que la temperatura del gas de trabajo dentro del intercambiador difiere de la temperatura de la

pared con la que está en contacto (pared que extrae o cede calor al fluido). Adicionalmente, se incorporan las pérdidas de calor en el Regenerador debido a posibles fugas en la pared, y las pérdidas por fricción asociadas al funcionamiento del motor.

#### 4.1.3.1. Análisis del Regenerador

El Regenerador es un componente que opera de manera cíclica y facilita la transferencia de calor entre fluidos calientes y fríos. Durante la fase inicial, el fluido caliente ingresa al Regenerador, moviéndose desde la zona caliente hacia la zona fría. A medida que atraviesa el Regenerador, transfiere una parte de su energía térmica al Regenerador, el cual la almacena. Posteriormente, el calor almacenado se libera al gas frío que fluye en la dirección opuesta, desde el Enfriador hacia el Calentador. En un análisis de estado estacionario, la transferencia neta de calor por ciclo es cero.

Basándose en estos principios, la eficiencia del Regenerador se define como la relación entre la cantidad de calor transferida desde el gas caliente al Regenerador durante un “paso único” y la cantidad equivalente de calor transferida al Regenerador en un modelo adiabático.

Para evaluar la eficiencia del Regenerador, se emplean perfiles de temperaturas lineales, como se ilustra en la Figura 4.3. La figura muestra las corrientes de gas caliente y frío que fluyen a través del componente.  $T_h$  y  $T_k$  representan las temperaturas medias efectivas del gas en los espacios del Calentador y del Enfriador, respectivamente.  $T_{h1}$  y  $T_{h2}$  corresponden a las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo cuando se desplaza desde el Calentador hacia el Enfriador, mientras que  $T_{k2}$  y  $T_{k1}$  simbolizan la temperatura de entrada y salida del fluido cuando se mueve desde el Enfriador al Calentador.

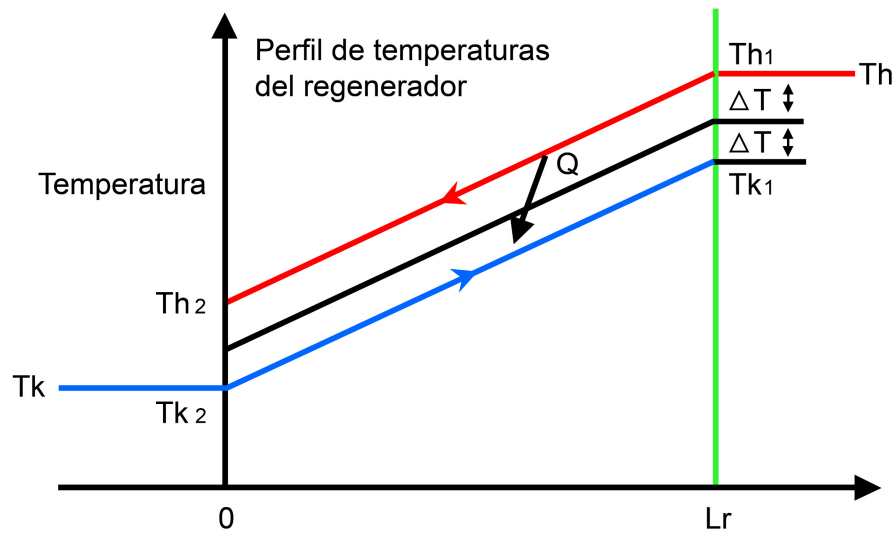


Figura 4.3: Análisis simple del Regenerador [26].

Así, basándose en la figura 4.3 y las definiciones antes mencionadas sobre la eficiencia para el Regenerador de un motor Stirling, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{k2}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{h2} - T_{k2}}{T_{h1} - T_{h2}}} \quad (4.26)$$

Ahora, asumiendo que el calor  $\dot{Q}_r$  extraído del gas de trabajo caliente, a medida que cruza por el Regenerador, es igual al que se transfiere hacia dicho equipo y, posteriormente, es devuelto al flujo frío. Se tiene que:

$$\dot{Q}_r = c_p \dot{m} (T_{h1} - T_{h2}) = 2hA_{wg} \frac{T_{h2} - T_{k2}}{2} \quad (4.27)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor general (corriente caliente  $\rightarrow$  matriz  $\rightarrow$  corriente fría),  $A_{wg}$  se refiere al área mojada del Regenerador,  $c_p$  el calor específico a presión constante, y  $\dot{m}$  el caudal másico que se mueve a través del Regenerador. Así obteniendo la expresión:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{c_p \dot{m}}{hA_{wg}}} \quad (4.28)$$

Considerando que el número de unidades de transferencia (NTU).

$$NTU = \frac{hA_{wg}}{c_p \dot{m}} \quad (4.29)$$

La eficiencia descrita en la ecuación 4.26 se puede mostrar de forma acotada como:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (4.30)$$

Así, la pérdida de calor por intercambiador no ideal se estima como se señala en la ecuación 4.31, donde  $Q_{r_{max}}$  y  $Q_{r_{min}}$  corresponden al máximo y mínimo calor transferido al intercambiador durante el ciclo.

$$Q_{r_{pérdida}} = \varepsilon (Q_{r_{max}} - Q_{r_{min}}) \quad (4.31)$$

La fuga de calor a través de la pared se representa como se señala a continuación, donde  $K_R$  corresponde a la conductancia térmica de la pared del Regenerador, mientras que  $T_{wh}$  y  $T_{wk}$  corresponden a las temperaturas de la pared del Calentador y Enfriador, respectivamente.

$$Q_{r_{fuga}} = K_R (T_{wh} - T_{wk}) \quad (4.32)$$



#### 4.1.3.2. Análisis intercambiadores de calor

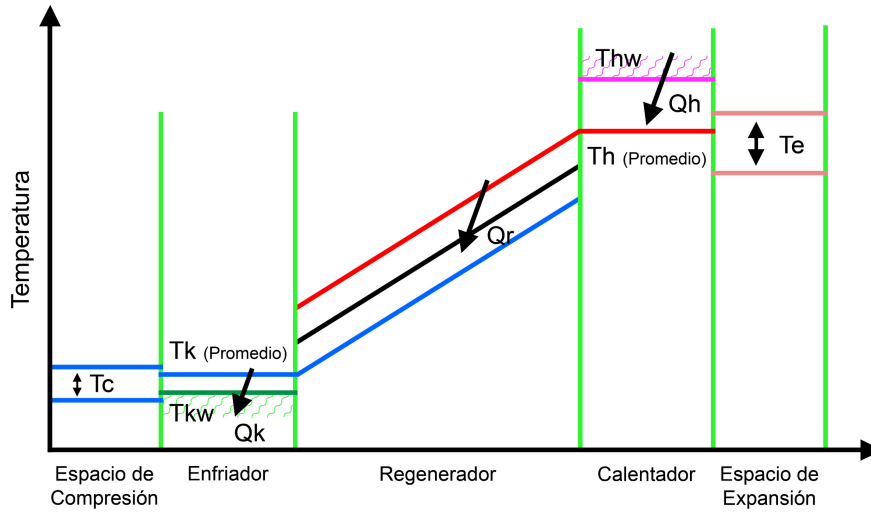


Figura 4.4: Análisis simple de los intercambiadores de calor [26].

Como se observa en la figura 4.4, considerar los intercambiadores de calor como equipos no ideales conduce a una temperatura del gas caliente  $T_h$  más baja que la temperatura de la pared del Calentador  $T_{hw}$  y, de manera similar, a una temperatura del gas frío  $T_k$  mayor que la pared del Enfriador  $T_{wk}$ .

En consecuencia, se obtienen expresiones que relacionan la temperatura del gas y la temperatura de la pared del intercambiador respectivo. Estas ecuaciones se resuelven de forma iterativa utilizando los valores de  $Q_h$  y  $Q_k$  que se obtienen mediante el análisis adiabático ideal. Es relevante destacar que en esta iteración no se consideran las pérdidas asociadas a ningún equipo. Así, para el Calentador se tiene:

$$T_h = T_{wk} - \frac{Q_h N}{h_h A_w g_h} \quad (4.33)$$

En cambio, para el Enfriador:

$$T_k = T_{wk} - \frac{Q_k N}{h_k A_w g_k} \quad (4.34)$$

Donde el subíndice  $h$  corresponde al Calentador y  $k$  al Enfriador. Además,  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $A_{wg}$  simboliza el área mojada del intercambiador de calor y  $N$  es la frecuencia de operación del motor.

#### 4.1.4. Consideraciones para la modelación

##### Fluido de trabajo:

Al ser un sistema de ciclo cerrado, se pueden utilizar distintos gases como fluido de trabajo. Antiguamente, este tipo de motores utilizaba aire como fluido de trabajo, aunque actualmente se prefieren fluidos que cumplan con las siguientes características:

- Alto calor específico.

- Alta conductividad térmica.
- Baja viscosidad.
- Baja densidad.

Entre los fluidos utilizados se encuentran el  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , aire, helio, hidrógeno y vapor de agua. Entre ellos, el helio y el hidrógeno son los más interesantes respecto a las características antes señaladas. El aire es ampliamente utilizado por su disponibilidad y bajo costo, es por esto que será utilizado como gas de trabajo.

### **Presión interna de cámara:**

Debido a que la relación de compresión lograda por el motor no depende del aumento en la presión media, un incremento en esta última amplía el rango de presiones mínimas y máximas alcanzadas por el gas, lo cual resulta en un aumento del trabajo neto realizado por ciclo.

La literatura experimental de manera consistente muestra cómo la presión influye positivamente en el aumento de la potencia y la eficiencia, especialmente en motores de alta potencia que operan a presiones elevadas [21].

Es crucial destacar que el aumento en el trabajo neto disminuirá si la presión media del sistema difiere de la presión externa del pistón de potencia, dado que el trabajo realizado por ciclo será mayor en ese caso. Para contrarrestar este efecto, se iguala la presión externa del pistón mediante una cámara sellada que mantiene una presión, denominada presión de amortiguación, similar a la presión media del sistema.

Además, incrementar la diferencia de temperatura no solo aumenta la eficiencia máxima teórica posible, sino que también incrementa el área entre las isothermas de las etapas 1-2 y 3-4 del ciclo termodinámico. Esto implica una mayor cantidad de energía introducida al sistema en forma de un aumento en el área de trabajo por ciclo.

### **Temperatura de fuentes fría y caliente:**

Para efectos de la modelación, se supondrá que las temperaturas de la fuente fría y caliente son constantes y que el motor funciona de manera estacionaria. Se generarán diferentes casos de modelación considerando temperaturas de operación esperadas, por ejemplo, manteniendo la fuente fría por debajo de los  $100\text{ }^\circ\text{C}$  y la fuente caliente por encima de los  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , dependiendo del diseño y dimensionamiento del disco parabólico Stirling. Los coeficientes de transferencia de calor se considerarán constantes y serán los mismos utilizados en la memoria referenciada [22].

### **Intercambio de calor:**

Diseñar y modelar un intercambiador de calor es una tarea compleja, que incluso el profesor Urieli simplificó para obtener resultados. Se asume fuertemente que el intercambio de calor es similar al modelado en la memoria [22], donde se consideraron intercambiadores de calor tipo aletas sumergidos en agua tanto para la fuente fría como para la caliente. Sin embargo, esto difiere de lo esperado en un concentrador solar Stirling, especialmente en la interacción directa requerida con la camisa del desplazador para transferir calor por radiación al metal.

En cuanto a la fuente fría, podría modificarse para incorporar una camisa de agua con aletas como se describe en la memoria [22], pero para este trabajo se simplificará utilizando aletas e intercambio de calor con el aire ambiente.

Aunque estas suposiciones pueden estar alejadas de la realidad, representan una limitación al modelar un sistema complejo. Por lo tanto, se considerarán coeficientes de sobredimensionamiento y casos desfavorables en cuanto a las temperaturas de las fuentes, los cuales dependen del tipo de intercambiadores de calor utilizados y su capacidad para transferir calor.

## 4.2. Algoritmo

La modelación de segundo orden se realiza utilizando MATLAB R2020b, una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. A través de esta herramienta se lleva a cabo un análisis del modelo simplificado, como se ha descrito anteriormente. Este modelo es una adaptación realizada por el mismo profesor Urieli de su tesis de doctorado, y se puede obtener más información sobre el mismo en [26]. La modelación se fundamenta en varios scripts que trabajan en conjunto, siendo el programa principal denominado “**sae.m**”. El algoritmo utilizado para resolver el modelo se muestra en la figura 4.5, donde se destacan en color rojo los scripts más relevantes y su función específica.

El uso de MATLAB permite realizar cálculos complejos y análisis detallados que son fundamentales para entender el comportamiento del sistema modelado. Esta herramienta computacional facilita la implementación y ejecución del modelo simplificado, proporcionando resultados como curvas características, entre otros. Los cuales son cruciales para la toma de decisiones en el diseño y dimensionamiento del disco parabólico Stirling.

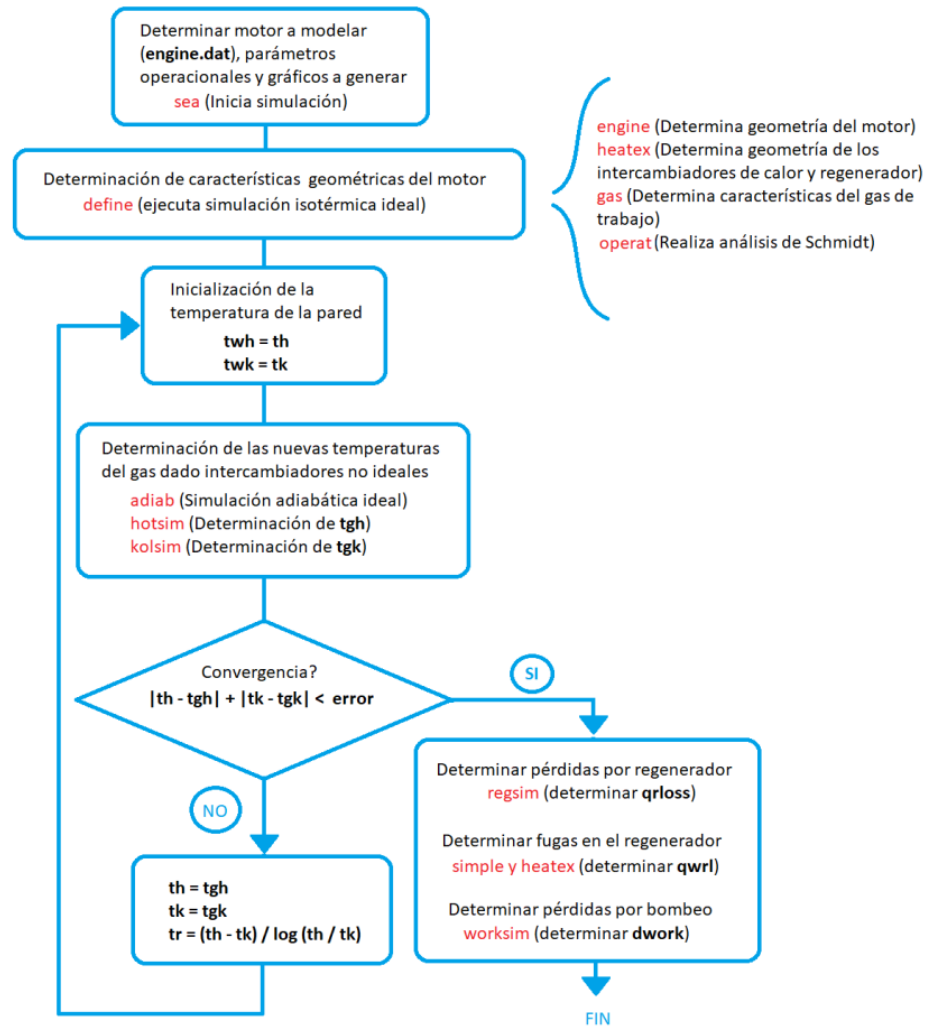


Figura 4.5: Diagrama algoritmo utilizado por el modelo numérico de Urieli [22].

### 4.3. Validación

La simulación del motor Stirling se realiza utilizando archivos en formato “.dat” que contienen la información geométrica específica de cada prototipo. Estos archivos son llamados por el script “sae.m” durante su ejecución, como se detalla en el Anexo C.1. Para validar el prototipo, se lleva a cabo una simulación utilizando aire a una presión estándar de 101325 Pa, con un sumidero frío a 27 °C y una fuente de calor a 200 °C. La simulación se realiza considerando una eficiencia mecánica del 100 %. El objetivo principal es comparar la potencia de salida obtenida con la que se reporta en la figura 2.11.

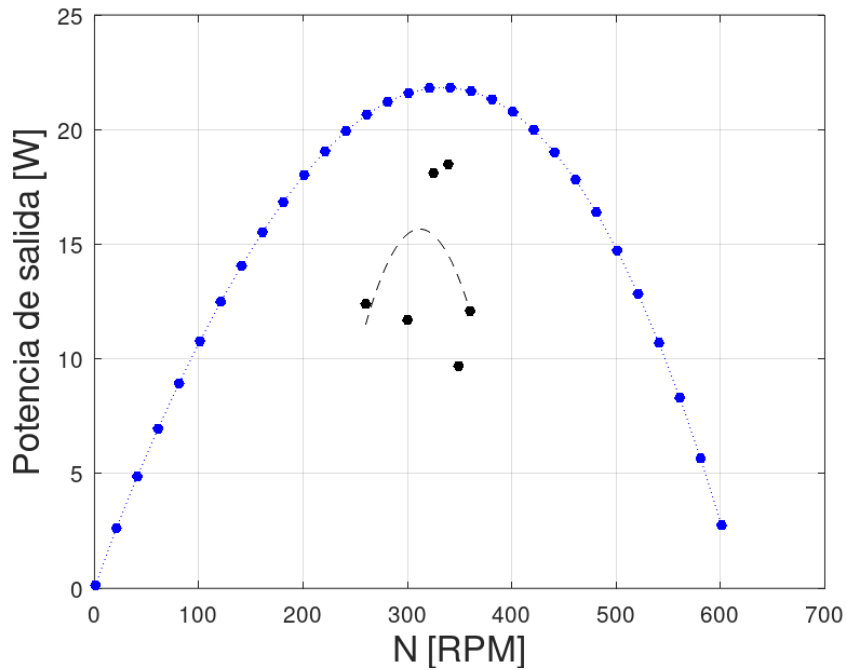


Figura 4.6: En azul curva de potencia de salida v/s velocidad resultante de la simulación del motor  $\beta$  original, utilizando el modelo simple de Urieli. En negro curva obtenida por Karabulut [21].

La figura 4.6 muestra la curva de potencia obtenida luego de correr la simulación, donde se observa que el motor alcanza su máxima potencia alrededor de las 330 RPM, generando aproximadamente 22 W. El resultado es consistente en forma y rango de potencias, con la curva de potencia mostrada en la figura 2.11, lo que indica que la simulación realizada se ajusta a los resultados obtenidos por Karabulut [21], con un error aproximado bajo las condiciones modeladas cercanas al 20%, justificable por pérdidas por roce y otras pérdidas esperables por ser resultados de laboratorio y no una simulación.

#### 4.4. Escalamiento del motor $\beta$ de Karabulut

Después de validar el modelo numérico desarrollado por el profesor Urieli y obtener resultados similares a los obtenidos experimentalmente por el profesor Karabulut, se procedió a escalar las dimensiones del motor  $\beta$ . Esto fue necesario porque con las dimensiones originales, el motor produciría una potencia demasiado alta en comparación con los requisitos de potencia objetivo para su montaje experimental en el laboratorio de máquinas. Además, las dimensiones originales del motor son muy grandes, lo que dificultaría su transporte por parte de alumnos o asistentes de laboratorio.

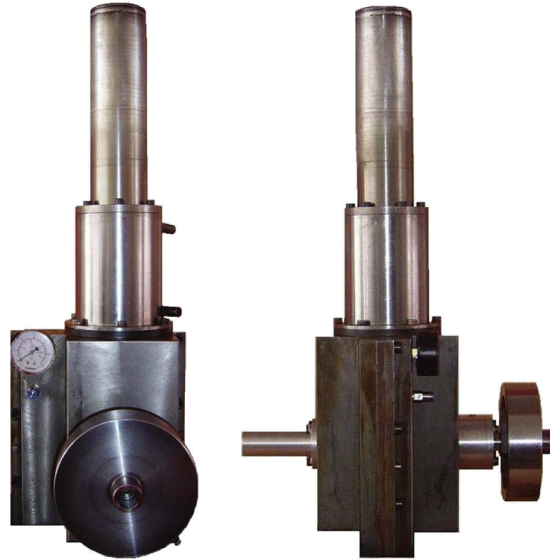


Figura 4.7: Fotografía del motor Stirling desarrollado por Karabulut [27].

De lo que se pudo rescatar de la tabla 2.1, el diámetro del pistón es de 70 milímetros, lo que implica que la parte exterior superior del motor visible en la figura 4.7 tendría que ser de al menos 80 milímetros, considerando el espesor de las paredes de la camisa del pistón. Realizando un dimensionamiento rápido, se puede decir que el motor de la fotografía podría estar contenido en un rectángulo de 80 cm x 20 cm x 20 cm, sin considerar la zona del manómetro o la del volante de inercia.

El tamaño considerable del motor dificultaría su transporte por parte de los alumnos, especialmente junto con otros componentes del montaje. La falta de referencias sobre las dimensiones generales del motor desarrollado por el profesor Karabulut impide una evaluación más precisa de su tamaño total y su manejabilidad.

Debido a estas consideraciones, se optó por utilizar las dimensiones originales del motor y sus características para generar tres casos de dimensionamiento escalado: 80 %, 60 % y 50 % respecto al tamaño original (100 %). Estos casos fueron seleccionados para comparar sus potencias de salida y las RPM obtenidas bajo una condición de fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 300 °C, como se detalla en este trabajo de memoria de título.

Al escalar los motores, se mantuvo constante la relación de compresión en 1.65:1, mientras que otras características menos específicas como las dimensiones del motor se ajustaron proporcionalmente.

Se generaron archivos en formato ".dat" que contienen la información del motor a modelar y su configuración. Estos archivos no afectan directamente el funcionamiento del código, sino que describen la geometría y las características del motor  $\beta$  en los cuatro casos: 100 %, 80 %, 60 % y 50 %, como se detalla en el Anexo C.1.

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de dimensionar y diseñar el disco parabólico Stirling para uso docente, a la vez que se generarán comentarios de estos y justificación de las consideraciones realizadas.

### 5.1. Dimensionamiento

Para diseñar el disco parabólico Stirling se consideraron múltiples variables y condiciones, con el objetivo de obtener un dimensionamiento adecuado para la experiencia de laboratorio que se busca generar, es por eso que en esta sección se dimensionarán las 2 partes fundamentales de un disco parabólico Stirling.

#### 5.1.1. Concentrador parabólico

En el proceso de dimensionar el disco parabólico se comenzó estableciendo la potencia requerida al eje, la cual debería rondar entre 5 y 15 W según lo mencionado en antecedentes y siguiendo las potencias máximas medidas en experiencias de laboratorio existentes en el departamento de Ingeniería Mecánica.

Para obtener la potencia de salida al eje del motor Stirling, se debe realizar un proceso de dimensionamiento “inverso”. Primero, se determina la potencia al eje del motor y luego, mediante supuestos como la eficiencia mecánica y térmica del motor, la eficiencia de concentración de rayos solares y un factor de sobredimensionamiento, se establece el área necesaria a concentrar. Esta área también depende de la irradiancia presente al momento de operar el motor. Por esta razón, se desarrolló un código simple que, dadas las eficiencias estimadas de los componentes del disco parabólico Stirling y la irradiancia esperada en buenas condiciones, proporciona el radio de la parábola, el área de la misma y la distancia al punto focal.

Para este código se utilizó la ecuación 2.1, que entrega la distancia focal de la parábola, y la ecuación 2.2, que describe la forma de la parábola. Se asumió un ángulo de  $45^\circ$  basado en un trabajo realizado por González [13], el cual establece este ángulo como un buen compromiso entre el radio y la distancia al punto focal en el diseño del disco parabólico Stirling.

Con esto, se generó la siguiente ecuación global que considera la potencia al eje requerida y las eficiencias preestablecidas de los diferentes componentes, con el fin de determinar el área del disco parabólico.

$$DNI_{marzo} = \frac{616 + 707 + 776 + 805 + 801 + 820 + 810 + 806 + 779 + 720 + 607}{11} \quad (5.1)$$

$$DNI_{promedio\ marzo} = 750 [W] \quad (5.2)$$

$$\text{Área disco parabólico} = \frac{15 [W]}{\eta_{eje} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{concentrador} \cdot FS \cdot 750 [W]} \quad (5.3)$$

Considerando las eficiencias como:

- $\eta_{eje}$ : 98 % un valor usado comúnmente en el curso de máquinas.
- $\eta_{motor}$ : 10 % como una estimación basada en la bibliografía vista.
- $\eta_{concentrador}$ : 70 % considerando una baja eficiencia de concentración.
- $FS$ : 50 % como factor de sobredimensionamiento.

Se obtuvo que es necesario crear una parábola de radio 0,431 m, pero este cálculo no considera posibles sombras producidas por el mismo montaje experimental, como el soporte del motor Stirling y el mismo motor. Por ende, se optó por sobredimensionar y establecer un radio de parábola de 0,5 m. Con esto, la parábola queda dimensionada con los siguientes valores característicos:

Tabla 5.1: Características geométricas de disco parabólico dimensionado.

Característica	Valor
Ángulo	45°
Radio	0.5 [m]
Área	0.78 [m <sup>2</sup> ]
Punto focal	0.604 [m]
Constantes cx – cy	0.828

### 5.1.2. Motor Stirling tipo $\beta$

Para dimensionar el motor Stirling de Karabulut, es necesario escalar linealmente las características fundamentales de este, considerando el motor original en su peor caso de funcionamiento, con aire como gas de trabajo y a presión atmosférica al nivel del mar, como presión media de la cámara. El motor producía alrededor de 22 W de potencia, lo cual, bajo condiciones de operación en un concentrador solar con una temperatura de fuente fría mayor a la estudiada por Karabulut, alcanzaría potencias mucho más elevadas. Esto es innecesario para fines docentes y, a la vez, genera complejidades con respecto a esfuerzos mecánicos, volumen del motor y su peso. A continuación, se presenta una tabla elaborada luego de escalar linealmente las condiciones características del motor base.



Tabla 5.2: Escalamiento de la geometría característica del motor  $\beta$  de Karabulut.

Geometría general motor	100 %	80 %	60 %	50 %
Carrera pistón [mm]	60	48	36	30
Carrera desplazador [mm]	79	63,2	47,4	39,5
Ángulo de avance	90	90	90	90
Diámetro pistón [mm]	70	56	42	35
Diámetro desplazador [mm]	69	55,2	41,4	34,5
Relación de compresión	1,65	1,65	1,65	1,65

De esta tabla se generaron archivos “.dat” los cuales fueron ingresados al modelo del profesor Urieli con el objetivo de obtener las curvas de potencia esperadas de los motores escalados y así poder determinar un motor que quede dentro del rango establecido de entregar entre 5 y 15 W de potencia al eje. Luego, se creó un caso base asumiendo una temperatura de fuente caliente a 300 °C, fuente fría a 30 °C, eficiencia del 100 % y presión media atmosférica. De estos valores entregados al modelo, se obtuvieron los siguientes gráficos donde se comparan las potencias entre motores escalados.

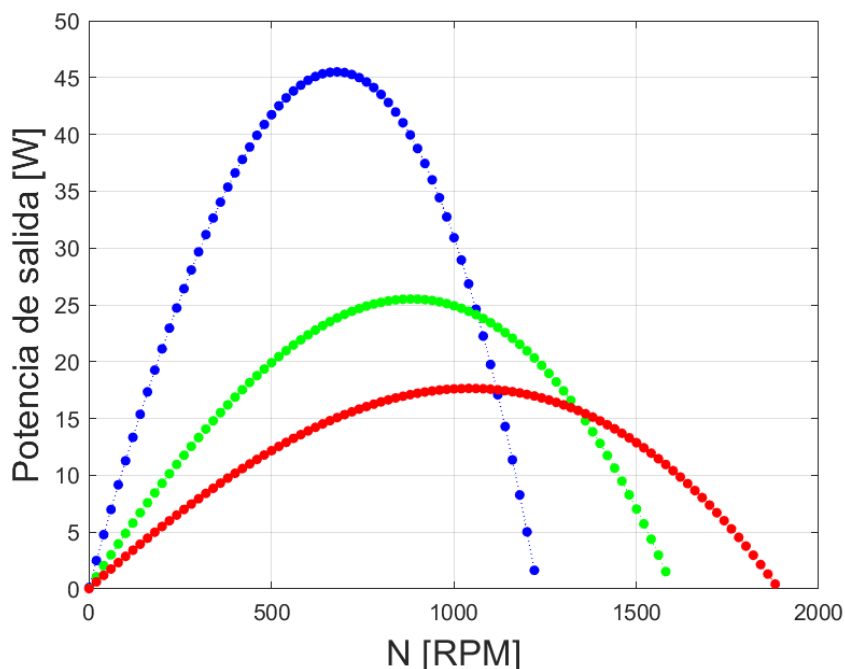


Figura 5.1: Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor  $\beta$  de Karabulut según los valores de la tabla 5.2. En azul 80 %, verde 60 % y rojo 50 %.

De la figura 5.1 se puede apreciar que, al someter el motor diseñado por Karabulut y escalado al 80 %, se deberían obtener potencias al eje cercanas a 45 W, lo cual es excesivo, incluso considerando que el motor podría perder 40 % de esta por ineficiencias. En el caso del motor escalado al 60 %, se puede comentar que llega a órdenes de potencia más razonables para una experiencia de laboratorio, pero aún muy elevadas. Es por esto que se determinó

escalar el motor Stirling al 50% de lo desarrollado por Karabulut, debido a que la potencia máxima ronda los 18 W sin considerar pérdidas, y las RPM aún están dentro de un rango razonable para experiencias de laboratorio, comparándolas con las velocidades de giro vistas en otros montajes de laboratorio de energía.

Si bien los resultados anteriores indicaban que el motor escalado al 50% era una buena elección, se procedió a hacer otros gráficos de cada motor en los que se incluían los casos con eficiencias de los motores al 100%, 80% y 60%, con el objetivo de confirmar que el motor escalado al 50% cumplía con los requerimientos establecidos en antecedentes.

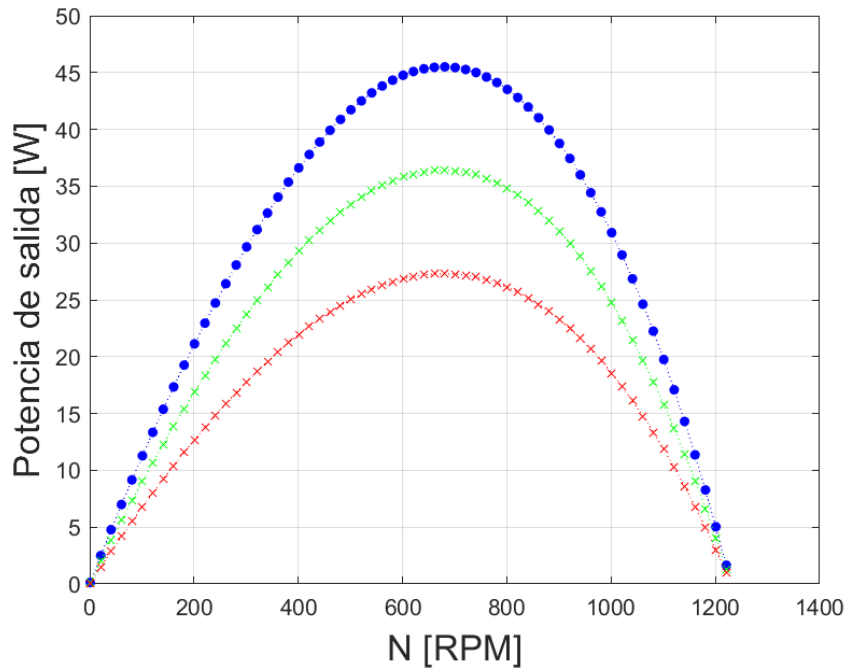


Figura 5.2: Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor  $\beta$  de Karabulut al 80% y además, considerando la eficiencia mecánica en azul 100%, en verde 80% y en rojo 60%.

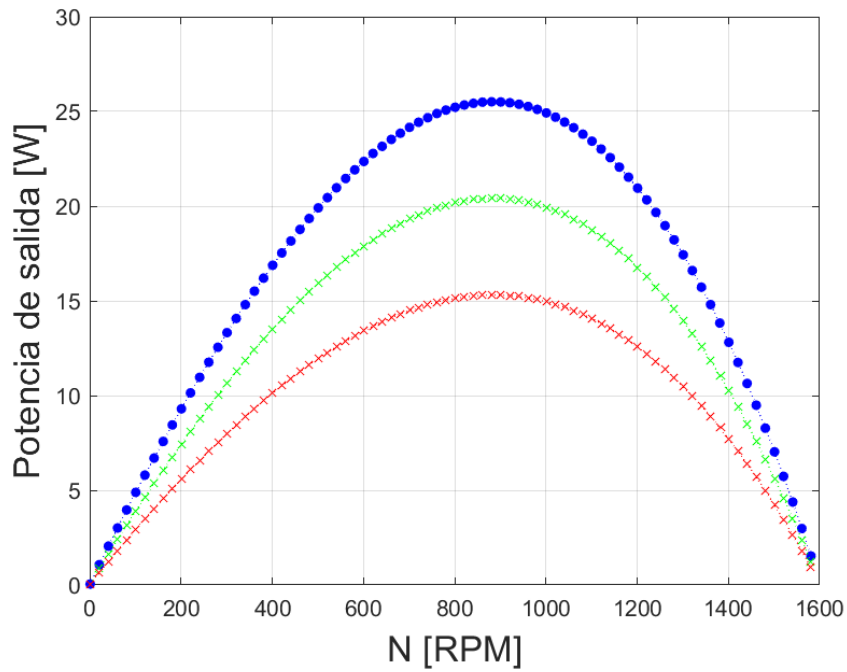


Figura 5.3: Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor  $\beta$  de Karabulut al 60%, con fuente fría a 30 °C, fuente caliente a 300 °C y además, considerando la eficiencia mecánica en azul 100%, en verde 80% y en rojo 60%.

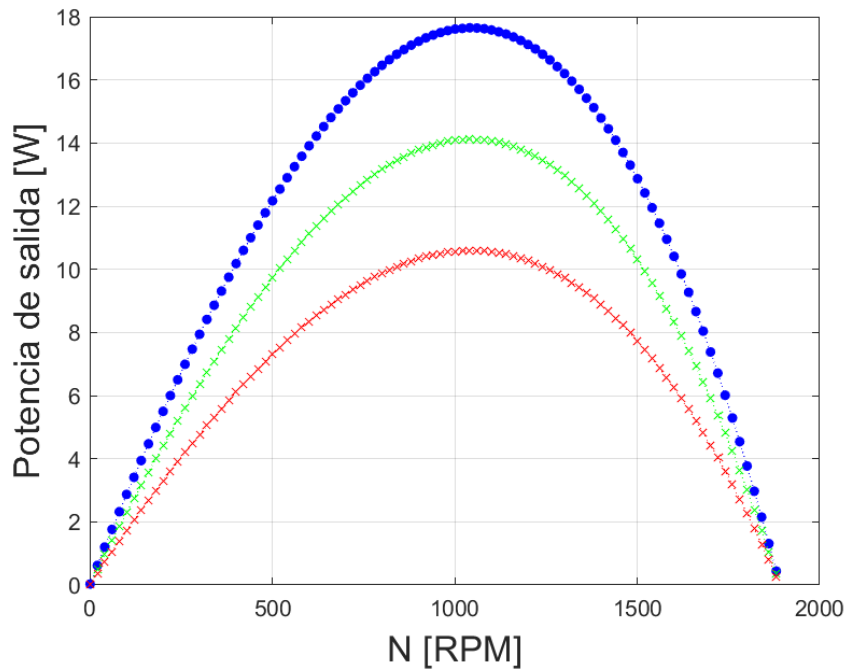


Figura 5.4: Comparativa de potencia obtenida al eje, escalando el motor  $\beta$  de Karabulut al 50%, con fuente fría a 30 °C, fuente caliente a 300 °C y además, considerando la eficiencia mecánica en azul 100%, en verde 80% y en rojo 60%.

Ya habiendo considerado los diferentes casos de eficiencia de los motores, se puede observar que en el caso del motor al 80 %, expuesto en la figura 5.2, incluso considerando una baja eficiencia, el motor sigue muy por encima de los requerimientos de potencia al eje establecidos. En el caso escalado al 60 %, expuesto en la figura 5.3, se puede comentar que, en el caso de eficiencia al 60 %, recién entra en el rango establecido y, por ende, aún se puede considerar sobredimensionado. Finalmente, en el caso del motor al 50 %, mostrado en la figura 5.4, se observa que, en el caso de eficiencia al 100 %, se está por encima de lo establecido como requerimiento, pero cabe mencionar que no es posible que el motor funcione a tan altas eficiencias. Por ende, los casos al 80 % y 60 % son más realistas y estos caben perfectamente dentro del rango de 5 a 15 W.

Luego, a manera de condensar posibles escenarios de eficiencia y temperatura de fuentes calientes y frías para los motores, se generaron dos gráficos para el motor escalado al 50 % considerando tres casos cada uno. Estos casos fueron determinados luego de simular múltiples temperaturas de fuente fría y caliente y de las temperaturas esperables de concentración solar y de la fuente fría. Estos casos son:

- **Favorable:** Fuente caliente a 350 °C y fuente fría a 30 °C.
- **Esperado:** Fuente caliente a 300 °C y fuente fría a 60 °C.
- **Desfavorable:** Fuente caliente a 250 °C y fuente fría a 90 °C.

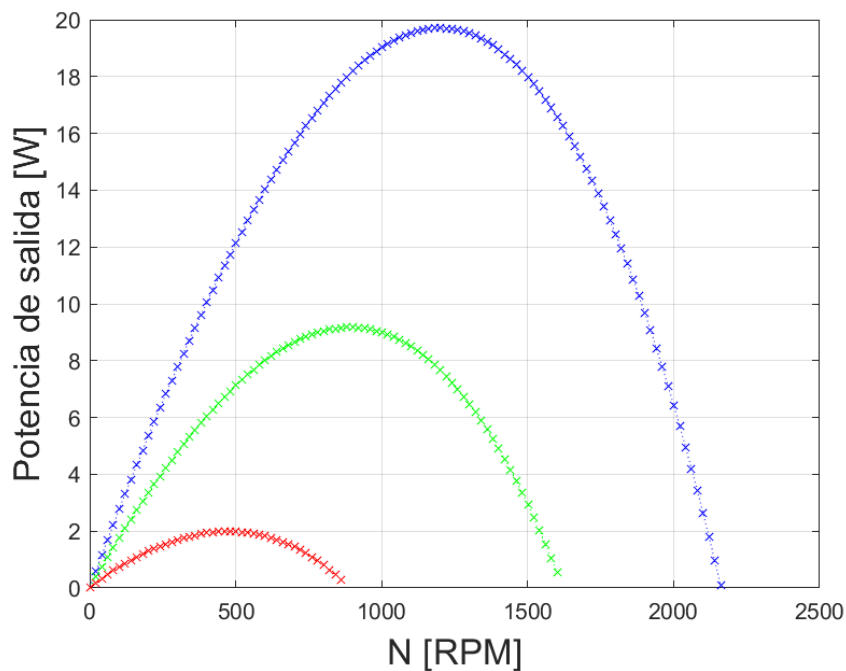


Figura 5.5: Comparativa de potencia obtenida al eje, del motor  $\beta$  escalado al 50 %, considerando una eficiencia mecánica del 80 %. En azul caso favorable, en verde caso esperado y en rojo caso desfavorable.

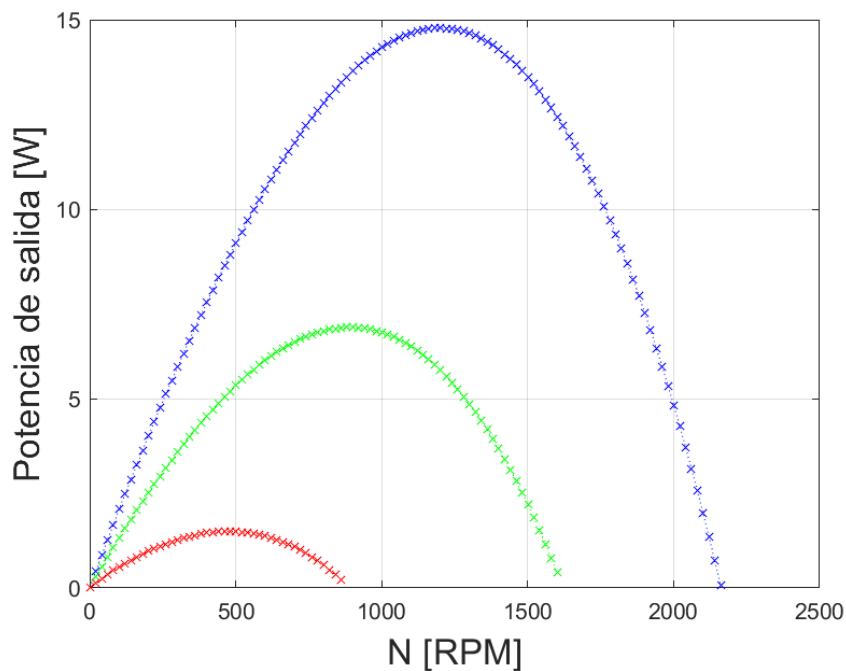


Figura 5.6: Comparativa de potencia obtenida al eje, del motor  $\beta$  escalado al 50%, considerando una eficiencia mecánica del 60%. En azul caso favorable, en verde caso esperado y en rojo caso desfavorable.

En el primer gráfico 5.5 se asume una eficiencia mecánica del 80% para el motor y se puede apreciar que, en el caso favorable, se excede en 5 W la potencia máxima esperada para la experiencia. En el caso esperado, se obtiene una potencia máxima cercana a 9 W y, en el caso desfavorable, el motor solo logra generar 2 W de potencia, lo cual aún debería poder ser leído por los instrumentos. Además, se puede mencionar que, a medida que se van empeorando los casos, las RPM obtenidas por el modelo van disminuyendo. Esto se debe al efecto de disminuir la diferencia de temperatura entre la fuente caliente y la fuente fría, lo que afecta directamente al funcionamiento del motor Stirling, que opera mejor con diferencias de temperatura altas, como se observó en los antecedentes.

En el segundo gráfico 5.6 se asume una eficiencia mecánica del 60% para el motor y se puede apreciar que, en el caso favorable, se obtienen básicamente 15 W como la potencia máxima esperada para la experiencia. En el caso esperado, se obtiene una potencia máxima cercana a 7 W y, en el caso desfavorable, el motor solo logra generar alrededor de 1 W de potencia, lo cual aún debería poder ser leído por los instrumentos, pero está muy por debajo de lo esperado. También cabe comentar que se aprecia la misma disminución de RPM mencionada en el párrafo anterior.

Considerando los resultados obtenidos del dimensionamiento del motor Stirling, se espera que el motor sea manufacturado de tal forma que la eficiencia de este ronde el caso del 80%, para que incluso en el caso desfavorable este pueda funcionar. Luego de haber definido esto, se procedió a obtener las potencias máximas y RPM de estas obtenidas en diferentes casos de temperatura de fuente caliente y fría, con el motor escalado al 50% y eficiencia mecánica del 80%. Estos valores fueron registrados en las siguientes tablas:

Tabla 5.3: Potencia máxima obtenida bajo las temperaturas de fuente fría y caliente, para motor  $\beta$  escalado al 50 % y eficiencia mecánica 80 %.

$T_f/T_c$	150	200	250	300	350
30	1,01	4,34	8,90	14,12	19,71
60	0,02	1,50	4,84	9,17	14,12
90	0,00	0,14	1,99	5,30	9,17

Tabla 5.4: RPM a potencia máxima obtenida bajo las temperaturas de fuente fría y caliente, para motor  $\beta$  escalado al 50 % y eficiencia mecánica 80 %.

$T_f/T_c$	150	200	250	300	350
30	321	621	861	1041	1201
60	21	401	681	881	1061
90	0	101	461	721	901

En las tablas 5.3 y 5.4 se muestran las RPM máximas y la velocidad de giro a la cual se obtienen según los valores entregados por el modelo numérico usado. De estas se puede comentar que a medida que disminuye la diferencia de temperatura, las potencias y RPM también disminuyen. Incluso en los casos donde la temperatura de la fuente caliente es muy baja en comparación con la fuente fría, el motor casi no logra generar potencia, o definitivamente no lo logra, como es el caso de una temperatura de fuente caliente de 150 °C y fuentes frías a 60 °C y 30 °C. Esto se puede explicar por el poco trabajo que se le puede sacar al ciclo Stirling bajo dichas condiciones, y cómo esto no es capaz de hacer girar el motor simulado por el modelo numérico, el cual considera algunas componentes de roce y pérdidas por concepto de transferencia de calor en el Regenerador y fuentes frías ya calientes. Esto indica que en el caso de la experiencia de laboratorio, el motor no debería girar antes de alcanzar temperaturas cercanas a los 200 °C en la fuente caliente.

Se dejan disponibles los gráficos obtenidos de la simulación numérica en el Anexo C.2, en caso de ser necesario observar la potencia esperable bajo diferentes velocidades de giro del motor.

## 5.2. Diseño

Esta sección de los resultados está enfocada en detallar el diseño de los componentes que integran el concentrador de disco parabólico Stirling y discutir las decisiones tomadas al respecto.

### 5.2.1. Concentrador parabólico

#### 5.2.1.1. Geometría

Comenzando con el diseño del concentrador de disco parabólico, se debe tener en cuenta lo realizado en la sección de dimensionamiento, es decir, la tabla 5.1. En esta se tienen los datos característicos de la parábola, los cuales son suficientes para generar la geometría del disco parabólico por revolución.

La generación de la geometría de un disco parabólico puede realizarse de varias maneras. Se pueden utilizar estructuras sólidas de una sola pieza, comúnmente vistas en antenas de televisión por satélite o antenas de pequeña escala; estructuras segmentadas que permiten ensamblar múltiples piezas para formar la parábola, utilizadas en estructuras de grandes dimensiones por su robustez y ligereza; o estructuras tipo alámbricas, que se encuentran en un rango medio y son ideales para discos parabólicos ligeros. Para este proyecto, se optó por una estructura alámbrica con platinas debido a su simplicidad de manufactura, disponibilidad de materiales y la posibilidad de ajuste preciso durante la construcción. Esta elección fue inspirada en el trabajo de título sobre discos parabólicos [28], del cual se muestra un recorte de la estructura generada.

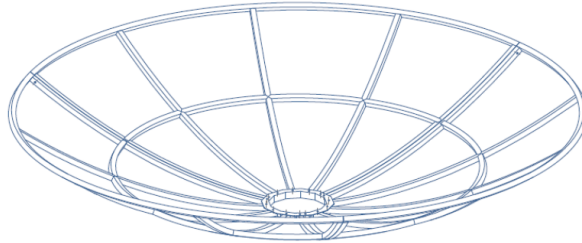


Figura 5.7: Estructura de disco parabólico Stirling generada por [28].

En la figura 5.7, se puede observar un ejemplo de diseño de estructura parabólica, la cual consiste en perfiles cuadrados de aluminio que forman estructuras curvas unidas entre sí por medio de tornillos para generar una aproximación a un disco parabólico. Considerando este diseño expuesto, se optó por generar una estructura similar, pero utilizando platinas de acero y una unión hexagonal en el centro. Esto se debe a que es más fácil dar el ángulo de  $45^\circ$  a una platina que a un perfil. La estructura se mostrará a continuación.

#### 5.2.1.2. Componentes

##### Estructura a base de platinas:

Como se mencionó anteriormente, se optó por generar una estructura de tipo alámbrica conformada por platinas de acero de  $12 \times 3$  mm, la cual puede ser vista en la figura 5.8. Estas medidas fueron seleccionadas debido a su disponibilidad en el mercado y por ser consideradas suficientemente robustas para la función de generar la forma parabólica y soportar la zona reflectante, la cual idealmente debería ser muy liviana.

Con respecto a la manufactura de esta estructura, es necesario realizar un proceso de laminado para obtener el ángulo de la parábola de  $45^\circ$ . Además, en el caso de las platinas que conforman el círculo exterior de la parábola, se deben laminar de tal forma que conserven el ángulo de  $45^\circ$  y al mismo tiempo generen un anillo que cierre la parábola. Para fabricar estas láminas cortadas bajo las dimensiones expuestas en el Anexo D, se pueden mandar a cortar por láser desde una plancha de espesor 3 mm, lo cual incluiría también el corte del soporte hexagonal, o simplemente usar unas platinas pre-cortadas ya disponibles en el mercado.

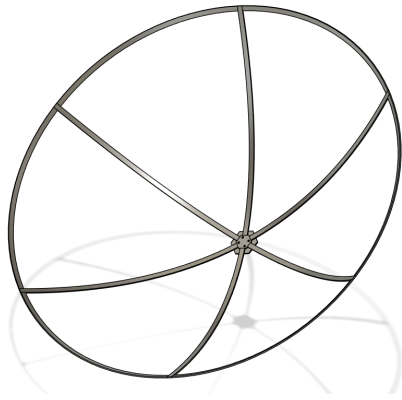
**Zona reflectante:**

La zona reflectante se asumió como una lámina de 2 mm de espesor montada sobre la estructura alámbrica, de manera que genere un disco parabólico con la zona reflectante en su interior. Para este trabajo, se seleccionó este espesor basándose en lo obtenido en el trabajo [28], donde se estudió la creación de una lámina reflectante compuesta por dos capas. La primera consiste en una serie de planchas de aluminio conformadas para ajustarse a la estructura del disco parabólico, mientras que la segunda es una película de material reflectante, como el Reflectech, que logra una reflectividad cercana al 92 % y puede laminarse y adherirse a la superficie del aluminio. Esto es necesario debido a lo delgado del material. Este tipo de material está disponible en el mercado mexicano; sin embargo, en el mercado chileno debería haber materiales con características similares disponibles para la confección del disco.

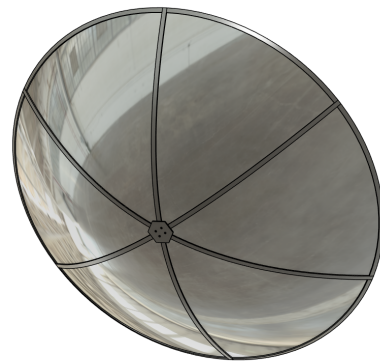
**Soporte hexagonal:**

Este soporte fue diseñado y conformado por 2 hexágonos de diferente ancho pero con el mismo espesor de 3 mm, como se puede ver en la figura 5.8. Tienen la función de cerrar el centro de la parábola y soportarla mediante soldadura entre las platinas y estos hexágonos. Además, se agregaron 4 agujeros roscados para poder unir este soporte hexagonal a una placa de montaje que integra todos los componentes principales del disco parabólico Stirling. Estas placas hexagonales de acero están diseñadas para ser cortadas con láser y superpuestas una sobre la otra antes de ser soldadas a las platinas de acero. Las dimensiones de estas placas se pueden consultar en el Anexo D.

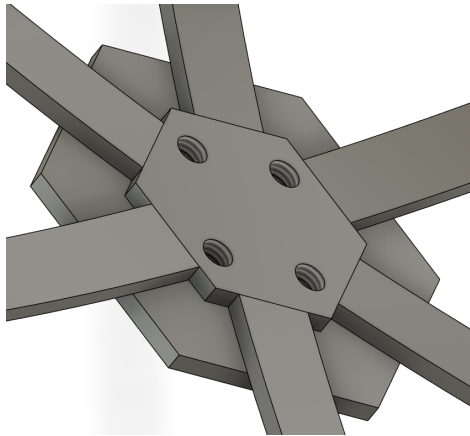




(a) Estructura conformada por platinas.



(b) Vista posterior del disco parabólico.



(c) Hexágonos centrales de montaje.

Figura 5.8: Vistas generales del disco parabólico diseñado.

## 5.2.2. Motor Stirling

### 5.2.2.1. Cinemática

Para iniciar el diseño del motor Stirling, es necesario primero definir su cinemática. Debido a que en el trabajo de Karabulut no se incluyeron planos ni más dimensiones del modelo, este paso es crucial para asegurar el correcto funcionamiento del motor, considerando lo definido previamente en el dimensionamiento, como la razón de compresión, el desfase del desplazador y la prevención de interferencias entre componentes.

Para ello, se generó un diagrama cinemático que involucra las partes principales del motor, tales como bielas, ejes, pistón, desplazador, entre otros. Este diagrama se muestra a continuación:

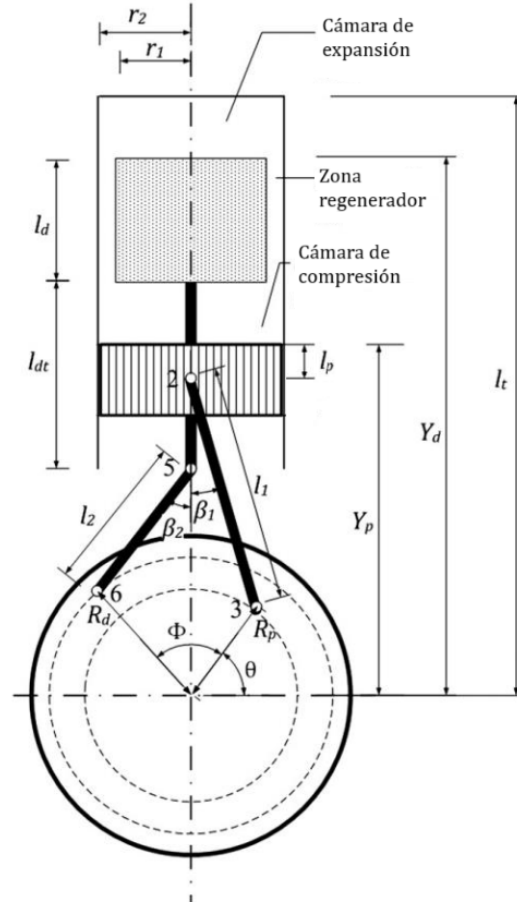


Figura 5.9: Esquema general de la cinemática del motor Stirling tipo  $\beta$ . Modificado de [29].

De la figura 5.9, se pueden extraer las siguientes ecuaciones que definen el movimiento en relación con el ángulo  $\theta$  del eje del motor. Siendo  $Y_P$  la posición de la parte superior del pistón,  $Y_{Pb}$  la posición de la base del pistón que se une a la biela,  $Y_D$  la posición de la parte inferior del desplazador, y finalmente  $Y_{Db}$  describe la posición de la conexión barra-desplazador con la biela.

$$Y_P = l_P + R_P \cos(90 - \theta) + l_1 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{R_P}{l_1} \sin(\Phi - \theta)\right)\right) \quad (5.4)$$

$$Y_{Pb} = R_P \cos(90 - \theta) + l_1 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{R_P}{l_1} \sin(\Phi - \theta)\right)\right) \quad (5.5)$$

$$Y_D = l_{dt} + R_d \cos(\theta - 90 + \Phi) + l_2 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{R_d}{l_2} \sin(\theta - 90 + \Phi)\right)\right) \quad (5.6)$$

$$Y_{Db} = R_d \cos(\theta - 90 + \Phi) + l_2 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{R_d}{l_2} \sin(\theta - 90 + \Phi)\right)\right) \quad (5.7)$$

De estas ecuaciones, fue necesario ajustar los valores de longitud de ciertos componentes para evitar interferencias entre ellos. Para ello, se graficó el recorrido de estas ecuaciones a lo largo de una revolución del motor, como se puede observar en la figura 5.10, donde se utilizó la herramienta gráfica Desmos para obtener una aproximación de los valores de estos

componentes y evitar choques e interferencias.

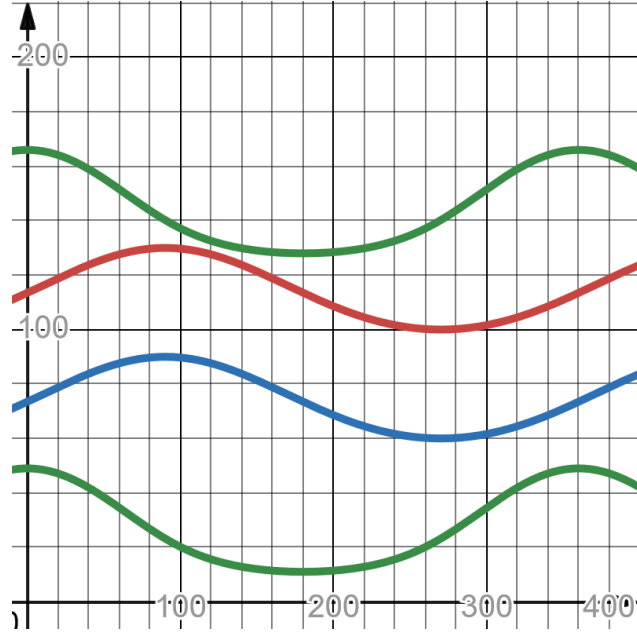


Figura 5.10: Curvas de posición en Y vs. ángulo de revolución, generadas para evitar interferencias entre componentes.

En la figura 5.10, se puede apreciar que la primera curva en verde desde arriba representa la posición de la parte superior del desplazador. La segunda curva en rojo representa la posición de la parte inferior del desplazador, la cual era crucial evitar que chocara con el pistón, pero al mismo tiempo buscar que estuviera lo más cercana posible para facilitar el desplazamiento del fluido de trabajo hacia la zona opuesta. La tercera curva en azul representa la posición de la parte inferior del pistón donde se une con la biela, y finalmente, la curva en verde inferior representa la unión barra-desplazador-biela. Luego de este proceso, se obtuvieron las ecuaciones cinemáticas con los valores reemplazados desde el dimensionamiento y este proceso de ajuste.

$$Y_P = 40 + 15 \cos(90 - \theta) + l_1 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{15}{l_1} \sin(90 - \theta)\right)\right) \quad (5.8)$$

$$Y_{Pb} = 15 \cos(90 - \theta) + l_1 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{15}{l_1} \sin(90 - \theta)\right)\right) \quad (5.9)$$

$$Y_D = 117 + 19 \cos(\theta - 90 + 90) + l_2 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{19}{l_2} \sin(\theta - 90 + 90)\right)\right) \quad (5.10)$$

$$Y_{Db} = 19 \cos(\theta - 90 + 90) + l_2 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{19}{l_2} \sin(\theta - 90 + 90)\right)\right) \quad (5.11)$$

### 5.2.2.2. Componentes

Comenzando esta sección del diseño del motor Stirling tipo  $\beta$  escalado al 50% del motor desarrollado por Karabulut, es importante mencionar que debido a la falta de planos originales del motor de Karabulut, se procedió a diseñar prácticamente el motor desde cero, basándose únicamente en disposiciones generales y características fundamentales del motor expuestas en el capítulo de antecedentes 2.3.4. En esta sección se comentarán las decisiones de diseño

y algunos datos relevantes. Para mayor información, se encuentran disponibles los planos en el Anexo D.

### **Camisa, pistón y tapa pistón:**

Para el diseño de la camisa y tapa del pistón, según lo discutido con el profesor guía, se buscó un tubo de acero de medidas comerciales que se adecuara al diámetro del pistón escalado al 50%. Se optó por un tubo con diámetro exterior de  $1 \frac{1}{4}$  y un espesor de pared de 2,77 mm, coincidencia que resultó fortuita, pero adecuada, ya que el diámetro interior permite un ajuste adecuado para el deslizamiento del pistón. La longitud de esta camisa del pistón se determinó escalando el volumen total de la cámara de combustión, mientras que la tapa se diseñó para ser soldada en uno de los extremos de la camisa, actuando como intercambiador de calor entre el calor concentrado en ella y el aire dentro de la camisa del pistón.

### **Carcasa del motor:**

Esta carcasa cumple tres funciones principales. La primera es unir todas las partes del motor en un conjunto sólido, asegurando que el eje con respecto a la camisa del pistón no sufra desplazamientos, logrado mediante pernos y soldaduras en puntos estratégicos. La segunda función es proveer seguridad, dado que el motor estará en funcionamiento y se trata de una experiencia docente, es crucial tomar precauciones respecto a la seguridad y la manipulación de componentes. Por ello, además de contar con una parte de planchas de acero, la carcasa incluye un recubrimiento de plástico transparente que permite visualizar el movimiento del motor sin permitir acceso a las partes móviles. La tercera función es servir como medio de montaje para el resto del disco parabólico Stirling, facilitado por una placa lateral perforada por la cual pasan pernos de unión hacia una placa de montaje.

### **Partes móviles:**

En el diseño de estas partes se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en la subsección anterior de cinemática (5.9), donde se establecieron las longitudes fundamentales de las partes móviles. A partir de ahí, se procedió a diseñar bielas, ejes, volantes de inercia, pasadores y brazos para el pistón y el desplazador, asegurando que siguieran la cinemática calculada. Además, debido a la escala del motor y con el objetivo de mantener un diseño compacto, se decidió no incorporar rodamientos, excepto en los soportes del eje del motor, donde su uso era viable. Esta decisión se tomó para evitar que el mecanismo resultara demasiado grande con relación al tamaño del pistón. Por la ausencia de rodamientos, se espera que al momento de fabricar el motor se consideren las tolerancias adecuadas para permitir el correcto giro de los componentes y la lubricación periódica, lo cual no debería ser un problema dado que el motor, siendo una experiencia de laboratorio, no está diseñado para funcionar de manera frecuente ni por períodos prolongados. Para más detalles, están disponibles los planos en el Anexo D.

### **Pistón y barra desplazador:**

En motores Stirling, es fundamental asegurar un buen sellado interno del gas de trabajo, ya que este debe permanecer contenido dentro de la “cámara de combustión” sin permitir fugas para que sea posible generar el movimiento del pistón y completar el ciclo. Karabulut dejó esta cuestión en gran parte al ensayo y error práctico, pero recomendó dejar un juego de 0,03 mm entre el pistón y su camisa. Este ajuste deberá determinarse durante la manufactura; sin embargo, si no permite el deslizamiento adecuado de los componentes y al mismo tiempo no contiene el fluido dentro de la cámara, se plantea la opción de incorporar un anillo para el pistón fabricado con algún material con propiedades lubricantes como grafito, o diseñar una zona donde se pueda alojar una película de aceite que necesitará ser reemplazada regularmente para facilitar el deslizamiento del pistón.

### **Radiador de aletas:**

Si bien este trabajo no contempla el diseño de un radiador de aletas como parte integral, se ha incluido en los planos proporcionados como una medida preliminar para tener al menos un sistema de disipación de calor que podría ser implementado y calculado adecuadamente en el futuro. Por el momento, se asume que será suficiente; en caso contrario, existe la opción de añadir un ventilador para aumentar el flujo de aire a través de las aletas.

### **Componentes industriales:**

Estos componentes fueron obtenidos del catálogo McMaster de Fusion360, donde se prefirió la utilización de componentes métricos disponibles en el mercado chileno, basado en la experiencia adquirida en actividades docentes a lo largo de la carrera de diseño mecánico. Incluyen pernos, tuercas, rodamientos, tensores, entre otros.

A continuación se pueden apreciar algunas vistas principales del motor diseñado y modelado en 3D con Fusion360, para ver más detalles se puede acceder a los planos en Anexo D.

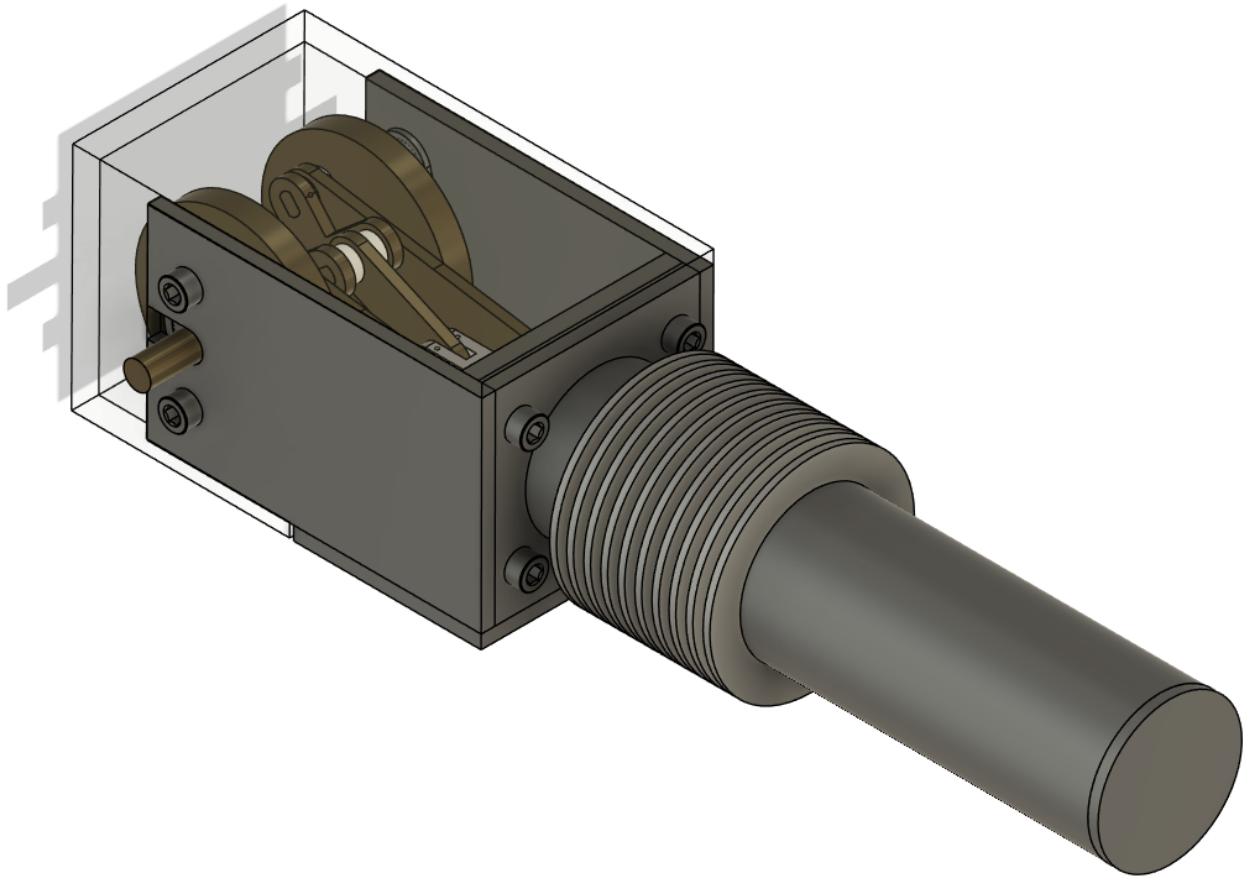


Figura 5.11: Vista en perspectiva del motor  $\beta$  diseñado.

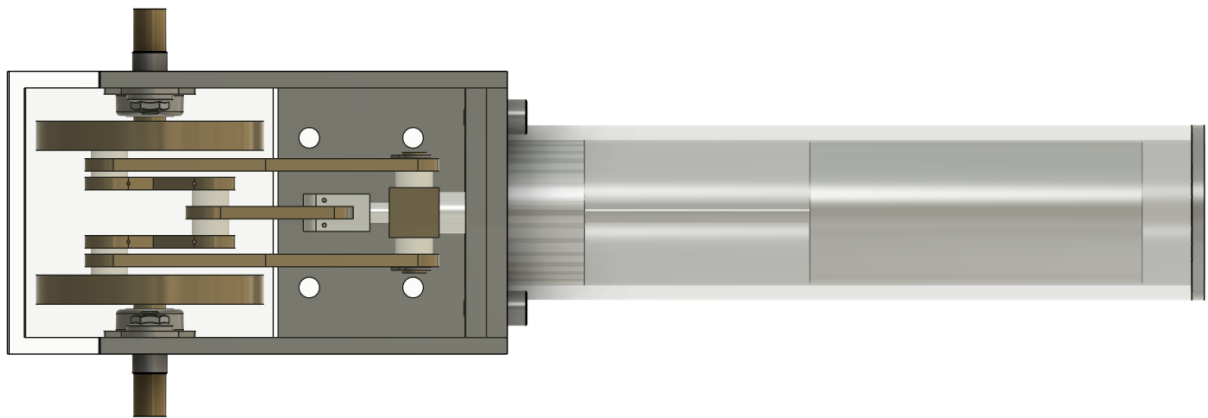
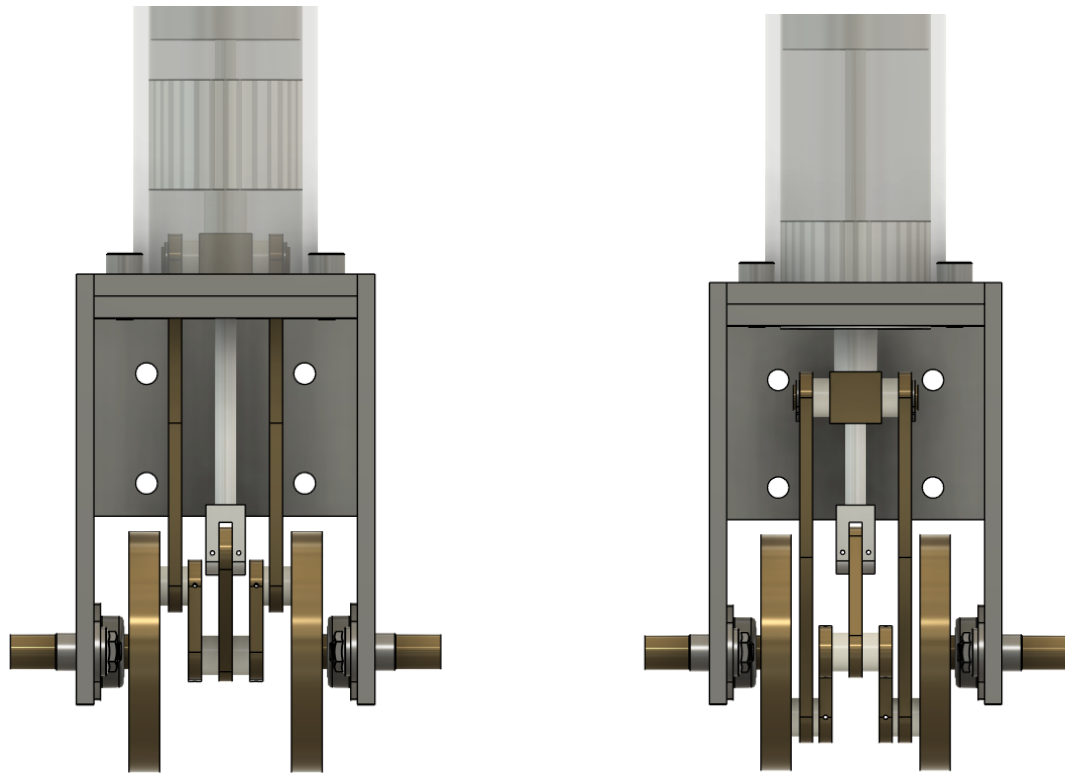


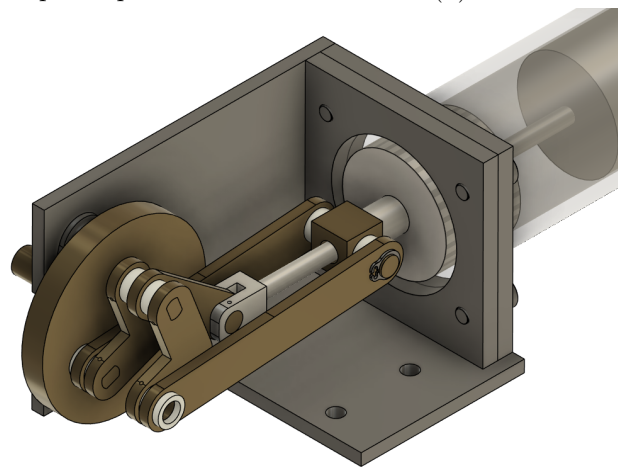
Figura 5.12: Vista superior del motor  $\beta$  diseñado.

Además de lo anteriormente mencionado, se incluyen unas vistas que muestran algunas nociones del funcionamiento de las partes móviles, donde se muestra el punto muerto superior y el punto muerto inferior del pistón, así como una vista de las partes móviles con el volante de inercia eliminado para mejorar la visibilidad. Esto se puede observar en la figura 5.13.



(a) Punto muerto superior pistón.

(b) Punto muerto inferior pistón.



(c) Detalle mecanismo pistón.

Figura 5.13: Puntos muertos del pistón y detalle del mecanismo de movimiento de pistón, desplazador, ejes y volantes de inercia.

En Anexo D, es posible consultar los planos específicos de cada parte de este motor, a la vez que algunas vistas de explosión y detalle.

### 5.2.3. Montaje

Luego de diseñar ambos componentes principales del disco parabólico Stirling, se procedió a generar una estructura de montaje que uniera ambos componentes y permitiera ajustar distancias y ángulos para adecuar la experiencia a la posición del sol y la distancia al punto focal.

En la figura 5.14 se puede apreciar la disposición general del montaje de laboratorio, con el motor Stirling soportado por dos perfiles cuadrados unidos entre sí por medio de una placa de montaje del motor, y en el otro extremo por una placa plana de montaje al disco parabólico. Para obtener más información sobre medidas y ángulos de esta y otras partes que ayudan a crear el montaje, se sugiere revisar el Anexo D.

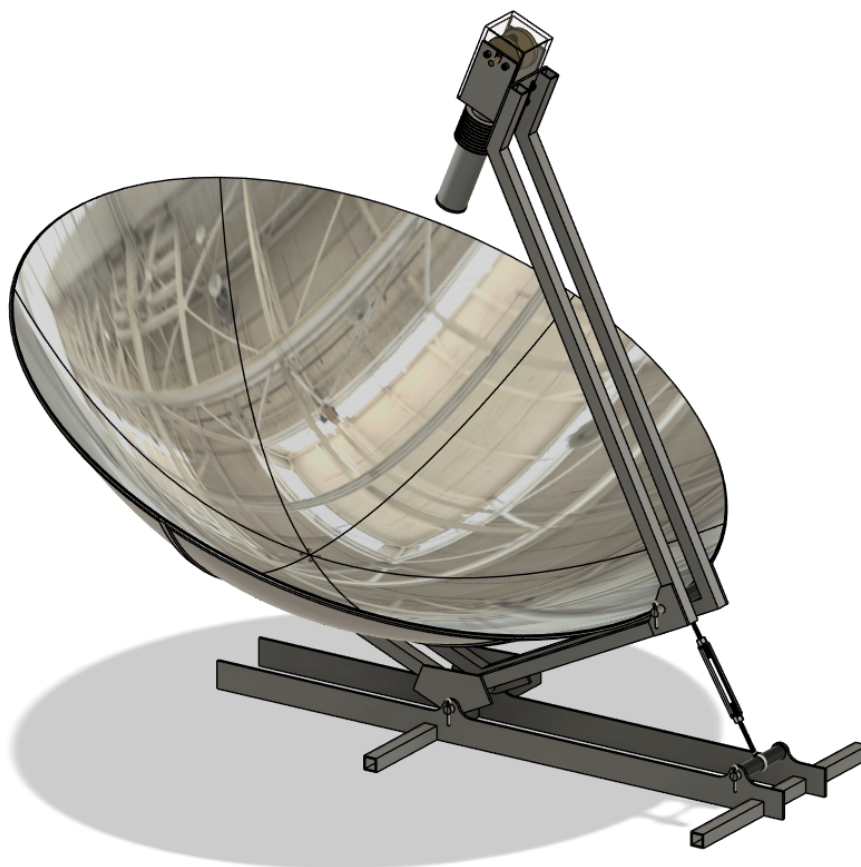


Figura 5.14: Vista en perspectiva del montaje de disco parabólico Stirling diseñado.



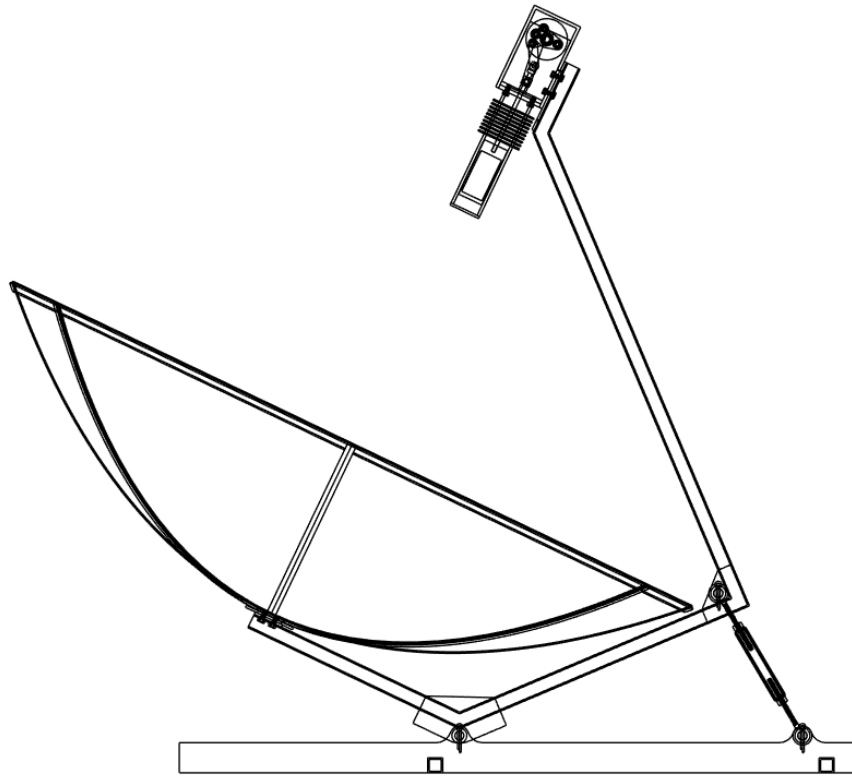


Figura 5.15: Vista lateral disco parabólico Stirling.

Este montaje permite regular la inclinación del disco parabólico con respecto a la posición del sol, de manera de obtener el componente de radiación normal al este. El mecanismo para inclinar el disco consiste en un eje que soporta el peso del conjunto y una barra roscada tipo tensor para cables que permite extenderse o contraerse según se gire una sección central. Es con esta barra que se puede regular el ángulo del disco, y en caso de ser necesario, al reemplazarla por una más corta o larga, se pueden obtener diferentes ángulos máximos y mínimos. Esto se puede ver en la figura 5.16, donde se muestra el ángulo máximo de  $73^\circ$  y el ángulo mínimo con respecto al suelo de  $58^\circ$ .

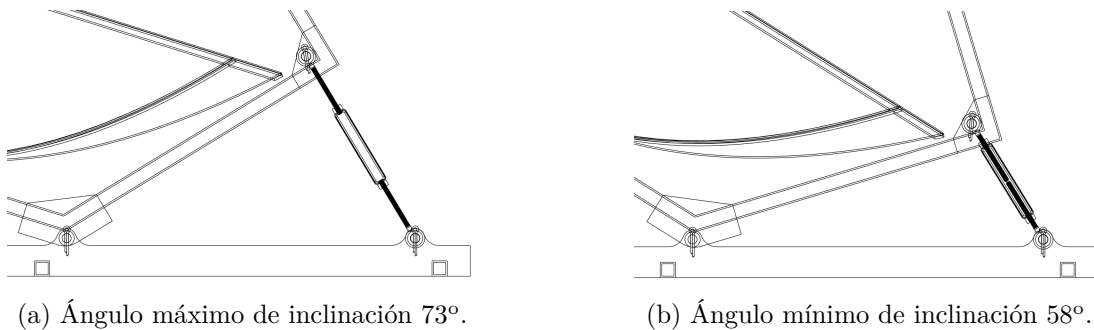


Figura 5.16: Detalle de regulación de ángulo de inclinación del disco parabólico Stirling.

Además, como parte del montaje se agregó la opción de poder regular la posición del motor Stirling con respecto al punto focal del concentrador parabólico. Esto se debe a que en esta

configuración podría ser mejor concentrar los rayos en la totalidad de la tapa del pistón que solo en un punto muy pequeño de esta, sugerido por González [28]. Gracias a este sistema de regulación también se podrá determinar en qué posición es mejor ubicar el motor Stirling y ajustar la concentración de los rayos en la tapa de la camisa del pistón. Estas configuraciones se pueden ver en la figura 5.17.

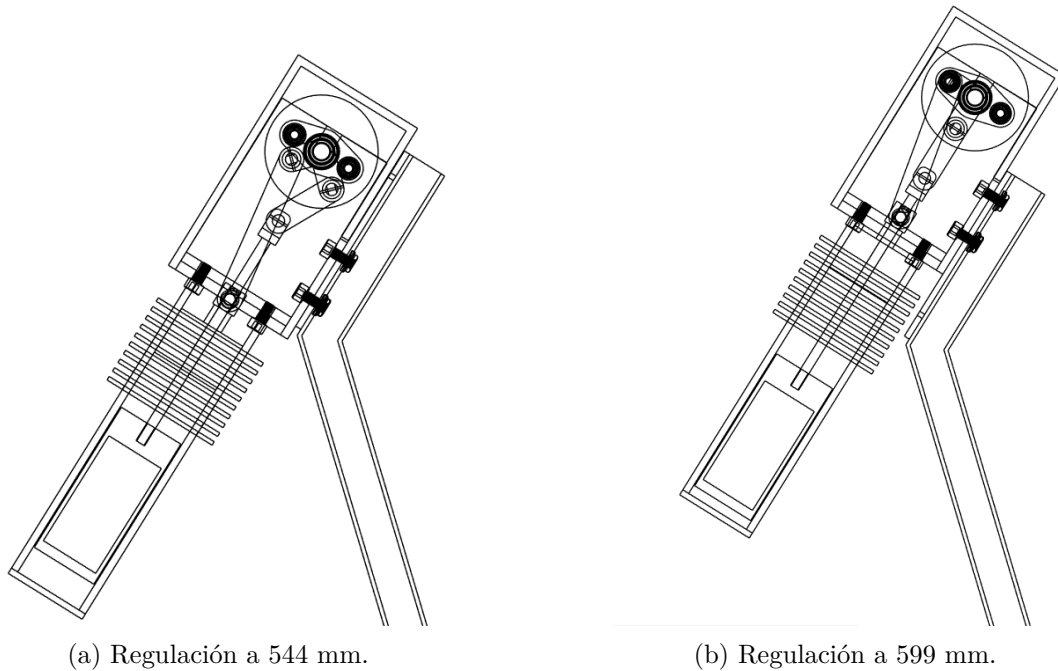


Figura 5.17: Detalle regulación de posición del motor Stirling con respecto al origen del disco parabólico.

### 5.3. Simulación de concentración de rayos por SolTrace

A manera de poder visualizar de manera fácil y didáctica la concentración de rayos, se generó una simulación de concentración de rayos solares mediante SolTrace. Se generaron las siguientes figuras, asumiendo que el motor está posicionado tanto en su punto más alejado al centro de la parábola, normal a esta, como en el punto más cercano, considerando ambos ligeramente más cerca del punto focal absoluto. Además, se agregó un objeto a la altura de la placa de montaje del motor para simular la sombra que este genera sobre el disco parabólico, facilitando así la visualización en la simulación. Cabe mencionar que no se consideran las sombras creadas por la estructura de soporte del motor, aunque en el dimensionamiento del disco parabólico se tomaron en cuenta mediante un sobredimensionamiento. Con base en estas condiciones, se generaron las siguientes figuras, conforme a lo establecido en el Anexo A.

## Caso de tapa de pistón ubicada a 599 mm del origen de la parábola:

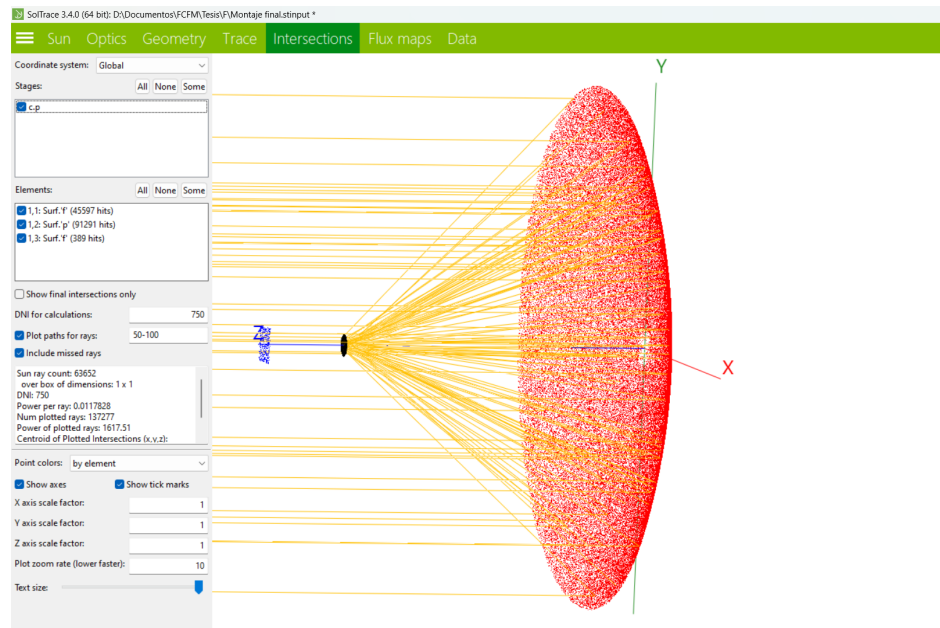


Figura 5.18: Simulación concentrando los rayos a 599 mm del centro de la parábola, 5 mm más próximos que el punto focal.

Este caso genera una alta concentración de los rayos solares en la tapa del pistón, debido a que se encuentra a solo 5 mm del punto focal. Además, se puede apreciar que la sombra proyectada por el motor es mínima al observar el origen de la parábola en la figura 5.18, donde no se aprecia una gran zona sin puntos rojos que simulan el reflejo de un rayo de luz solar. Además de la simulación, es posible obtener un mapa de color que representa la cantidad de rayos solares concentrados en una superficie definida. En este caso, se seleccionó la tapa del pistón y se puede observar en la figura 5.19 que es básicamente una representación del “flux solar”, donde mientras más rojo más rayos están concentrados. Al analizar dicha figura, se puede concluir que efectivamente se obtiene un alto nivel de concentración de rayos solares en un diámetro menor a 1 cm.

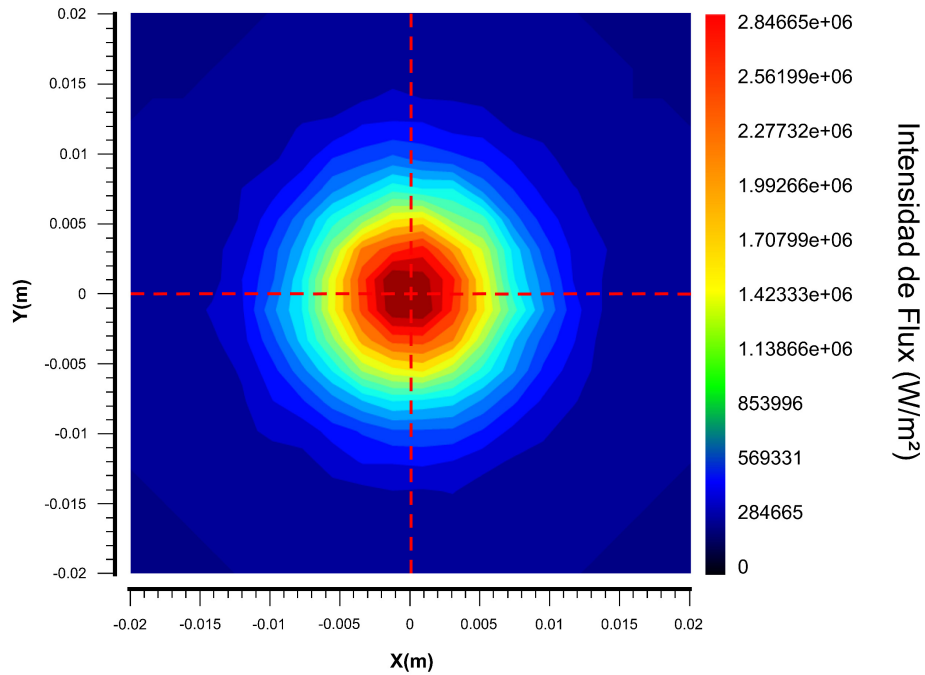


Figura 5.19: Simulación de la concentración de los rayos en la tapa pistón, ubicada a 599 del centro de la parábola.

**Caso de tapa de pistón ubicada a 544 mm del origen de la parábola:**

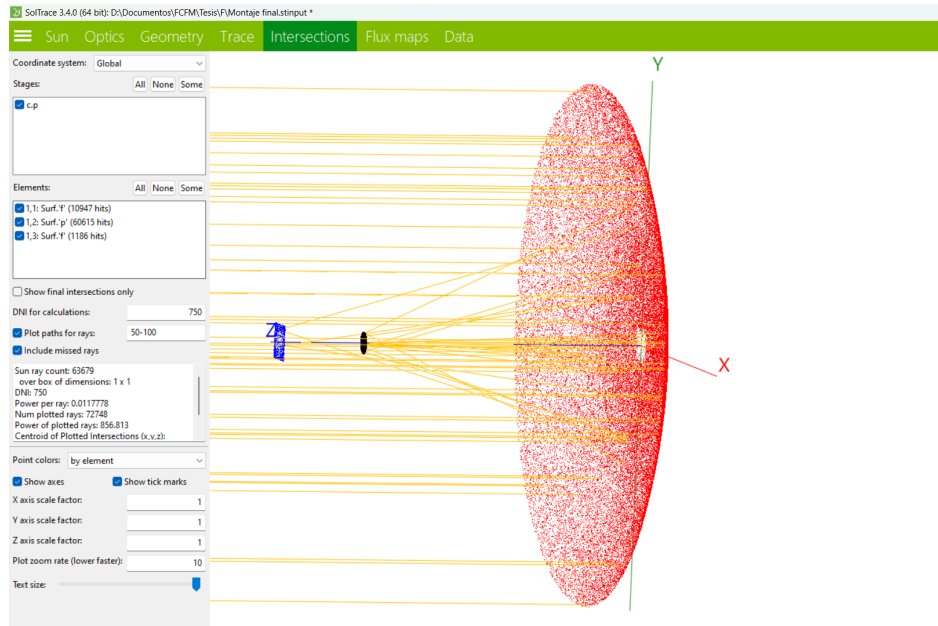


Figura 5.20: Simulación concentrando los rayos a 544 mm del centro de la parábola, 60 mm más próximos que el punto focal.

Este caso genera una concentración más uniforme de los rayos solares en la tapa del pistón, ya que se encuentra a 60 mm del punto focal. Además, se puede apreciar que la

sombra proyectada por el motor es un poco más visible que en el caso anterior, al comparar el origen de la parábola en la figura 5.20 con la de la figura 5.18, donde no se aprecia una gran zona sin puntos rojos que simulan el rebote de un rayo de luz solar. De la simulación es posible obtener un mapa de color que representa la cantidad de rayos solares concentrados en una superficie definida. En este caso, se seleccionó la tapa del pistón y se puede observar en la figura 5.21 que es básicamente una representación del “flux solar”, donde mientras más rojo más rayos son concentrados. Al analizar dicha figura, se concluye que se obtiene un nivel de concentración solar más uniforme, en un diámetro de aproximadamente 4 cm.

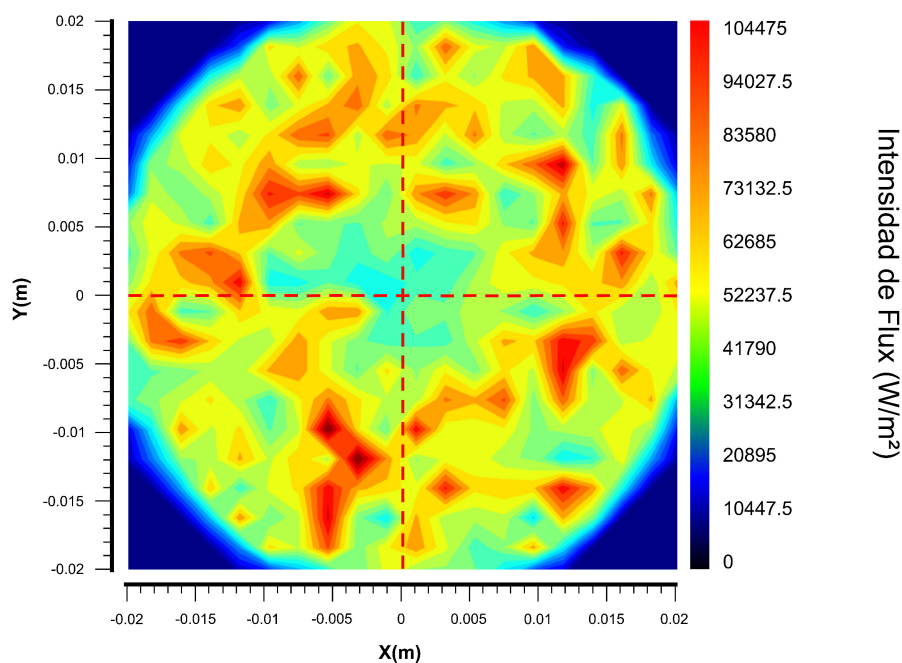


Figura 5.21: Simulación de la concentración de los rayos en la tapa pistón, ubicada a 544 del centro de la parábola.

Estos casos pueden ser interesantes al momento de construir el disco parabólico y realizar pruebas, ya que podrían variar la distribución del calor en la tapa del pistón y generar algún efecto en la eficiencia de este y la temperatura alcanzada, como lo investigado por Gonzales [28].

## 5.4. Directrices de instrumentalización y puntos de medición

En esta sección se comentan los puntos a instrumentalizar del montaje y algunos componentes que podrían usarse para ello. Además, se mencionan las mediciones que se deben realizar para poder llevar a cabo una experiencia de laboratorio y el reporte posterior. En la figura 5.22 se pueden apreciar puntos marcados por letras capitales, las cuales denotan áreas de interés en las cuales se recomienda instrumentalizar el montaje.

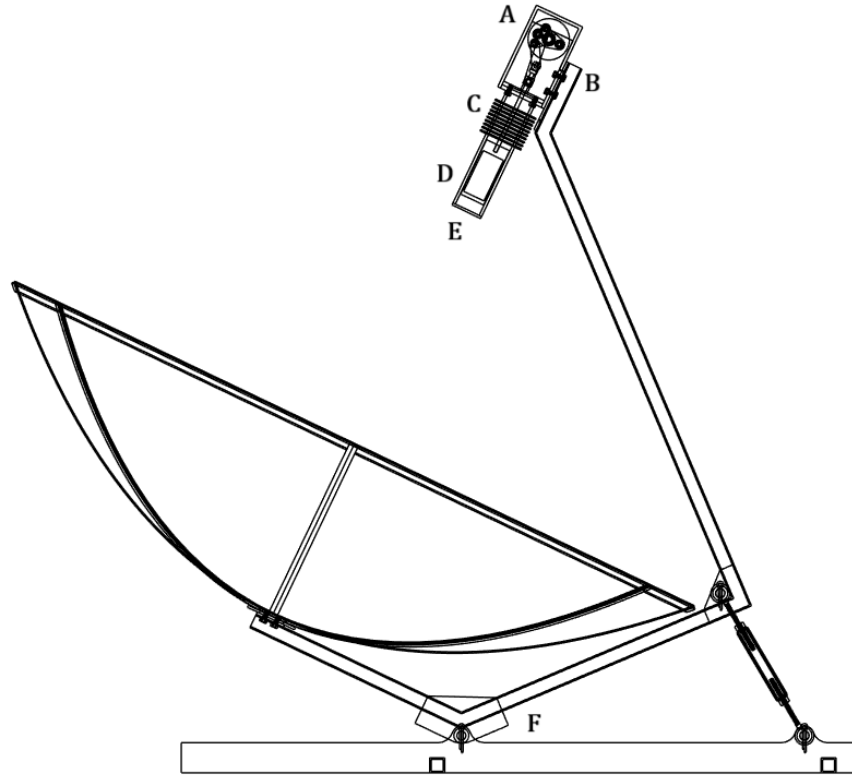


Figura 5.22: Puntos de instrumentación disco parabólico Stirling.

### Temperatura:

La medición de la temperatura es fundamental para evaluar el rendimiento térmico del motor Stirling tipo  $\beta$ . Se utilizarán termocuplas tipo K debido a su amplio rango de temperatura y alta precisión. Las termocuplas estarán conectados a un sistema de adquisición de datos que registrarán las mediciones. Los puntos de medición serán:

- **Fuente caliente:** El termopar se ubicará en el centro de la cámara de calentamiento para medir la temperatura máxima alcanzada por la fuente de calor. Esta temperatura podrá ser medida en el punto D y E.
- **Fuente fría:** Otro termopar se situará en la parte interna de la cámara de enfriamiento para registrar la temperatura mínima. Esta temperatura podrá ser medida en el punto C.
- **Temperatura Ambiente:** Se colocará un termopar en el exterior del motor para medir la temperatura ambiental y considerar su efecto en el rendimiento del motor. Esta temperatura podrá ser medida en el punto F debido a que se encuentra a la sombra o con un termómetro exterior y cubierto del sol.

La precisión esperada de las termocuplas es de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , lo cual es adecuado para nuestras necesidades experimentales. Además, se utilizará sistema de adquisición de datos para registrar y almacenar las lecturas en tiempo real. Este podría ser implementado por medio de una placa de desarrollo Arduino.

### **Inclinación:**

El montaje será montado en un sistema que permita variar la inclinación de este, así direccionando el disco parabólica hacia el sol de manera normal. Esta configuración es esencial para estudiar cómo la inclinación afecta el funcionamiento del motor. Se usará un transportador para medir la inclinación del sistema, para ello habría que adaptar una placa con líneas de referencia. Esta podrá ser medida en el punto F.

### **Irradiancia:**

La fuente de calor utilizada en el experimento proveniente de la concentración de rayos solares, de este se obtendrá una irradiancia constante y controlable por medio de la orientación del montaje y en otro escenario por la reflexividad del disco parabólico. Se medirá la irradiancia con un radiómetro, que deberá ser colocado a una distancia fija de la lámpara para obtener lecturas precisas. Las mediciones de irradiancia se expresarán en  $W/m^2$ , y se espera además comparar estos datos con los reportados por estaciones meteorológicas. Esta podrá ser medida de manera normal al sol y externamente al montaje

### **RPM motor:**

Para medir la velocidad de rotación del motor (RPM), se utilizará un tacómetro digital sin contacto, que es adecuado debido a su precisión y facilidad de uso. Para ello se deberá colocar el tacómetro cerca del volante del motor o el mismo eje y realizar un número determinado de mediciones. Se podrá medir las RPM del motor de manera externa o en el punto A junto al generador.

### **Generador:**

El motor Stirling estará acoplado a un generador eléctrico para convertir la energía mecánica producida en energía eléctrica. El generador seleccionado será fundamental para poder regular el freno aplicado al motor por medio de una carga eléctrica. Este generador puede ser de imanes permanentes debido a su simpleza, eficiencia y capacidad de generar una potencia mayor a la esperable del motor.

### **Carga eléctrica:**

La carga eléctrica se realizará mediante una resistencia variable (reóstato), que permitirá ajustar la carga y estudiar su efecto en la producción de energía eléctrica, la resistencia variable permitirá observar cómo la carga afecta la eficiencia del generador y, en consecuencia, del motor Stirling. La carga eléctrica tendrá que ser agregada de manera externa y conectada al generador para poder ser medida.

### **Voltaje y amperaje:**

Se utilizará un multímetro digital para medir el voltaje (V) y el amperaje (A) producidos por el generador. Las mediciones se podrían realizar de manera automática por medio de una implementación de placa Arduino o de manera manual. Estos se deberán medir a la altura

del generador ubicado en A.

Además, se debe mencionar que en el punto B se deberá medir la distancia al foco de la parábola de tal forma de determinar la posición relativa de la tapa del pistón al punto focal.

Las directrices proporcionadas aseguran una medición adecuada y repetible de las variables críticas en el funcionamiento del motor Stirling tipo  $\beta$ . Lo anterior permitirá un análisis detallado del desempeño del motor bajo diferentes condiciones de operación y variaciones en poder solar concentrado. A continuación se presenta en la figura 5.23 un ejemplo de montaje de termocupla en una red de vapor y un generador conectado a una máquina de vapor por medio de una correa, fotografía perteneciente al laboratorio de central térmica a vapor.

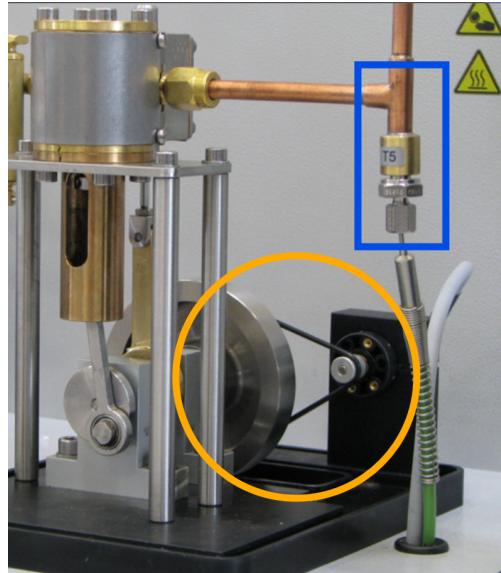


Figura 5.23: Ejemplo de instrumentalización en una máquina de vapor. En azul zona de termocupla y en amarillo conjunto volante de inercia correa generador.

Además, se agrega un ejemplo de como podría ser un sistema de adquisición de datos por medio de la implementación de una placa Arduino en la figura 5.24, donde se posee un panel LCD para ver la información en tiempo real y una perilla para poder variar parámetros y opciones seleccionadas.



Figura 5.24: Panel de control con LCD y perilla de ejemplo [30].



## 5.5. Guía de laboratorio

Se elaboró una guía de laboratorio, está diseñada para orientar a los estudiantes en la elaboración de un reporte técnico basado en la experimentación con un motor Stirling  $\beta$  utilizando un concentrador solar parabólico. Esta actividad práctica tiene como objetivo profundizar en los principios termodinámicos y mecánicos que rigen el funcionamiento de este tipo de motor, así como en la aplicación de la energía solar.

El documento disponible en Anexo E, comienza con indicaciones sobre el formato del reporte, dando directrices básicas de este. Para luego, tratar el marco teórico, donde se debe explicar el ciclo termodinámico del motor Stirling tipo  $\beta$  y su mecanismo de funcionamiento, detallando componentes esenciales como el pistón y el desplazador. Además, se debe describir la geometría y el funcionamiento de un disco parabólico. Esta sección proporciona la base teórica necesaria para comprender la actividad experimental.

Se solicita generar una descripción de la actividad realizada, es esencial para que cualquier lector entienda claramente qué equipo se estudió, cuáles fueron sus componentes y cómo se llevó a cabo la instalación y la instrumentación. Se espera que los alumnos detallen paso a paso el procedimiento seguido durante el experimento: desde montar el concentrador solar en el campo, verificar la posición del sol, ajustar la posición del motor, hasta registrar las mediciones y desarmar el montaje al finalizar.

En un laboratorio del área de ingeniería es fundamental incluir una memoria de cálculo para detallar todas las ecuaciones utilizadas en los cálculos pertinentes. Se espera que los alumnos puedan entender las ecuaciones utilizadas y desarrollarlas en los resultados del reporte, de tal manera asegurando una comprensión completa de la base teórica.

Luego se deben presentar los resultados obtenidos del experimento, por medio de gráficos y tablas, con cada valor acompañado de su respectiva unidad de medida y un error esperado. En particular, se requiere la construcción de gráficos que muestren el torque, la potencia, la eficiencia y la diferencia de temperatura entre las fuentes caliente y fría, en función de las RPM del motor.

Finalmente, se solicita los alumnos generen un análisis y discusión de los resultados, permitiendo interpretar los datos obtenidos, describir y analizar los fenómenos observados, comparándolos con la teoría y las simulaciones realizadas disponibles en Anexo C.2, así comentando sobre las posibles fuentes de error que podrían haber afectado los resultados del laboratorio.

# Capítulo 6

## Conclusiones

El presente trabajo ha abordado el diseño y dimensionamiento de un concentrador solar de disco parabólico Stirling, con la finalidad de desarrollar una herramienta docente para el laboratorio de energía del departamento de Ingeniería Mecánica.

Como objetivo general se tenía dimensionar y concebir un sistema de energía solar basado en un concentrador de disco parabólico Stirling, diseñado específicamente para su uso en un entorno docente. Para lograr este objetivo, se establecieron varios objetivos específicos que guiaron el desarrollo del proyecto. Se dimensionó completamente el disco parabólico, determinando que la potencia requerida al eje del motor debería estar en el rango de 5 a 15 W. Se optó por utilizar aire como fluido de trabajo y una configuración de motor tipo  $\beta$ . Con estos valores definidos, se calculó la irradiancia disponible en las inmediaciones de la facultad y se realizó una modelación de segundo orden que proporcionó las curvas de potencia para el motor dimensionado bajo las condiciones de temperatura establecidas. Posteriormente, se procedió al diseño del disco parabólico Stirling, del cual se generaron múltiples planos y un archivo CAD que podrá ser utilizado para la instrumentación del equipo en los puntos de medición designados en el proyecto.

El montaje experimental diseñado generó resultados esperados con el modelo desacoplado, que se encuentran disponibles en los Anexos de este trabajo, junto con una guía de laboratorio que establece las bases para realizar una experiencia educativa con este montaje experimental. Cabe mencionar que estos resultados son basándose en el modelo usado y considerando las precauciones pertinentes, pues se realizaron ciertas asunciones con respecto al intercambio de calor a manera de obtener resultados.

Utilizar un concentrador solar Stirling a escala reducida en entornos docentes proporciona una herramienta valiosa para enseñar los principios de la conversión de energía solar a energía mecánica y eléctrica. Este enfoque práctico facilita la comprensión de conceptos teóricos y promueve la innovación y el interés en soluciones energéticas sostenibles. Además, se espera que una vez finalizado este trabajo, haya continuidad en el proyecto. Otros estudiantes podrían proceder con la manufactura e instrumentación de este trabajo y, en el futuro, los alumnos del departamento podrían utilizar este montaje como parte de las experiencias de laboratorio del curso ME-5240 Laboratorio de Energía.

El desarrollo e implementación del concentrador solar de disco parabólico Stirling como herramienta docente no solo contribuye al avance de la investigación en energías renovables, sino que también proporciona una experiencia educativa práctica y sostenible para los estudiantes de ingeniería mecánica. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la energía solar, promoviendo un futuro más verde y sostenible.

# Bibliografía

- [1] Ministerio de Energia, “Transición energética de Chile 2050”, 2022, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen\\_2050\\_-\\_actualizado\\_marzo\\_2022\\_0.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf).
- [2] Vázquez, M., “Una brevísima historia de la arquitectura solar”, 1995, <https://polired.upm.es/index.php/boletincfs/article/viewFile/2280/2362>.
- [3] Pveducation, “Células solares iniciales”, 1995, <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/diseño-de-células-de-silicio/células-solares-iniciales>.
- [4] ElTiempo, “¿cuánta energía produce el sol y de donde proviene?”, 2022, <https://www.eltiempo.es/noticias/cuanta-energia-produce-el-sol-y-de-donde-proviene>.
- [5] Naciones Unidas, “La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI”, 2021, <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>.
- [6] Globalsolaratlas, “Mapa de recurso solar global”, 2019, <https://globalsolaratlas.info/download/world>. Revisado 2024.
- [7] Ministerio de Energia, “Explorador solar”, 2017, <https://solar.minenergia.cl>.
- [8] Arquitectura Pura, “¿qué es una carta solar y cómo hacerla?”, 2020, <https://arquitectura.pura.com/arquitectura/carta-solar/16458/>.
- [9] Mark, J., “Astronomía griega”, 2022, <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-12040/astronomia-griega/>.
- [10] Sunearthtools, “Carta solar con respecto a un punto”, 2024, [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=es](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es).
- [11] Panaroni, D. H., “Determinación de la eficiencia óptica de un colector disco parabólico prototipo”, 2021, [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012021000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012021000200001).
- [12] Sánchez, J., “Modelación numérica, diseño, construcción y análisis experimental del desempeño de un motor Stirling de baja entalpía”, 2012, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112342>.
- [13] Reyes, J., “Modelado de un colector solar parabólico con motor Stirling para uso doméstico y pequeña industria”, 2018, [https://somim.org.mx/memorias/memorias2018/articulos/A4\\_48.pdf](https://somim.org.mx/memorias/memorias2018/articulos/A4_48.pdf).
- [14] NREL, “Software Soltrace”, 2024, <https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html>.
- [15] Miao, M., “Stirling engine for solar thermal electric generation”, 2016, <https://www.proquest.com/openview/5597af6b2d0b9dc05e8bb6d96c039a25/1?pq-origsite=gscholar&c>

bl=18750.

- [16] Rahmati, A., “Dimensional synthesis of the stirling engine based on optimizing the output work by evolutionary algorithms”, 2020, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720303310>.
- [17] Asemi, H., “Experimental investigation of gamma stirling refrigerator to convert thermal to cooling energy utilizing different gases”, 2023, <https://fupubco.com/futech/article/view/56>.
- [18] Stirling, R., “Ilustración motor stirling”, 1816, [https://es.wikipedia.org/wiki/Motor\\_Stirling#/media/Archivo:Robert\\_Stirling's\\_engine\\_patent-retouched.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling#/media/Archivo:Robert_Stirling's_engine_patent-retouched.png).
- [19] YANMAR, “Development of zero emission generating system “stirling engine”, 2017, [https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical\\_review/2017/0127\\_5.html](https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical_review/2017/0127_5.html).
- [20] Caleb, C., “A low temperature differential stirling engine for power generation”, 2009, <https://ir.canterbury.ac.nz/server/api/core/bitstreams/281a7e12-fae9-4cd9-b1ab-40b3944f0ea6/content>.
- [21] Karabulut, H., “An experimental study on the development of a  $\beta$ -type stirling engine for low and moderate temperature heat sources”, 2009, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261908000962>.
- [22] Silva, P., “Uso del ciclo stirling para generación de energía eléctrica a partir de fuentes de calor geotérmicas de baja entalpía en puyuhuapi”, 2022, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184593>.
- [23] Cheng, N., “Review of stirling-engine mathematical models”, 1983, <https://www.osti.gov/biblio/5948203>.
- [24] Ruelas, J., “Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor stirling fijo”, 2011, [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-7381201100010003](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-7381201100010003).
- [25] Carrascosa, J., “Papel de la actividad experimental en la educación científica”, 2006, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5166022>.
- [26] Urieli, I., “Stirling cycle machine analysis”, 2020, <https://people.ohio.edu/trembly/mechanical/stirling/index.html>.
- [27] Karabulut, H., “Torque and power characteristics of a helium charged stirling engine with a lever controlled displacer driving mechanism”, 2010, [https://www.researchgate.net/publication/245189988\\_Torque\\_and\\_power\\_characteristics\\_of\\_a\\_helium\\_charged\\_Stirling\\_engine\\_with\\_a\\_lever\\_controlled\\_displacer\\_driving\\_mechanism](https://www.researchgate.net/publication/245189988_Torque_and_power_characteristics_of_a_helium_charged_Stirling_engine_with_a_lever_controlled_displacer_driving_mechanism).
- [28] González, R., “Diseño mecánico del disco parabólico de un concentrador solar y la caracterización térmica del receptor”, 2014, <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/5477/1/tesis.pdf>.
- [29] Cheng, C.-H., “Dynamic simulation of a beta-type stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models”, 2011, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110003472>.
- [30] techadvisor, “Creality 3d ender 3 review”, 2018, <https://www.techadvisor.com/article/719238/creality-3d-ender-3-review.html>.

# Anexos

## Anexo A. Configuraciones utilizadas en SolTrace

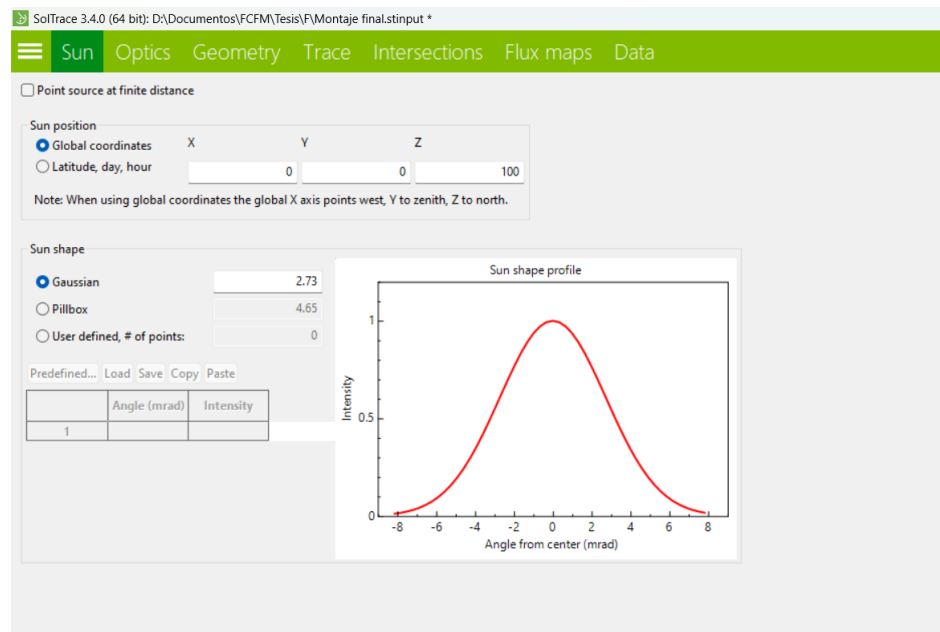


Figura A.1: Configuraciones de rayos solares generados para la simulación.

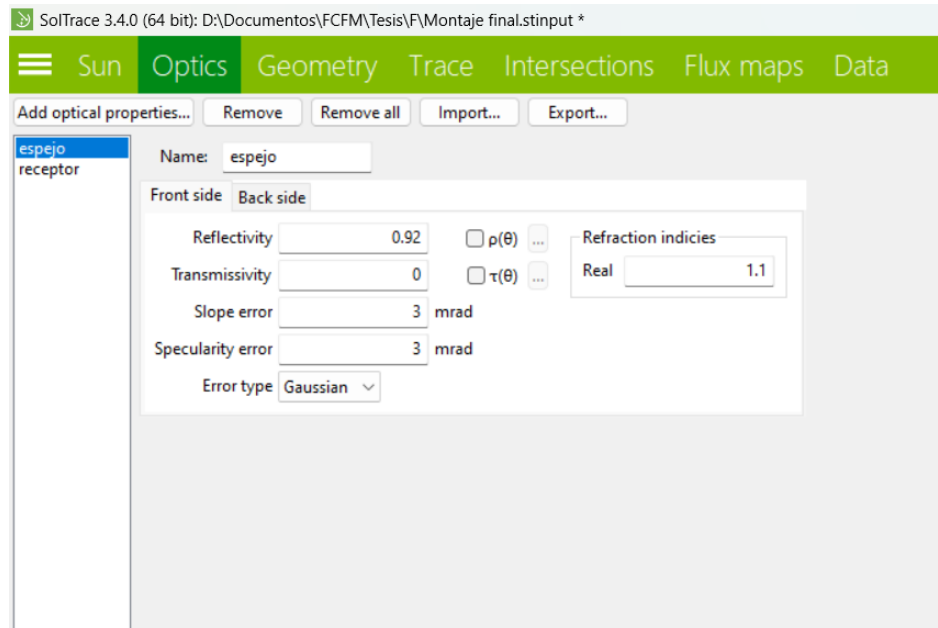


Figura A.2: Configuraciones ópticas de reflectividad, transmisividad y errores ópticos.

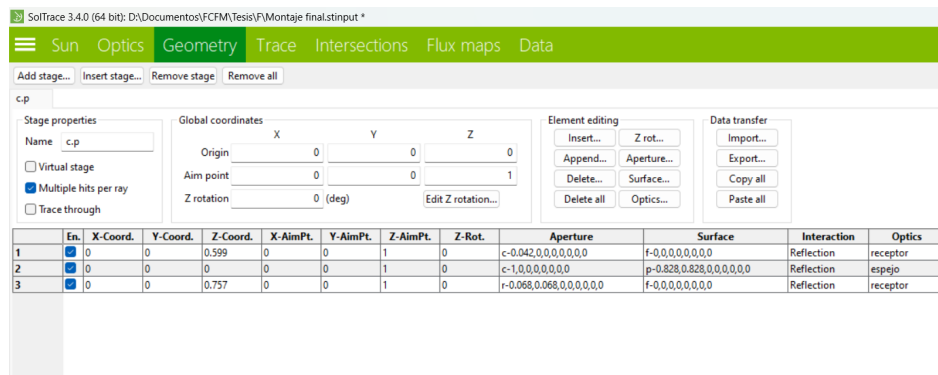


Figura A.3: Configuraciones geométricas consideradas para la simulación. Incluye en orden: tapa motor Stirling, parábola y carcasa del motor.

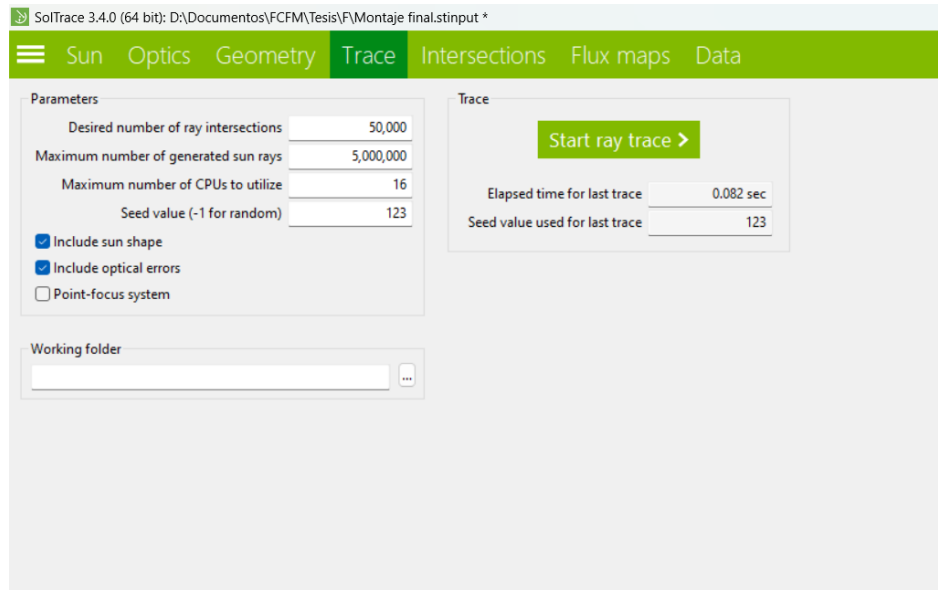


Figura A.4: Configuraciones de trazado de rayos solares.

## Anexo B. Estructura de archivos MATLAB modelo Urieli

En el siguiente diagrama de flujo vemos que el programa principal sea (análisis del motor stirling) define primero el sistema que se va a simular en términos del conjunto de variables globales establecidas por el conjunto de funciones define, como se ha descrito anteriormente. A continuación, invoca la función *adiabatic*, que realiza una simulación adiabática ideal, o la función *simple*, que realiza una simulación *simple* para evaluar los efectos de la transferencia de calor y la pérdida de carga. El conjunto de funciones “*simple*” incluye nueve funciones, todas contenidas en archivos *m* separados como se muestra. Las cuatro funciones principales son *hotsim* y *kolsim* para evaluar respectivamente las temperaturas del calentador y del gas refrigerante, *regsim* para evaluar la eficacia del Regenerador y la pérdida de entalpía resultante, y *worksim* para evaluar la pérdida de bombeo. El conjunto de funciones de transferencia de calor/fricción de flujo incluye la función *reynum* para evaluar el número de Reynolds instantáneo, y las tres funciones *pipefr*, *foilfr* y *matrixfr* para determinar los distintos coeficientes de fricción de flujo y transferencia de calor [26].

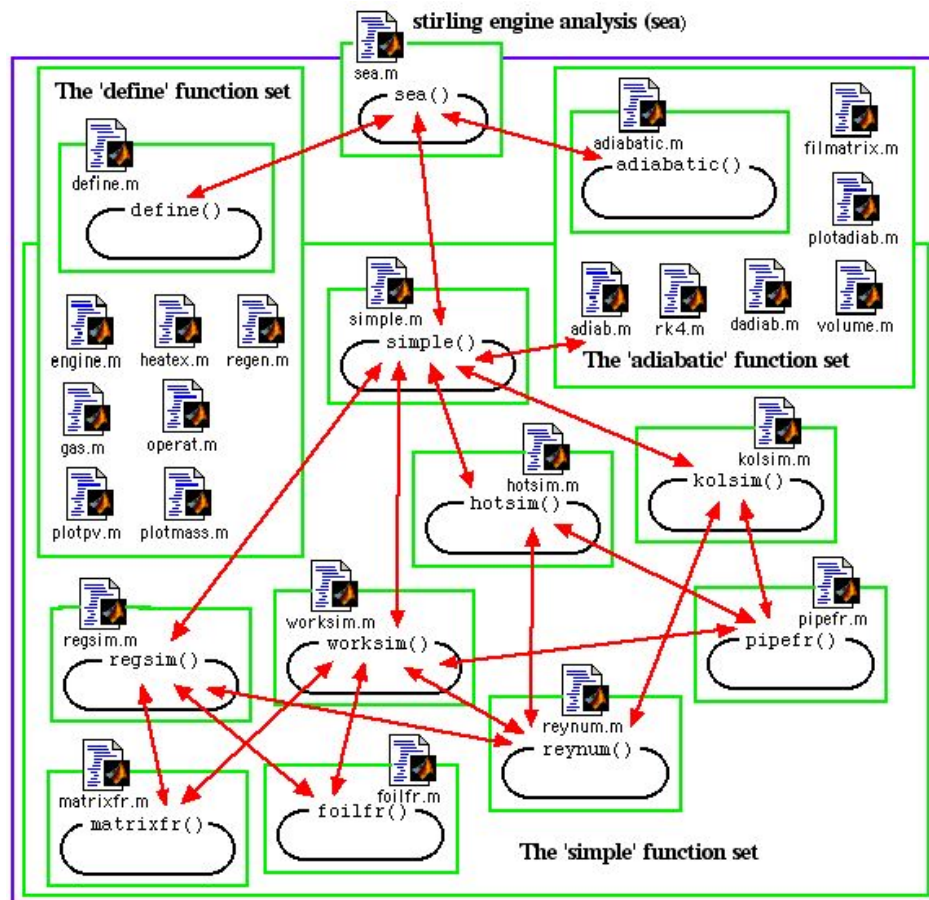


Figura B.1: Estructura de archivos modelo simple [26].



# Anexo C. Dimensionamiento de motor Stirling

## C.1. Condiciones iniciales entregadas al modelo

Tabla C.1: Valores entregados al programa de Urieli para las simulaciones (convertir a formato .dat).

Valor de entrada	100 %	80 %	60 %	50 %
Tipo de configuración	b	b	b	b
Carrera del pistón [mm]	6,0,E-02	4,8,E-02	3,6,E-02	3,0,E-02
Carrera del desplazador [mm]	7,9,E-02	6,3,E-02	4,7,E-02	4,0,E-02
Ángulo de avance	9,5,E+01	9,5,E+01	9,5,E+01	9,5,E+01
Diámetro pistón [mm]	7,0,E-02	5,6,E-02	4,2,E-02	3,5,E-02
Diámetro desplazador [mm]	6,9,E-02	5,5,E-02	4,1,E-02	3,5,E-02
Diámetro varilla de conexión desplazador [mm]	0,0,E+00	0,0,E+00	0,0,E+00	0,0,E+00
Volumen muerto en compresión [mm <sup>3</sup> ]	2,0,E-06	1,0,E+10	4,3,E+08	2,5,E-07
Volumen muerto en expansión [mm <sup>3</sup> ]	2,0,E-06	1,0,E+10	4,3,E+08	2,5,E-07
Tipo de intercambiadores (slots)	s	s	s	s
Espesor aletas [mm]	2,0,E-03	1,6,E-03	1,2,E-03	1,0,E-03
Profundidad aletas [mm]	3,0,E-03	2,4,E-03	1,8,E-03	1,5,E-03
Espesor aletas [mm]	1,5,E-01	1,2,E-01	9,0,E-02	7,5,E-02
Cantidad de aletas	5,4,E+01	5,4,E+01	5,4,E+01	5,4,E+01
Tipo de Regenerador	a	a	a	a
Diámetro externo del motor [mm]	7,7,E-02	6,2,E-02	4,6,E-02	3,9,E-02
Diámetro interno del motor [mm]	7,5,E-02	6,0,E-02	4,5,E-02	3,8,E-02
Diámetro interno de la matriz [mm]	6,9,E-02	5,5,E-02	4,1,E-02	3,5,E-02
Altura del Regenerador [mm]	4,0,E-03	3,2,E-03	2,4,E-03	2,0,E-03
Matriz del Regenerador	n	n	n	n
Tipo de intercambiadores (slots)	s	s	s	s
Espesor aletas [mm]	2,0,E-03	1,6,E-03	1,2,E-03	1,0,E-03
Profundidad aletas [mm]	3,0,E-03	2,4,E-03	1,8,E-03	1,5,E-03
Espesor aletas [mm]	1,5,E-01	1,2,E-01	9,0,E-02	7,5,E-02
Cantidad de aletas	5,4,E+01	5,4,E+01	5,4,E+01	5,4,E+01
Fluido de trabajo (aire)	ai	ai	ai	ai

## C.2. Gráficos de diferentes condiciones

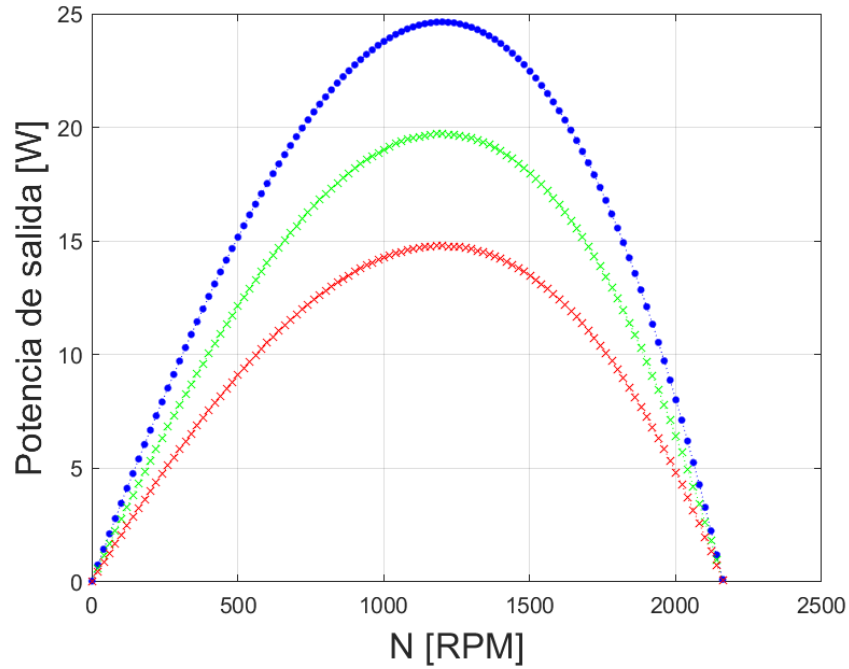


Figura C.1: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y fuente caliente a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

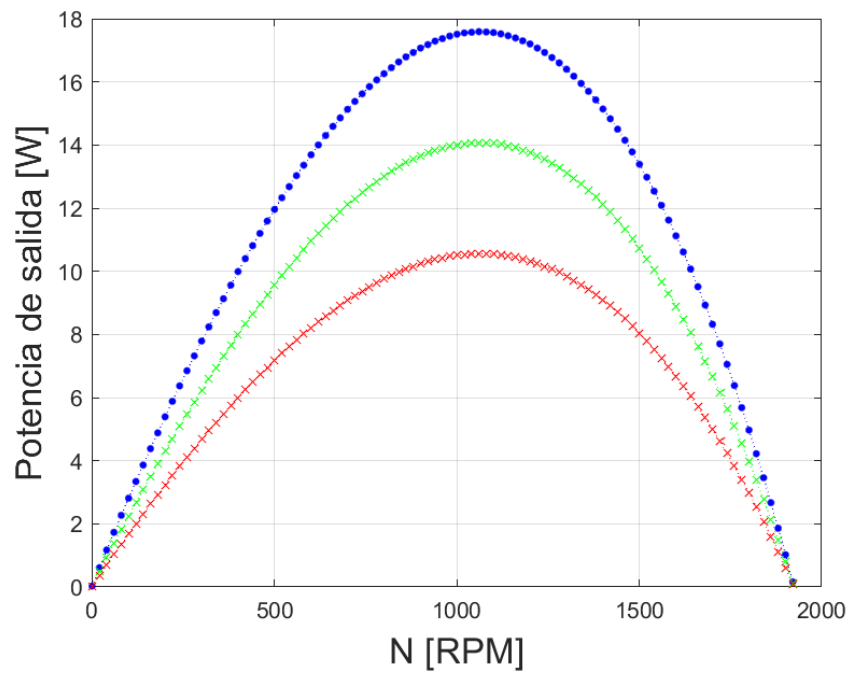


Figura C.2: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y fuente caliente a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

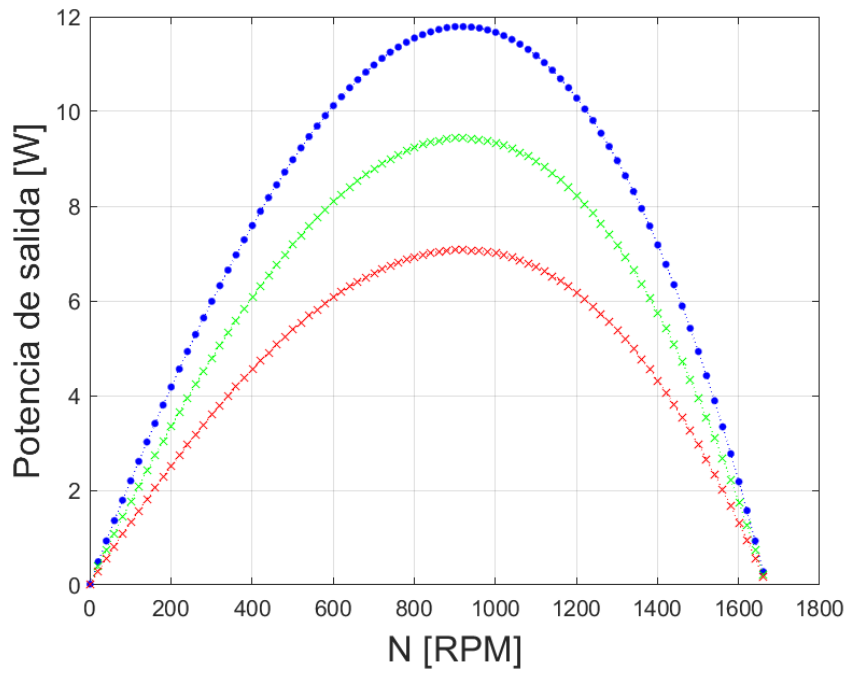


Figura C.3: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 350 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

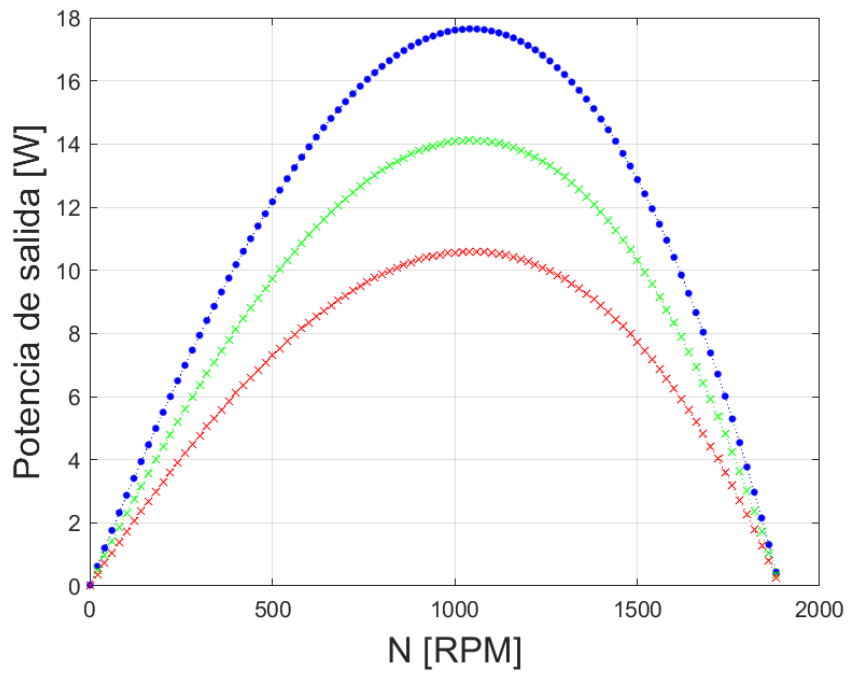


Figura C.4: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 300 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

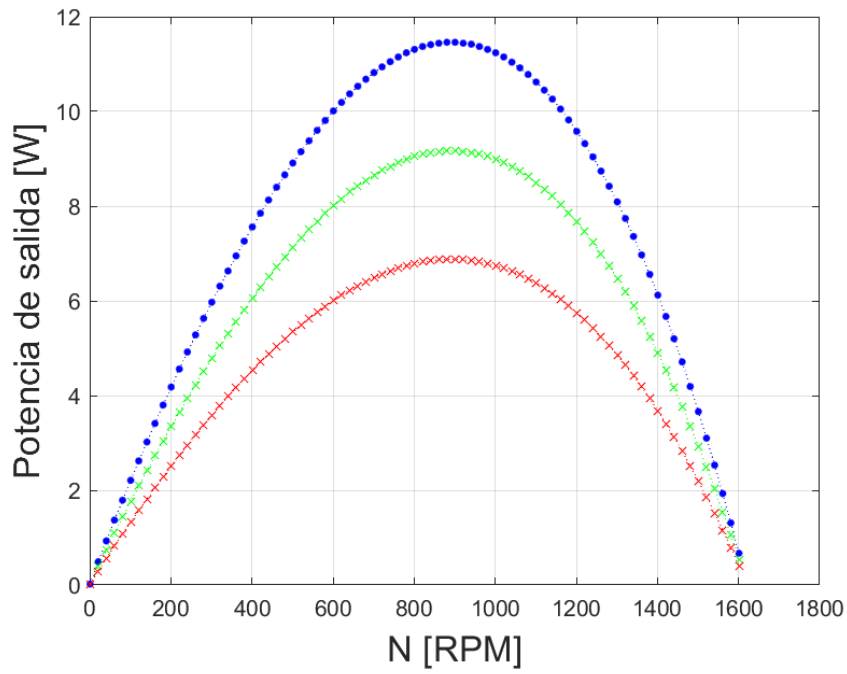


Figura C.5: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 300 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

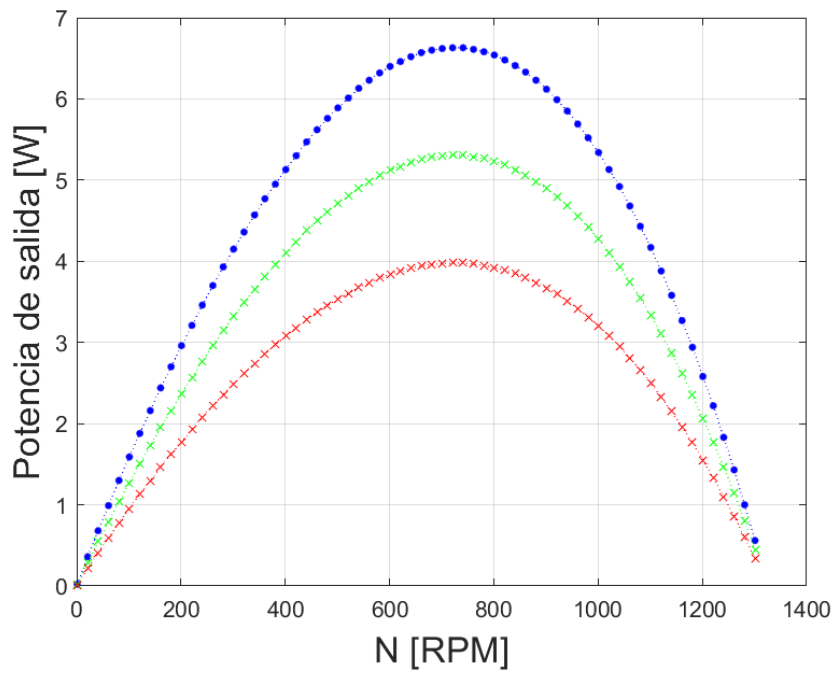


Figura C.6: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 300 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

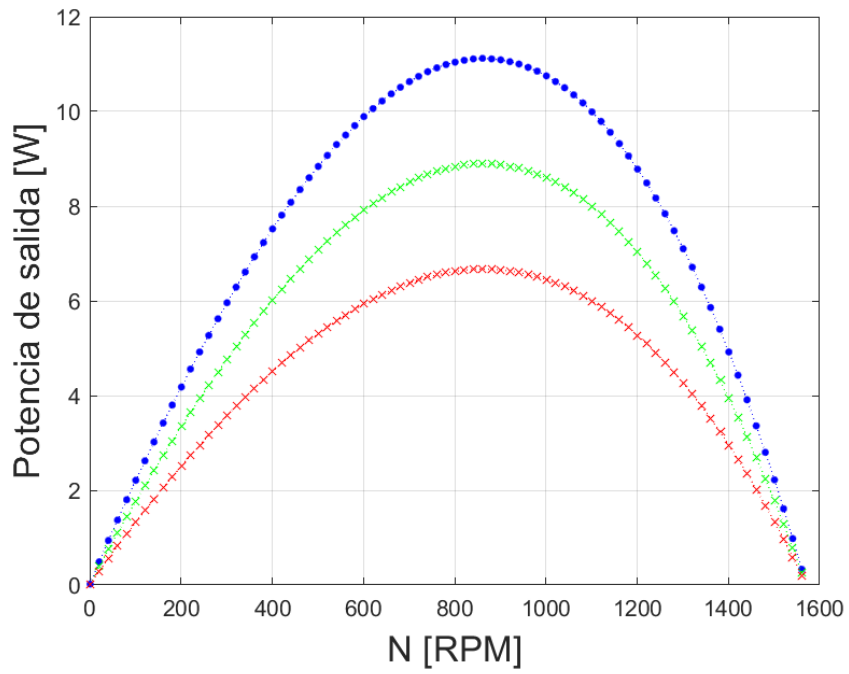


Figura C.7: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 250 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

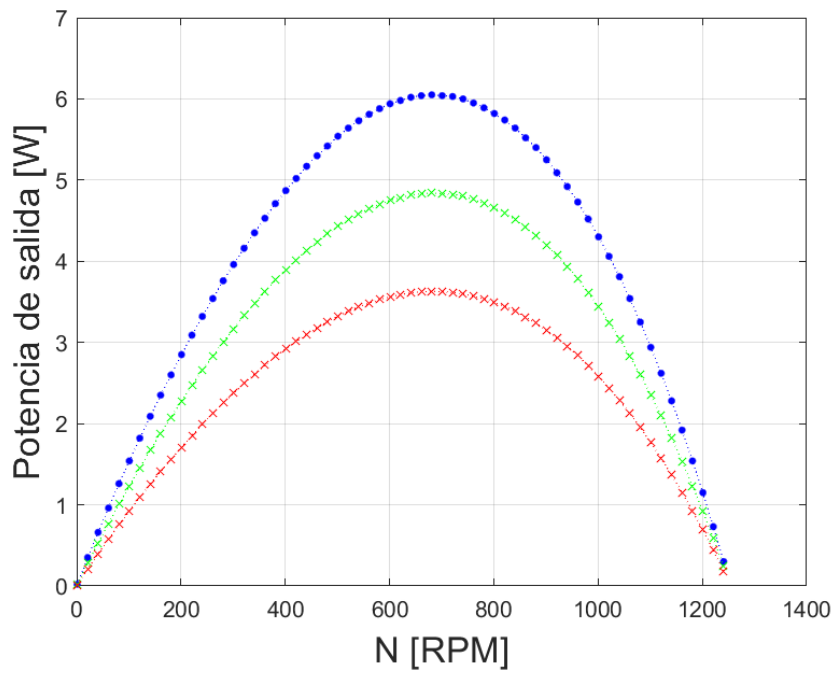


Figura C.8: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 250 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

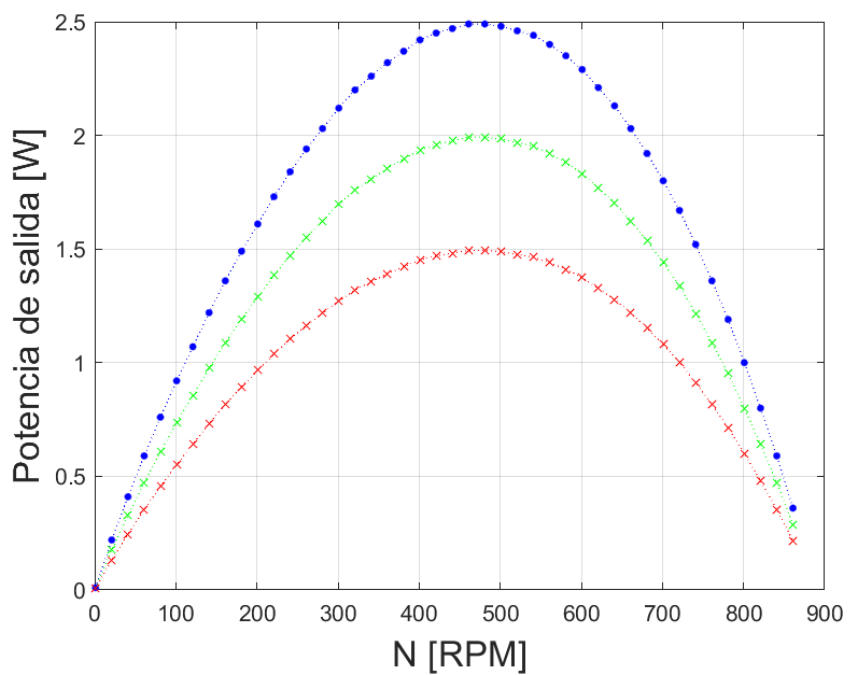


Figura C.9: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 250 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

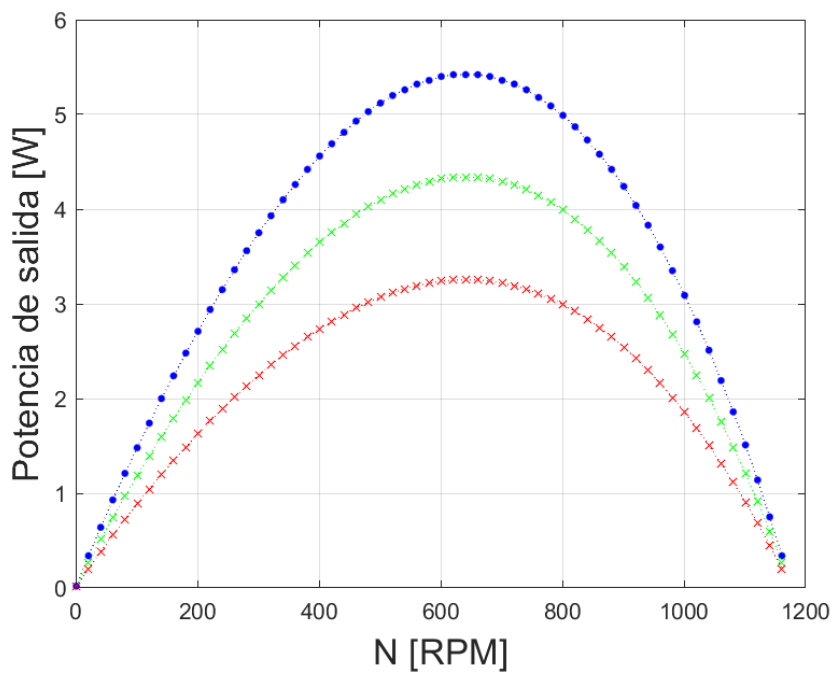


Figura C.10: Resultado motor  $\beta$  50 %, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 200 °C. Eficiencia mecánica: azul 100 %, verde 80 % y rojo 60 %.

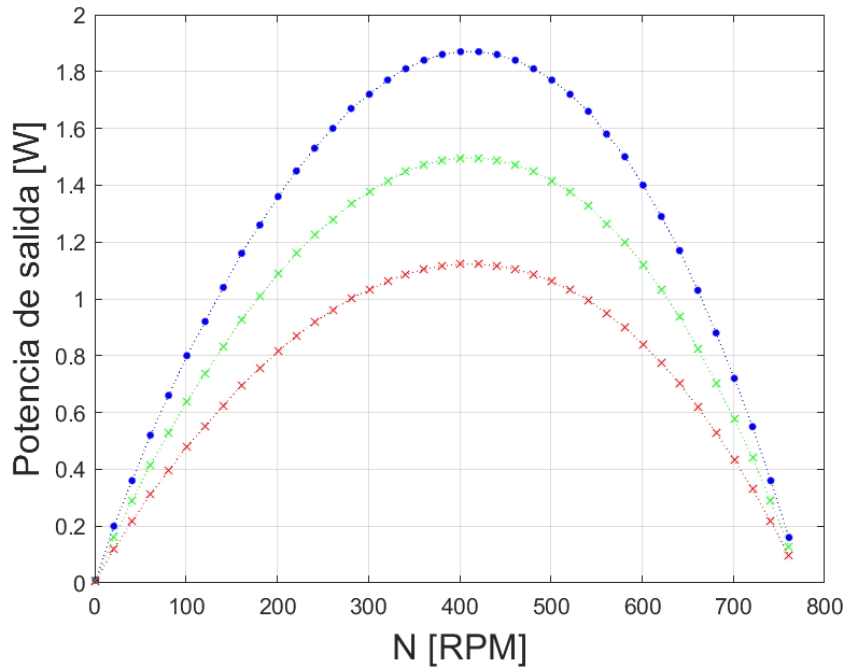


Figura C.11: Resultado motor  $\beta$  50%, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 200 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%.

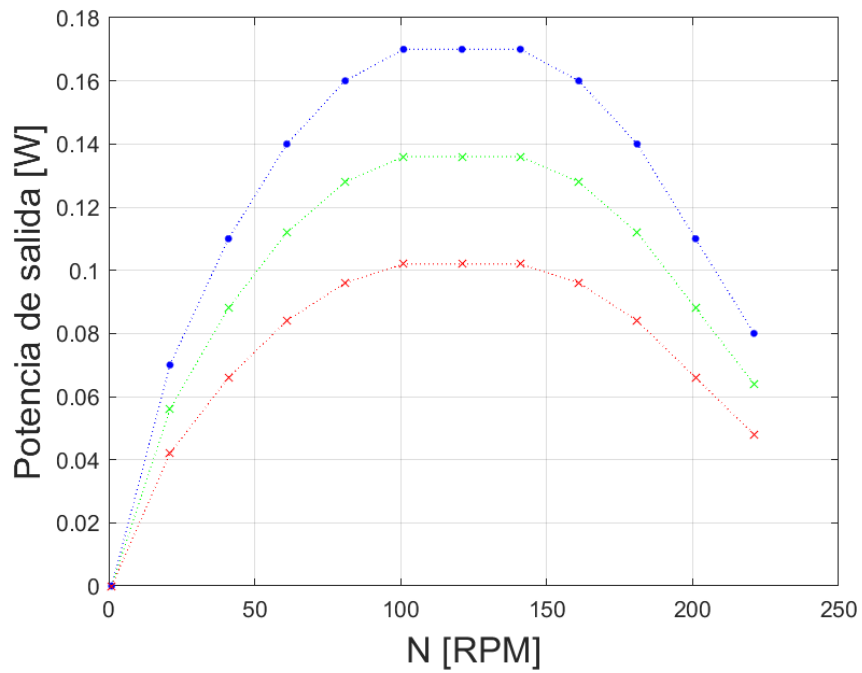


Figura C.12: Resultado motor  $\beta$  50%, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 200 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%.

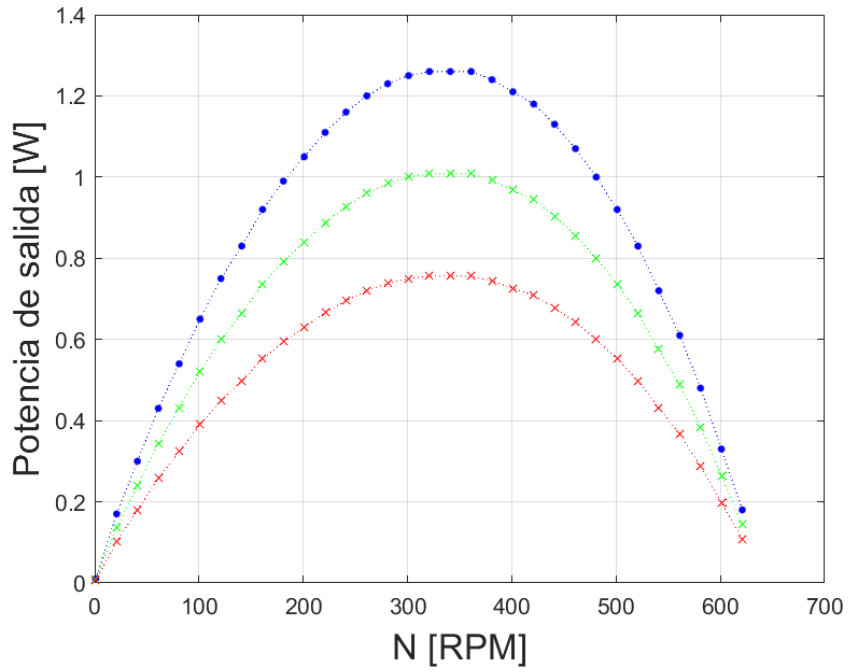


Figura C.13: Resultado motor  $\beta$  50%, con fuente fría a 30 °C y fuente caliente a 150 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%.

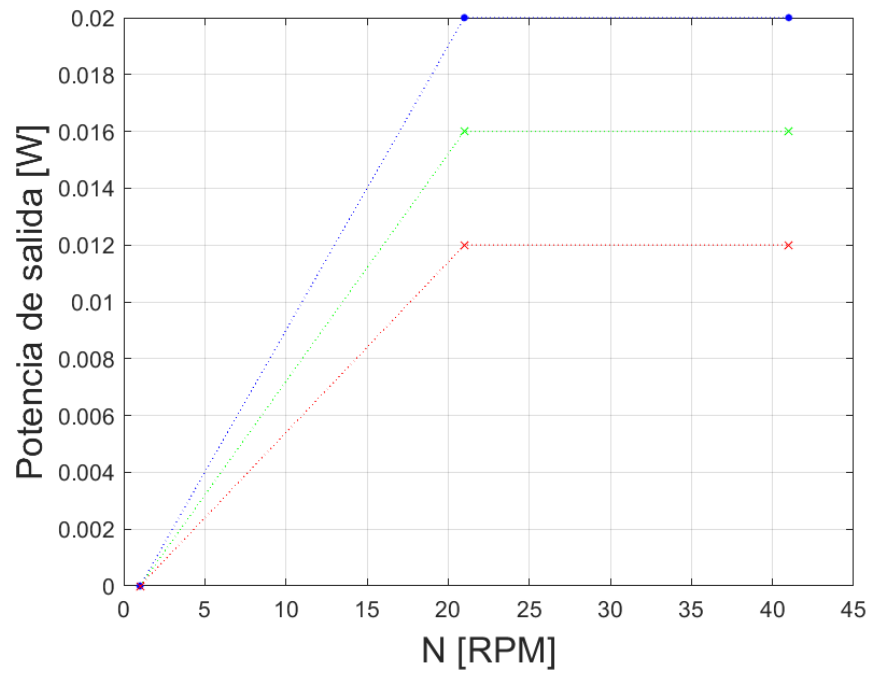


Figura C.14: Resultado motor  $\beta$  50%, con fuente fría a 60 °C y fuente caliente a 150 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60%.



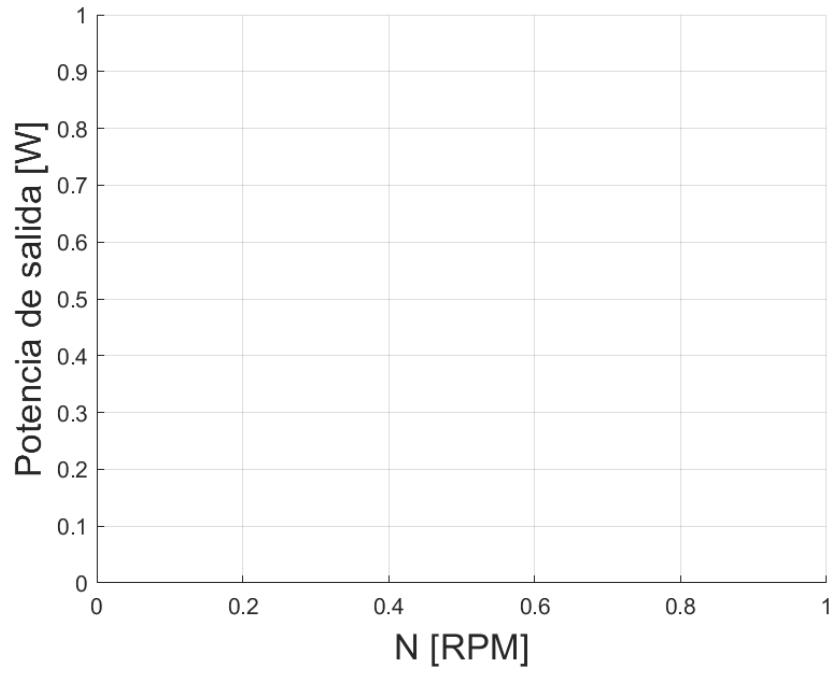
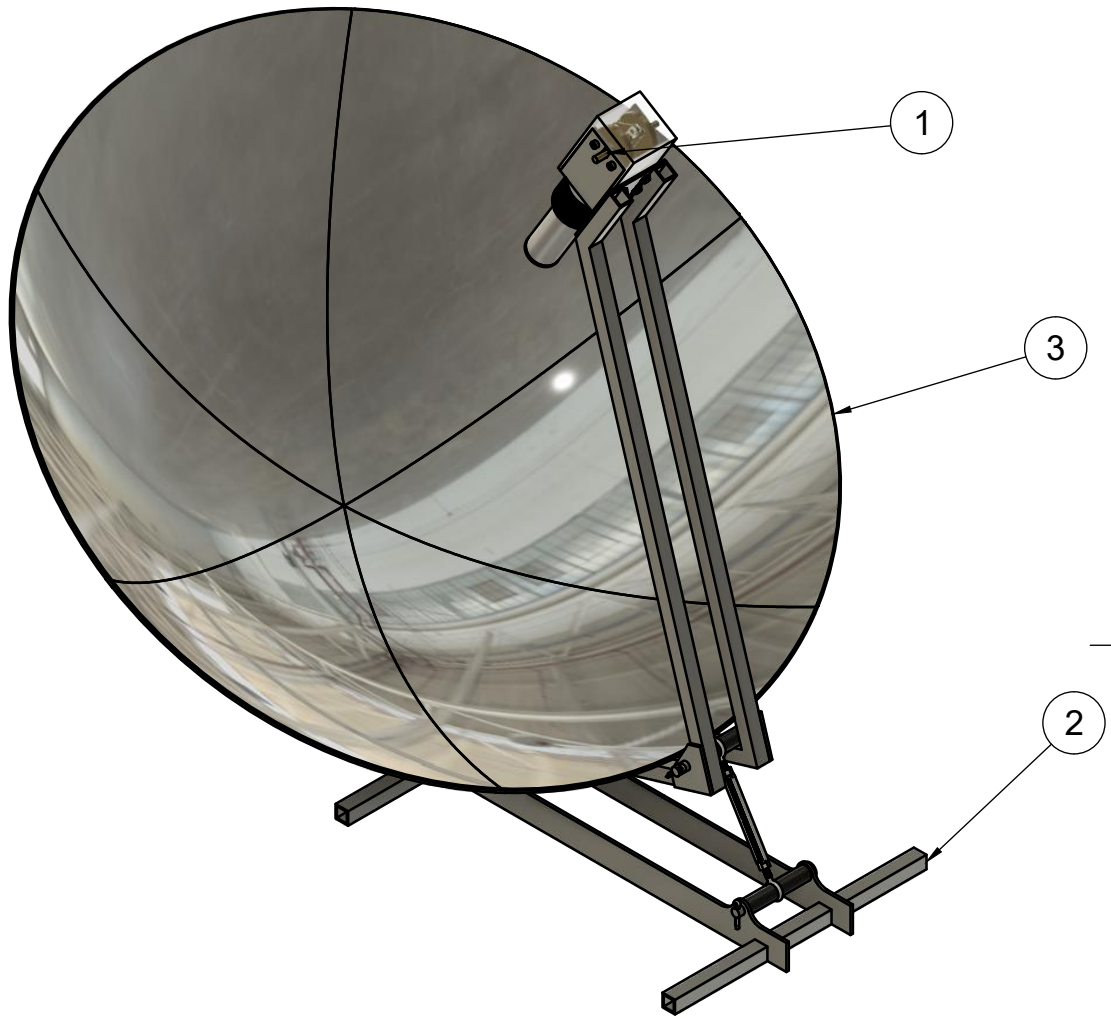


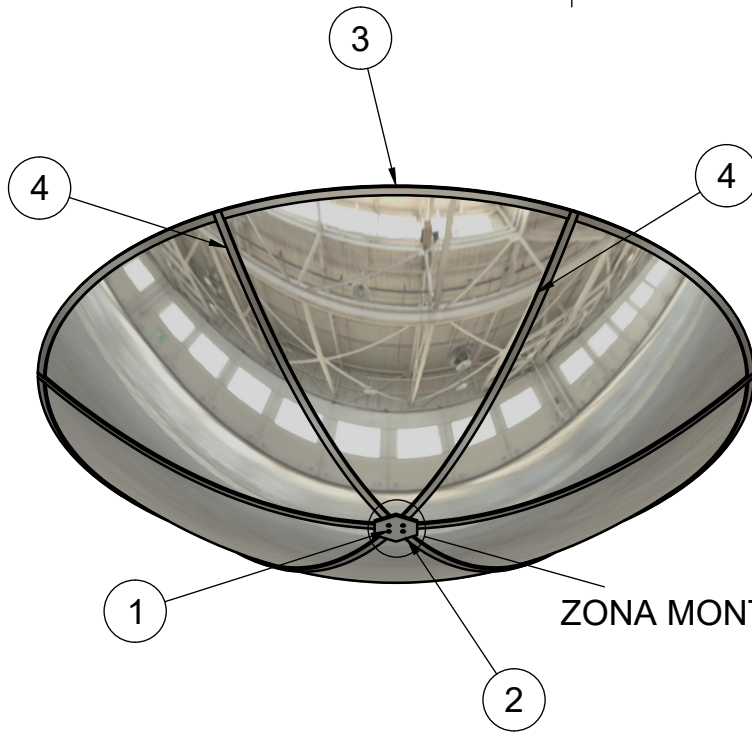
Figura C.15: Resultado motor  $\beta$  50%, con fuente fría a 90 °C y fuente caliente a 150 °C. Eficiencia mecánica: azul 100%, verde 80% y rojo 60% (Según el modelo el motor no debería girar).

## Anexo D. Planos

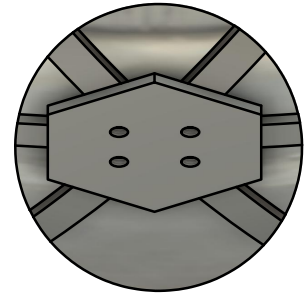


Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Motor Beta 50%
2	1	Montaje
3	1	Disco parabólico

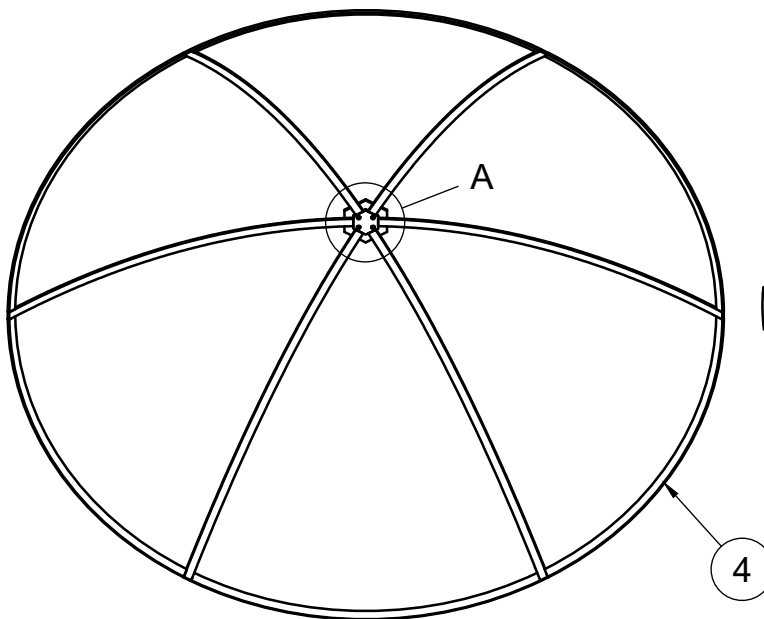
Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Stirling	1:8
		Pieza: Disco parabólico	1/4
		N° de plano:	A4
		Fecha:	25-06-2024



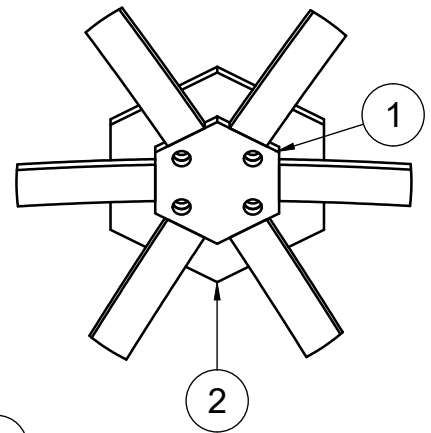
ZONA MONTAJE (1:2)



ZONA MONTAJE

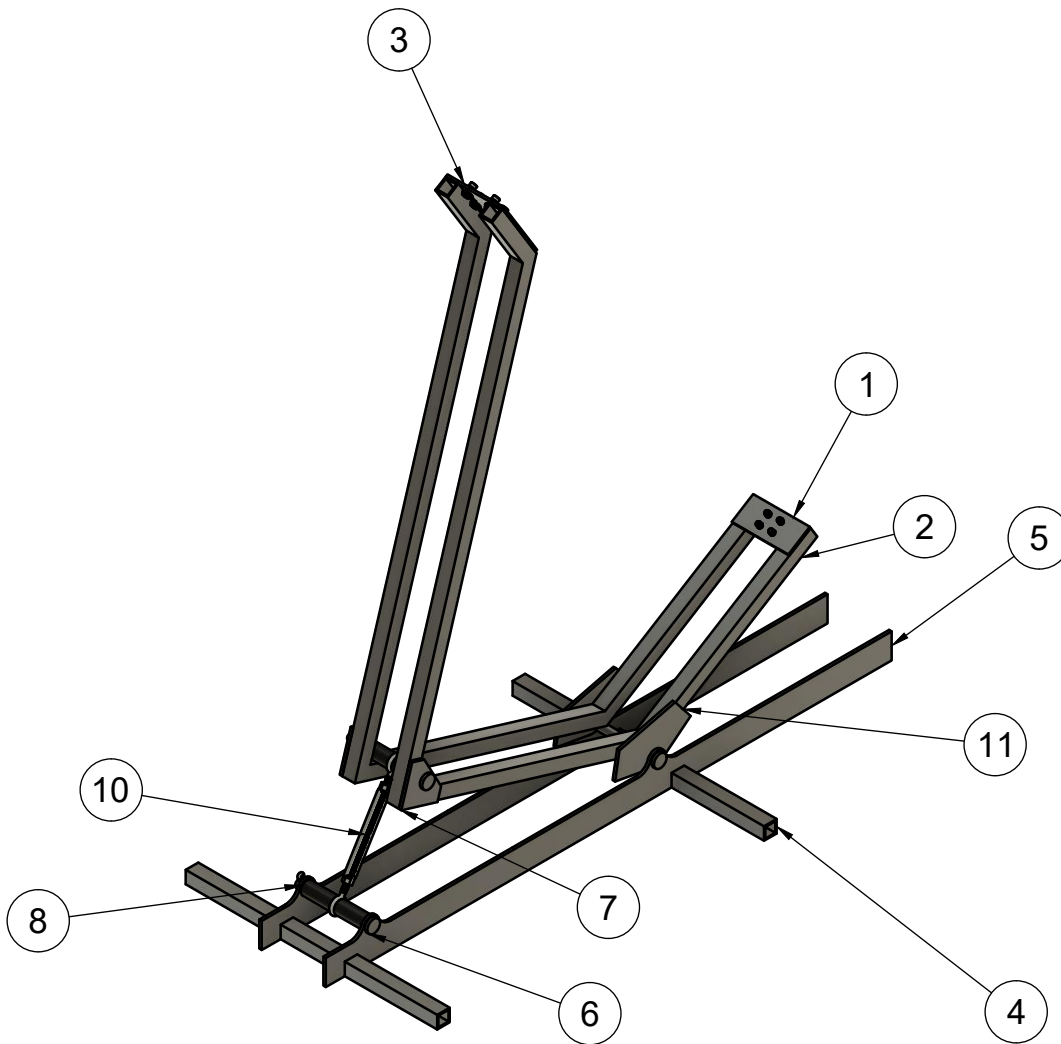


A (1:2)



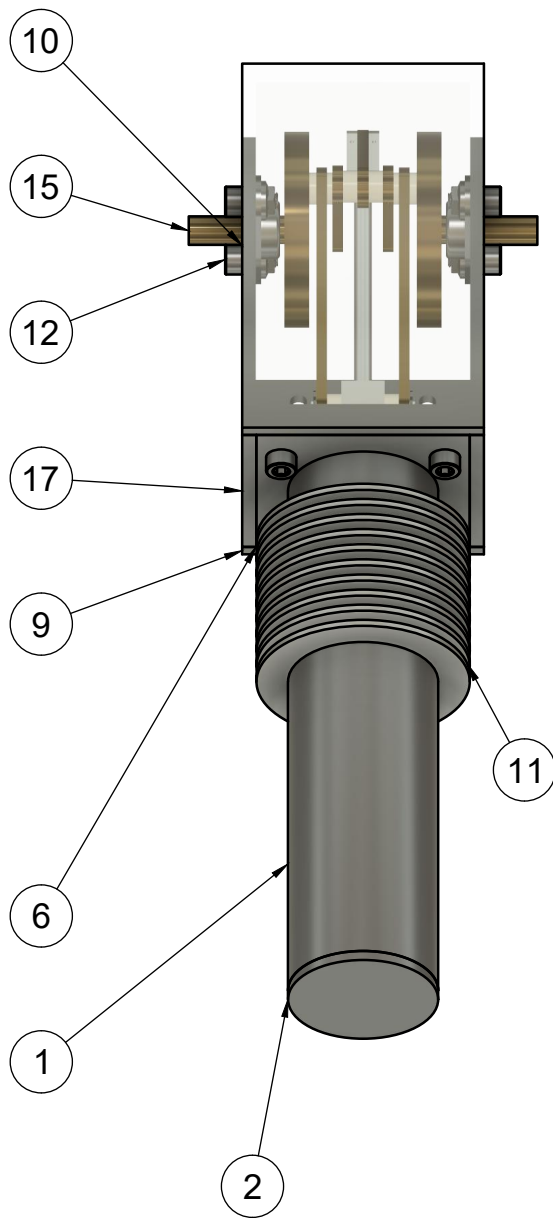
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Hexágono chico montaje
2	1	Hexágono grande montaje
3	1	Zonas reflectantes
4	1	Platinas

Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Stirling	1:10
		Pieza: Disco parabólico	N° de plano: 2/4
			Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas			Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza	elemento	ctd	nombre de pieza
10	1	Separadores	1	1	Placa montaje
			2	2	Barra soporte
			3	1	Placa unión motor
			4	2	Barra base
			5	2	Base
			6	3	Eje base
			7	2	Placa regulador angulo
			8	1	Componentes industriales montaje
			9	1	Placa eje

Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Stirling	1:20
		Pieza: Montaje	N° de plano: 3/4
			Fecha: 25-06-2024



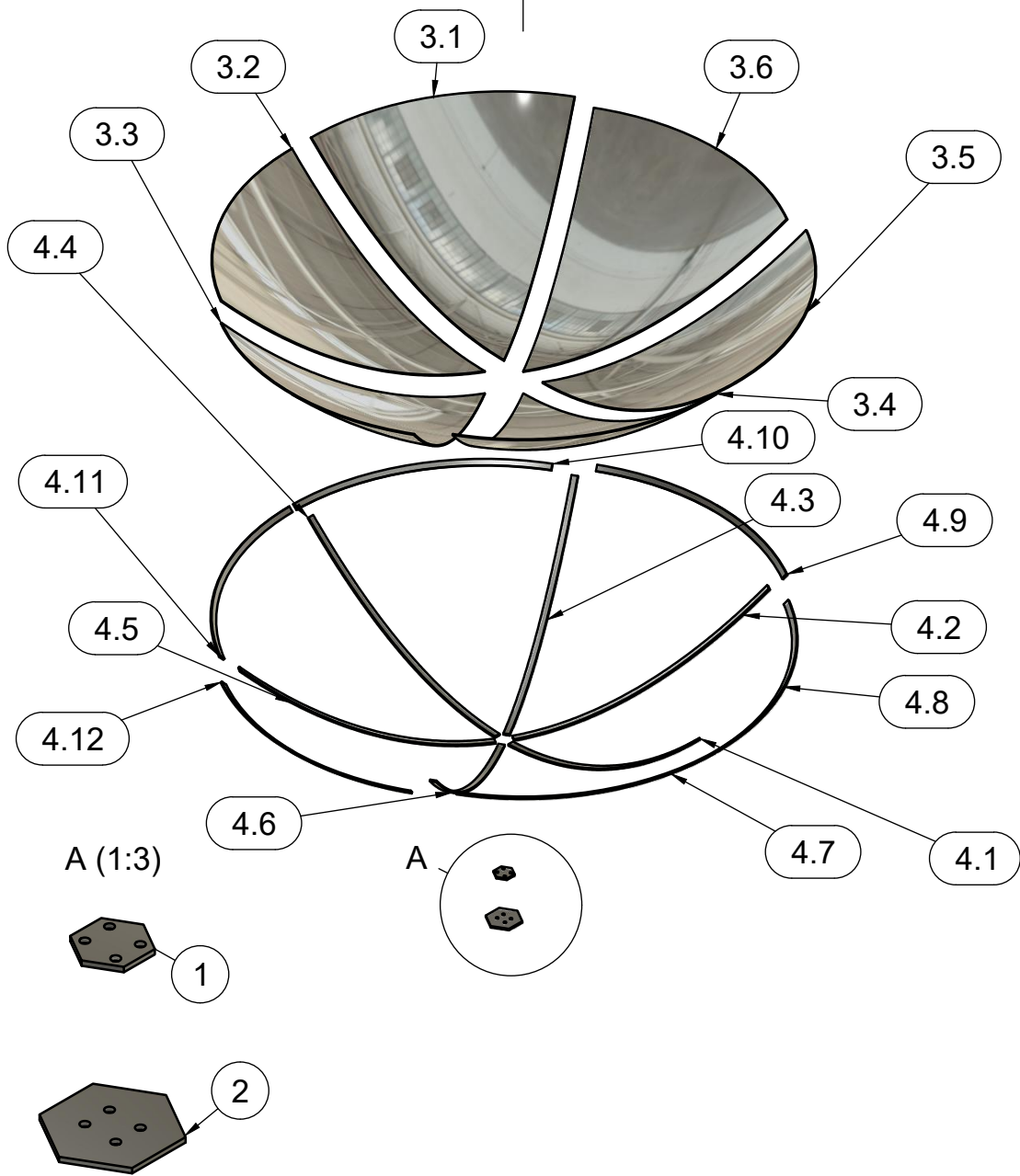
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Camisa pistón
2	1	Tapa camisa pistón
3	1	Desplazador
4	1	Biela desplazador
5	1	Placa unión camisa pistón
6	1	Placa unión camisa y eje
7	1	Pasador biela desplazador
8	1	Pasador desplazador
9	1	Placa de unión a montaje
10	1	Tapa de seguridad
11	1	Aletas
12	1	Componentes industriales
13	1	Separadores ejes
14	1	Bielas pistón
15	1	Eje volante de inercia
16	1	Brazo desplazador
17	1	Placas laterales
18	1	Barra desplazador y conector
19	1	Pistón conector

Diseñado por:  
Edgardo Merino

Departamento Ing. Mecánica  
FCFM, Universidad de Chile.

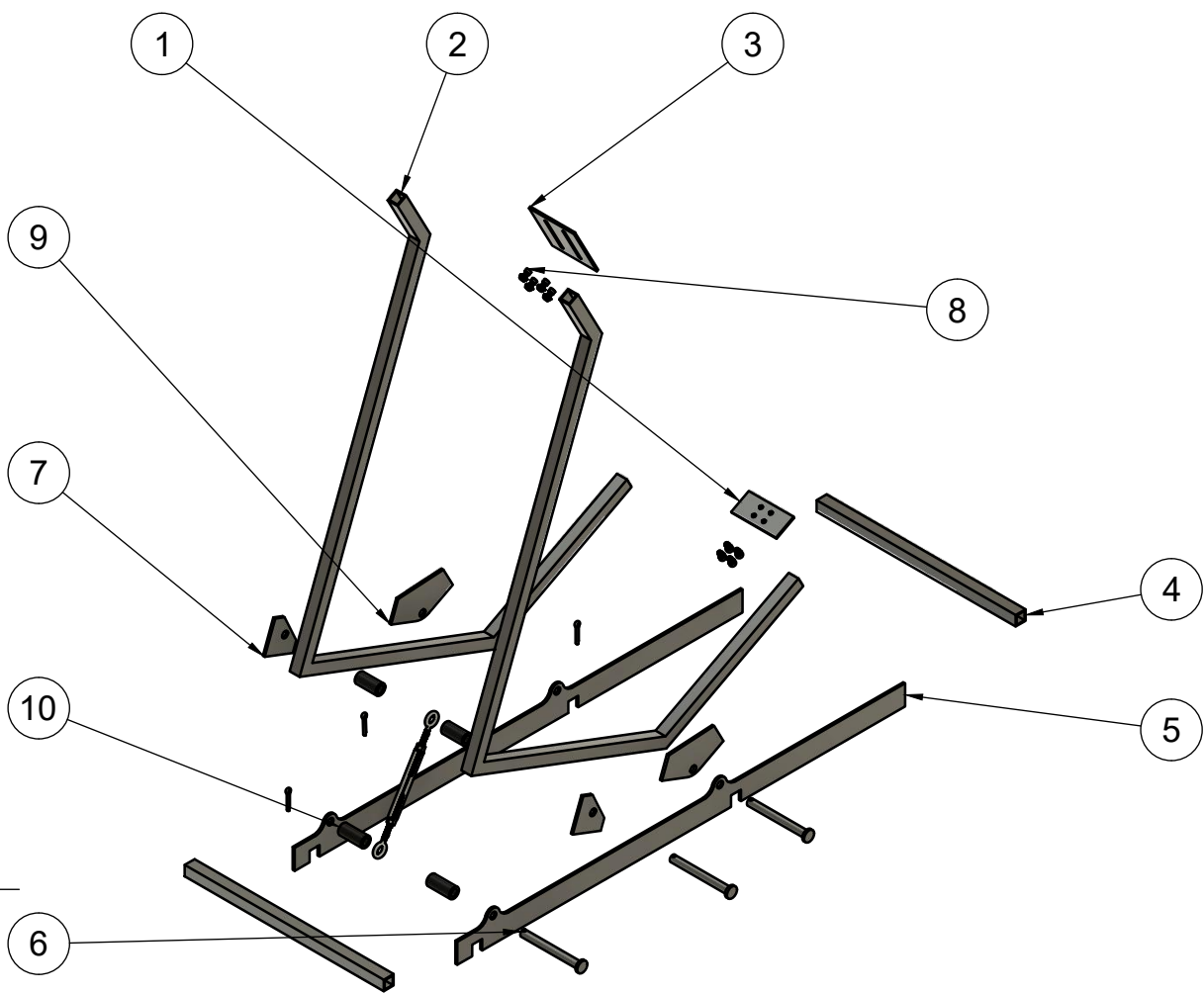
**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Disco parabólico Stirling	1:10	A4
Pieza: Motor Beta 50%	N° de plano: 4/4	Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas		Lista de piezas		Lista de piezas	
elemento	nombre de pieza	elemento	nombre de pieza	elemento	nombre de pieza
4.7	Platina circunferencia	3.6	Zona reflectante (5)	1	Hexágono chico montaje
4.8	Platina circunferencia (1)	4	Platinas	2	Hexágono grande montaje
4.9	Platina circunferencia (2)	4.1	Platina parábola	3	Zonas reflectantes
4.10	Platina circunferencia (3)	4.2	Platina parábola (1)	3.1	Zona reflectante
4.11	Platina circunferencia (4)	4.3	Platina parábola (2)	3.2	Zona reflectante (1)
4.12	Platina circunferencia (5)	4.4	Platina parábola (3)	3.3	Zona reflectante (2)
		4.5	Platina parábola (4)	3.4	Zona reflectante (3)
		4.6	Platina parábola (5)	3.5	Zona reflectante (4)

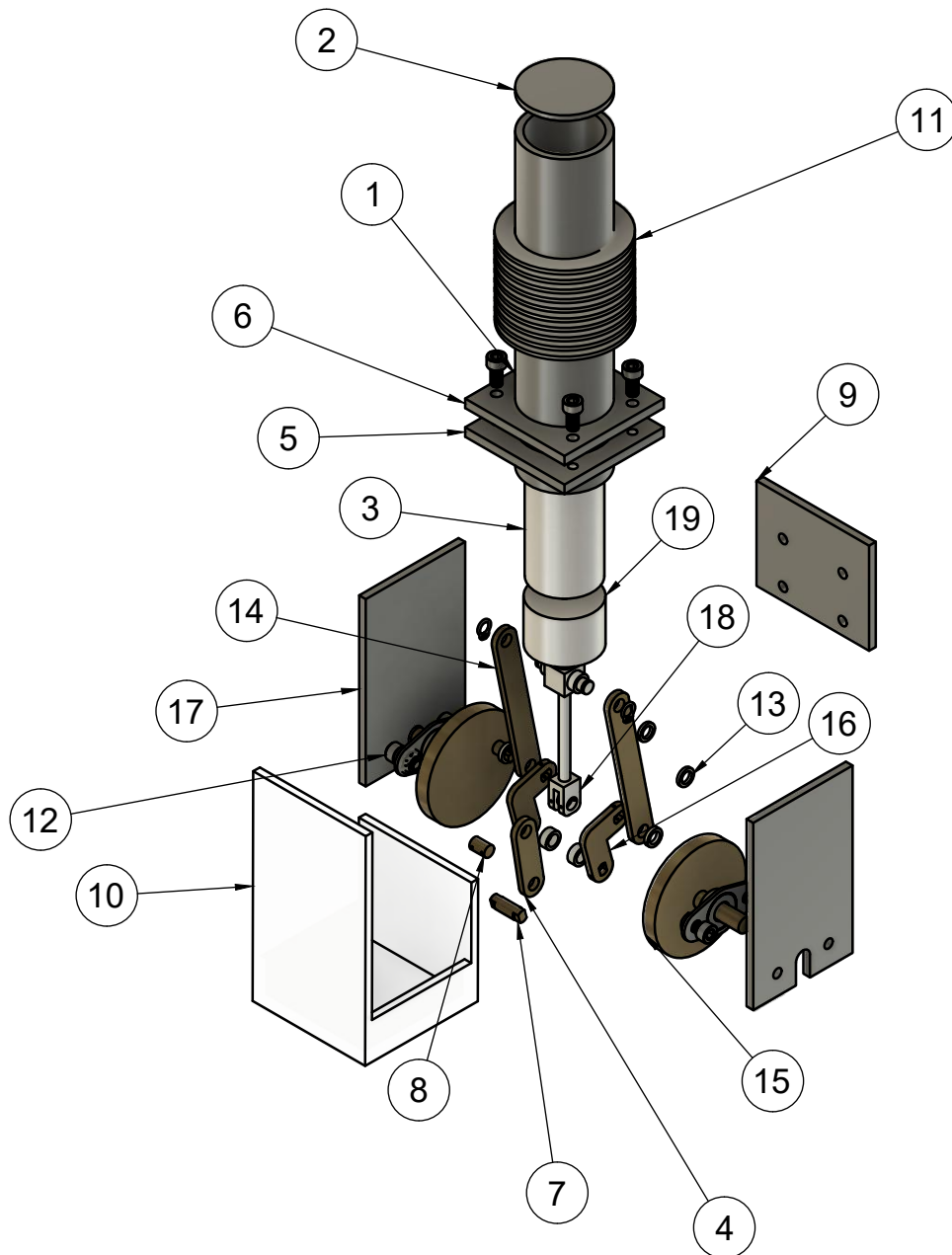
Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Explosión disco parabólico		A4
		Pieza: Disco parabólico.	N° de plano: 1/1	Fecha: 26-06-2024



Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Placa montaje
2	2	Barra soporte
3	1	Placa unión motor
4	2	Barra base
5	2	Base
6	3	Eje base
7	2	Placa regulador angulo
8	1	Componentes industriales montaje
9	1	Placa eje
10	1	Separadores

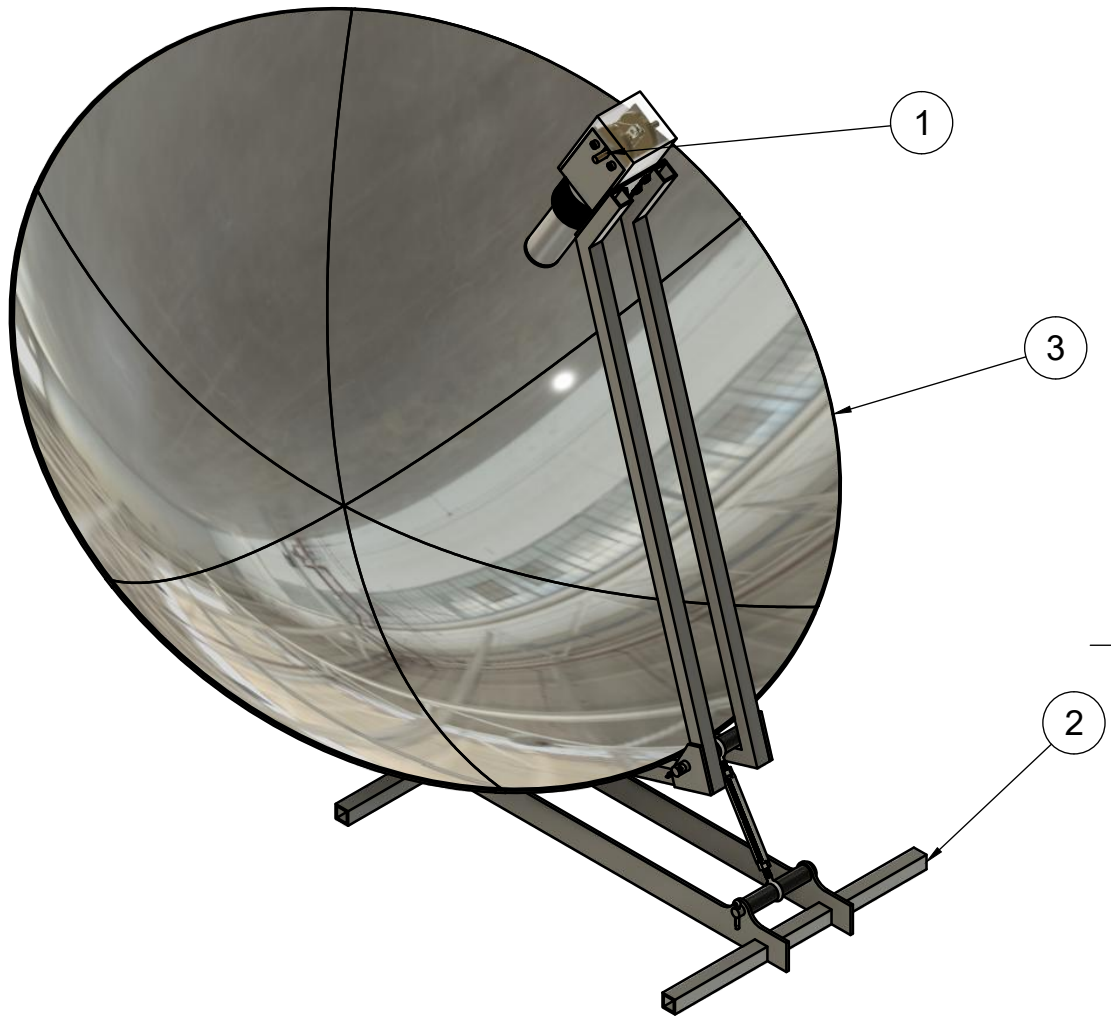
Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Explosión elementos montaje	1:10	A4
	Pieza: Montaje	N° de plano: 1/1	Fecha: 26-06-2024





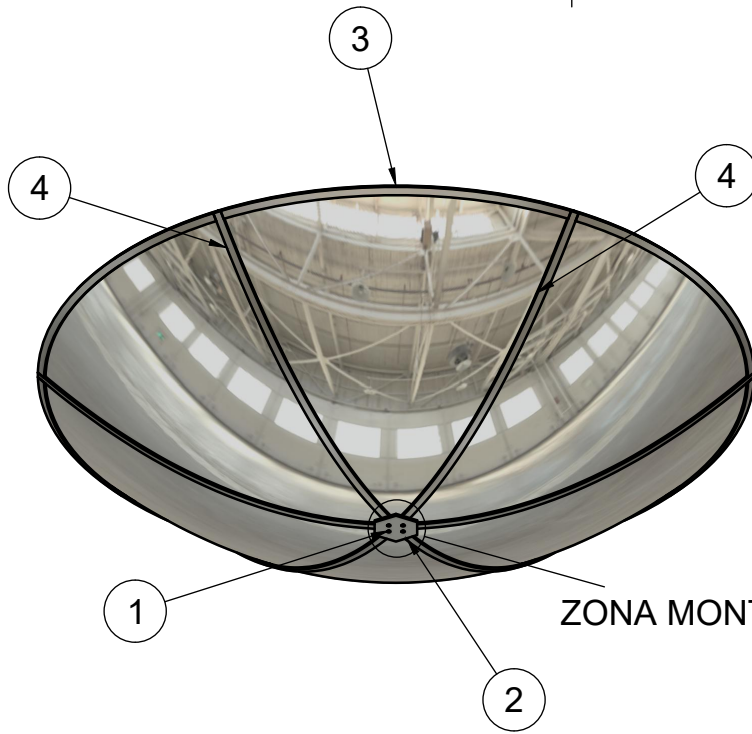
Lista de piezas		Lista de piezas		Lista de piezas	
elemento	nombre de pieza	elemento	nombre de pieza	elemento	nombre de pieza
15	Eje volante de inercia	8	Pasador desplazador	1	Camisa pistón
16	Brazo desplazador	9	Placa de unión a montaje	2	Tapa camisa pistón
17	Placas laterales	10	Tapa de seguridad	3	Desplazador
18	Barra desplazador y conector	11	Aletas	4	Biela desplazador
19	Pistón conector	12	Componentes industriales	5	Placa unión camisa pistón
		13	Separadores ejes	6	Placa unión camisa y eje
		14	Bielas pistón	7	Pasador biela desplazador

Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Explosión motor beta	1:2	A4
		Pieza: Motor Beta 50%	N° de plano: 1/1	Fecha: 26-06-2024

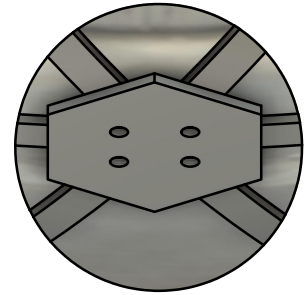


Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Motor Beta 50%
2	1	Montaje
3	1	Disco parabólico

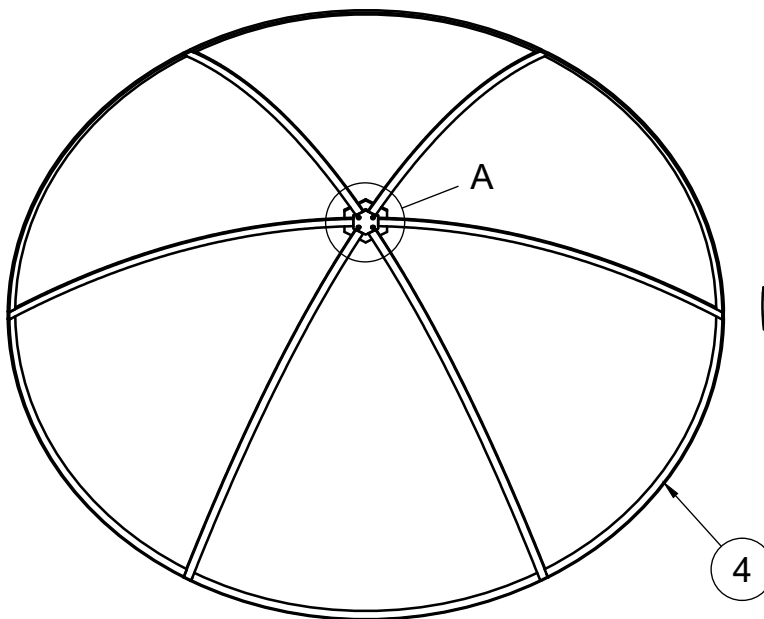
Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Stirling	1:8
		Pieza: Disco parabólico	1/4
		N° de plano:	A4
		Fecha:	25-06-2024



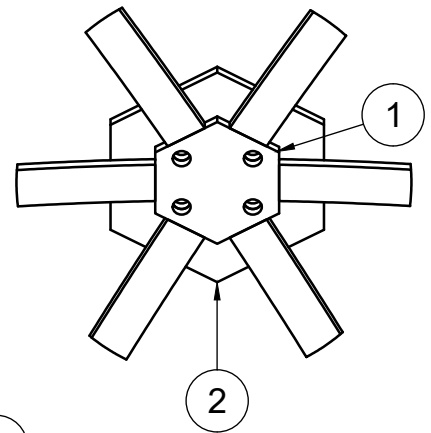
ZONA MONTAJE (1:2)



ZONA MONTAJE

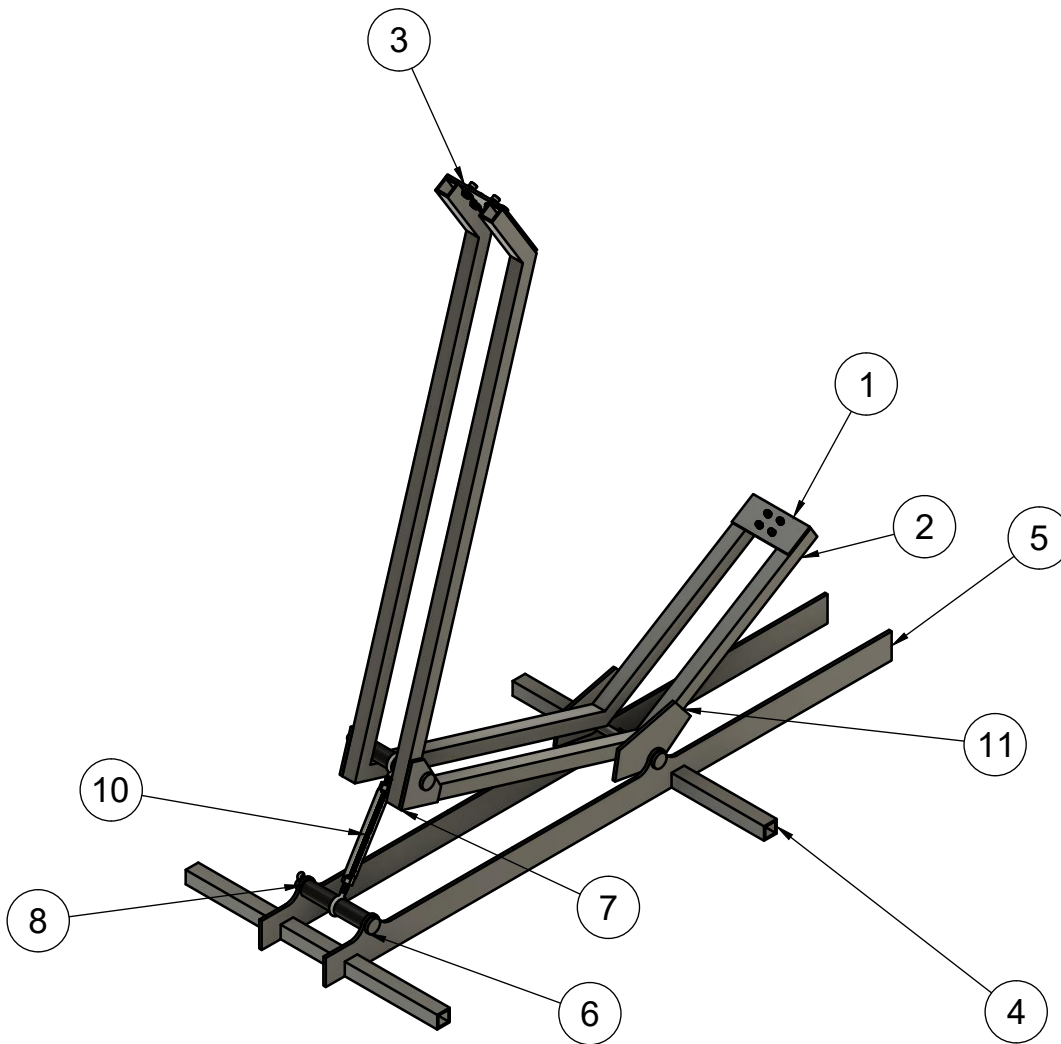


A (1:2)



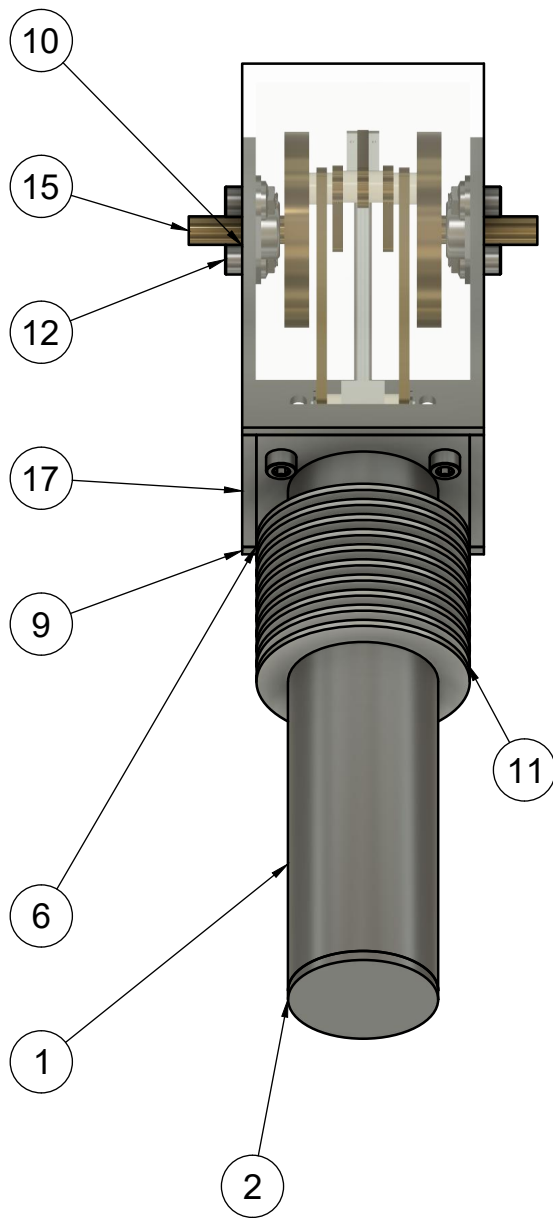
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Hexágono chico montaje
2	1	Hexágono grande montaje
3	1	Zonas reflectantes
4	1	Platinas

Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Stirling	1:10
		Pieza: Disco parabólico	N° de plano: 2/4
			Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas			Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza	elemento	ctd	nombre de pieza
10	1	Separadores	1	1	Placa montaje
			2	2	Barra soporte
			3	1	Placa unión motor
			4	2	Barra base
			5	2	Base
			6	3	Eje base
			7	2	Placa regulador angulo
			8	1	Componentes industriales montaje
			9	1	Placa eje

Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Stirling	1:20
		Pieza: Montaje	N° de plano: 3/4
			Fecha: 25-06-2024



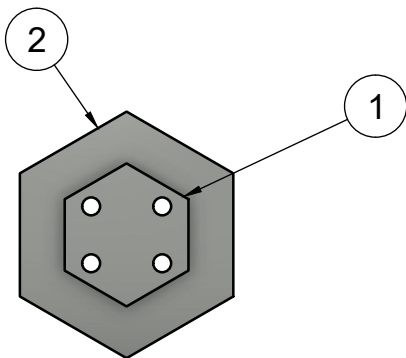
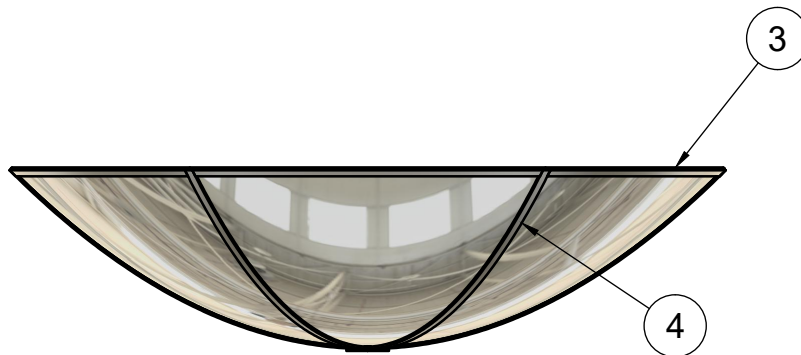
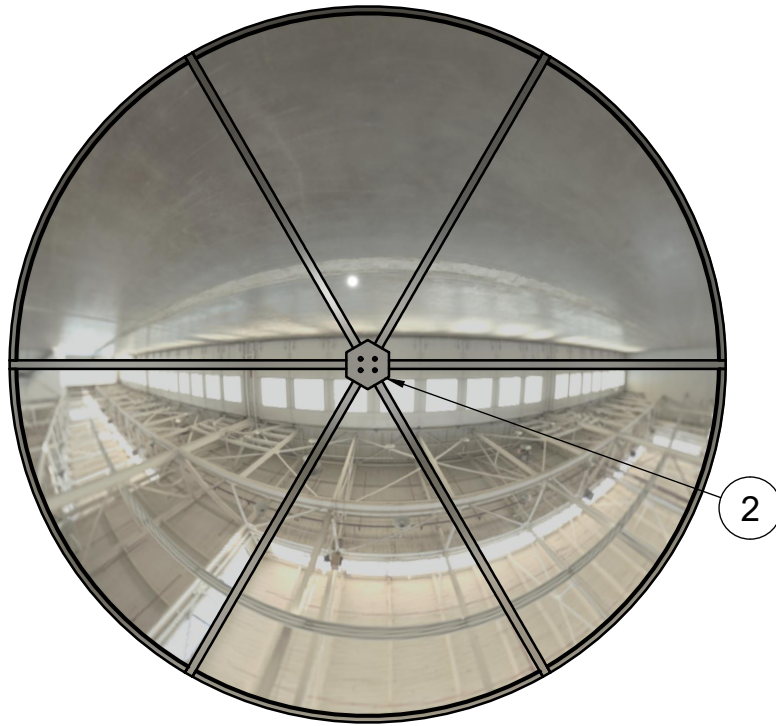
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Camisa pistón
2	1	Tapa camisa pistón
3	1	Desplazador
4	1	Biela desplazador
5	1	Placa unión camisa pistón
6	1	Placa unión camisa y eje
7	1	Pasador biela desplazador
8	1	Pasador desplazador
9	1	Placa de unión a montaje
10	1	Tapa de seguridad
11	1	Aletas
12	1	Componentes industriales
13	1	Separadores ejes
14	1	Bielas pistón
15	1	Eje volante de inercia
16	1	Brazo desplazador
17	1	Placas laterales
18	1	Barra desplazador y conector
19	1	Pistón conector

Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Disco parabólico Stirling	1:10	A4
Pieza: Motor Beta 50%	N° de plano: 4/4	Fecha: 25-06-2024



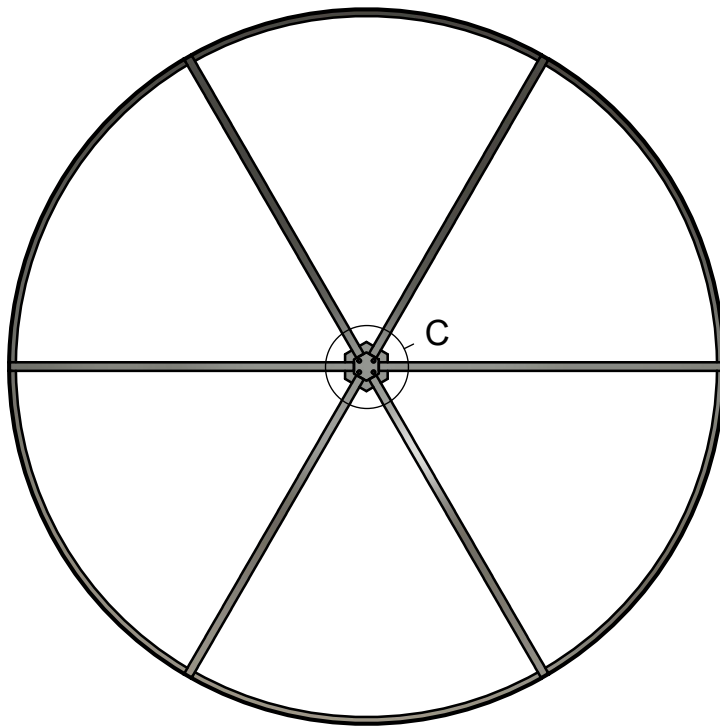
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Hexágono chico montaje
2	1	Hexágono grande montaje
3	1	Zonas reflectantes
4	1	Platinas

Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

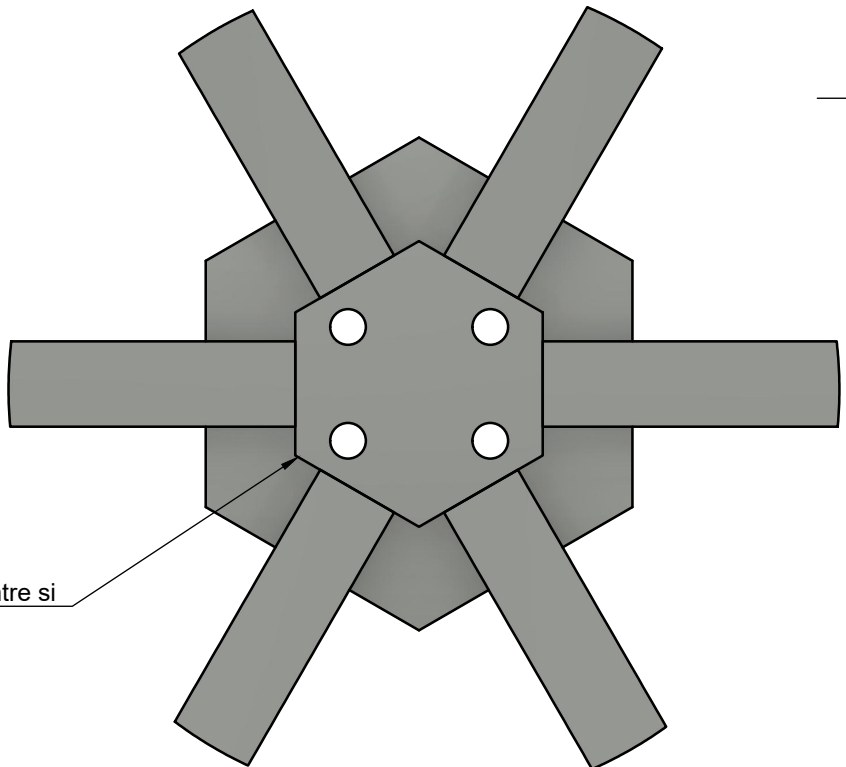
Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

Diseño y dimensionamiento de un disco  
 parabólico Stirling, para uso docente.

Disco parabólico	1:20	A4
Pieza: Disco parabólico.	N° de plano: 1/9	Fecha: 26-06-2024

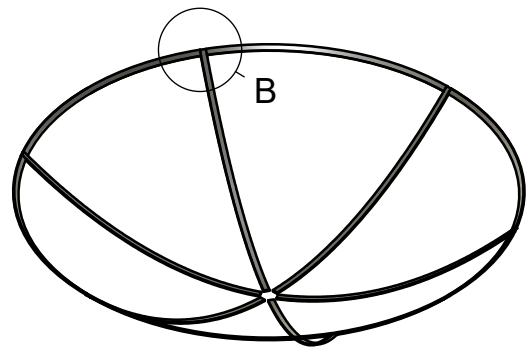
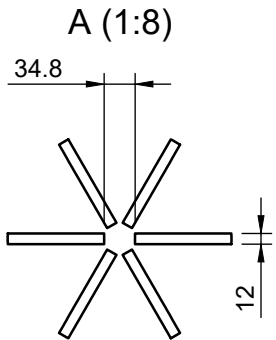
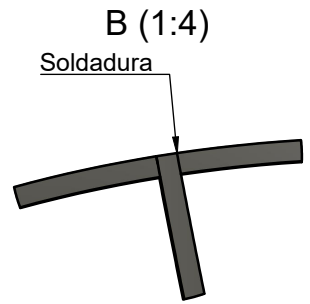
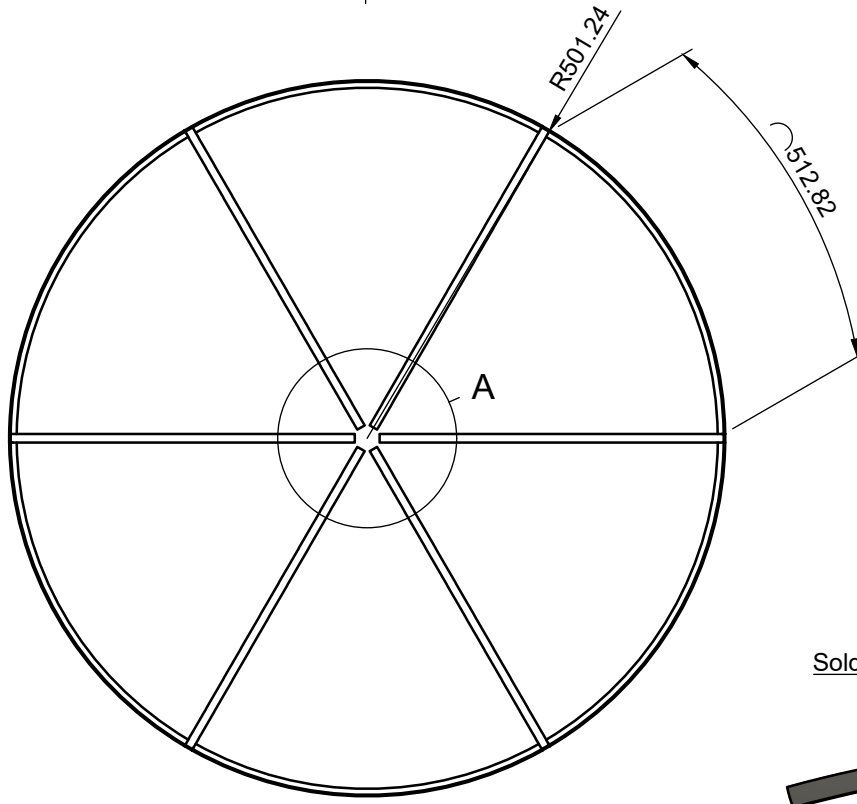
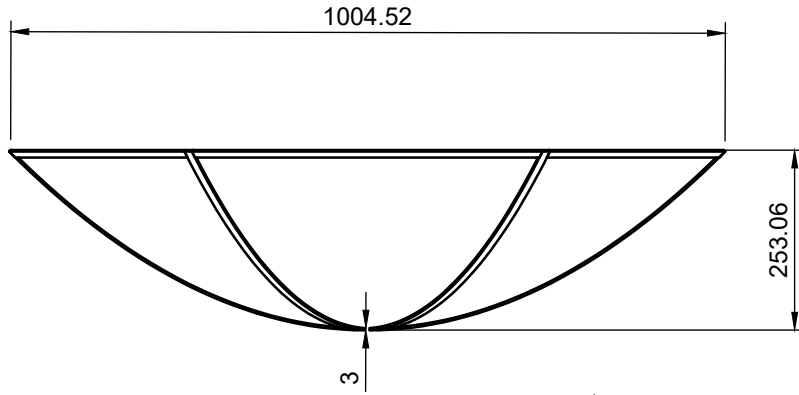


C (1:1)



Platinas y hexágonos soldados entre si

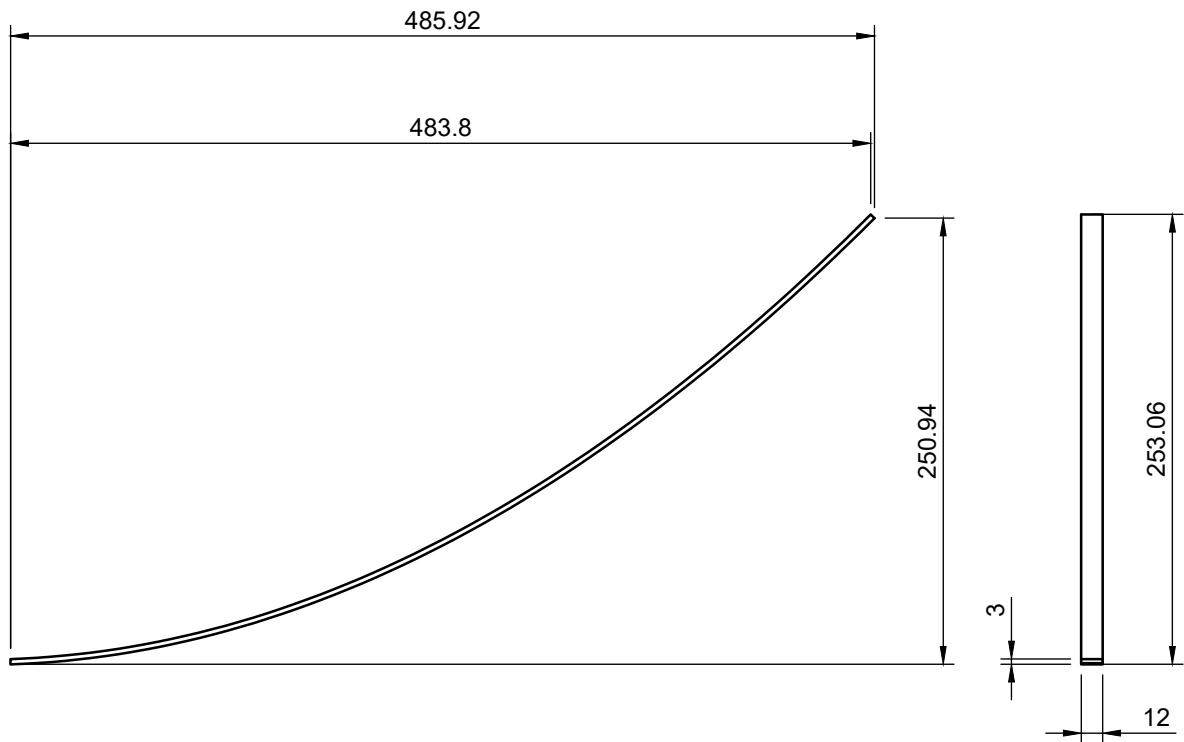
Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Disco parabólico	1:20	A4
	Pieza: Disco parabólico.	N° de plano: 2/9	Fecha: 26-06-2024



Estructura elaborada con  
platinas de 12x3 mm  
soldadas entre si

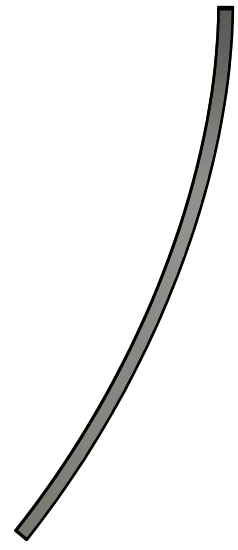
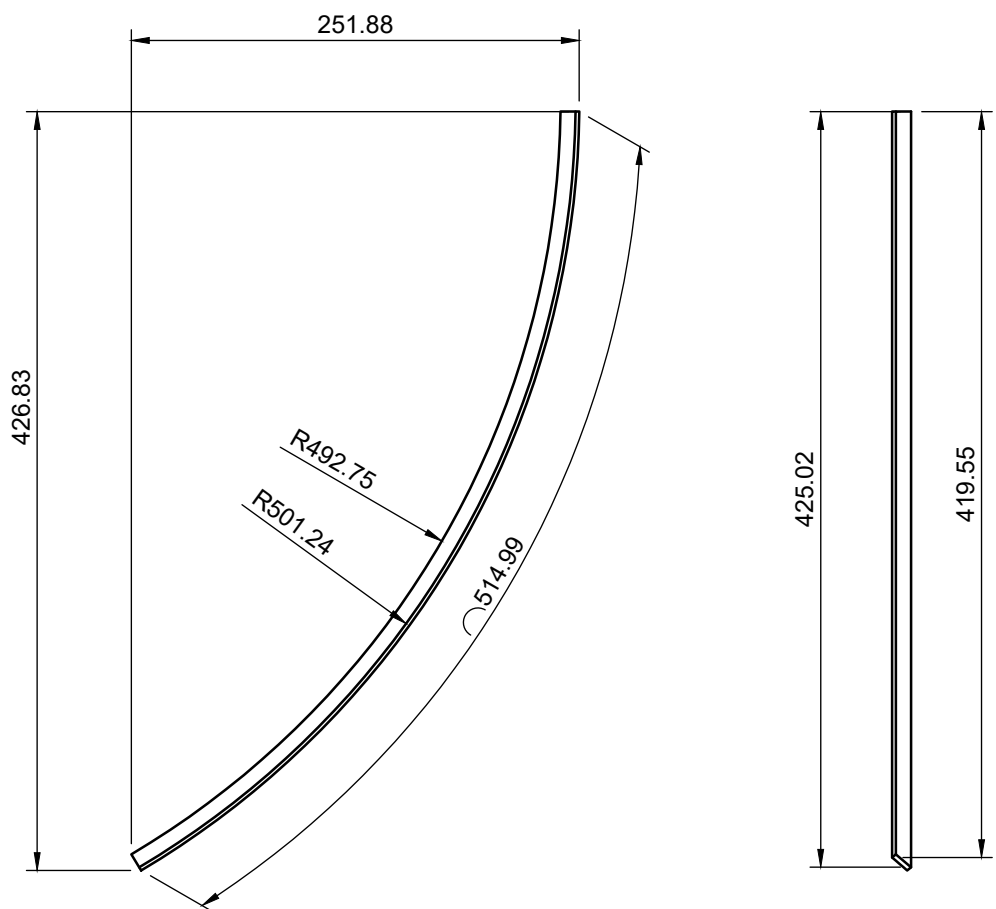
Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico Pieza: Platinas	1:10 N° de plano: 3/9 Fecha: 26-06-2024
		A4	





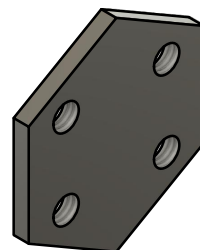
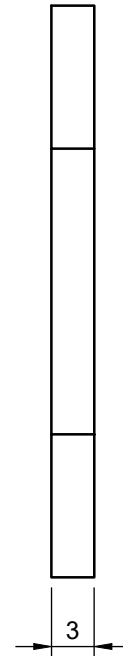
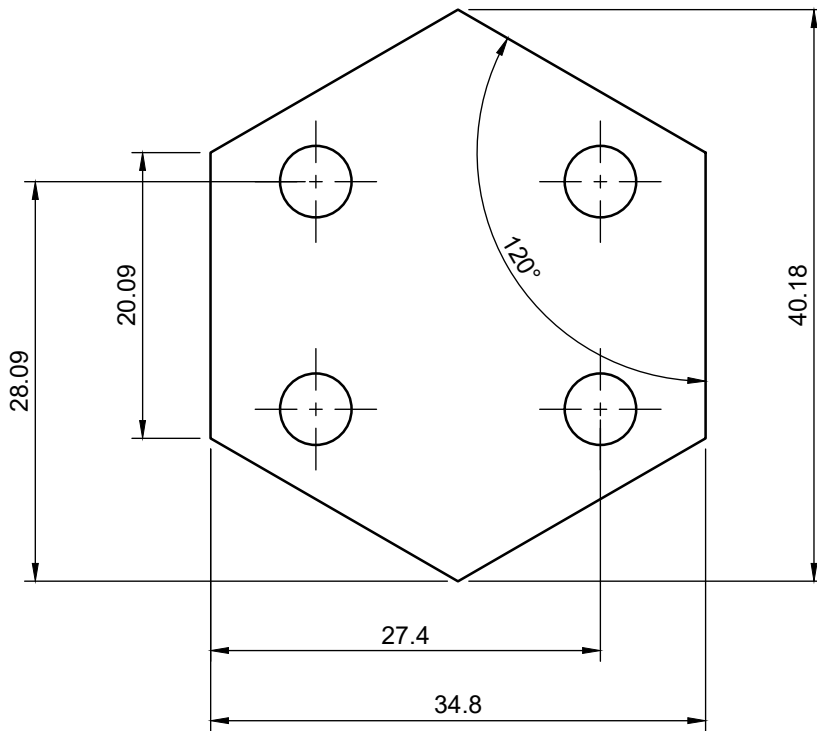
Platina de 12x3 mm doblada de tal manera de conseguir un ángulo de 45° y las dimensiones expuestas

Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Disco parabólico	1:2	A4
	Pieza: Platina parabola	N° de plano: 4/9	Fecha: 26-06-2024

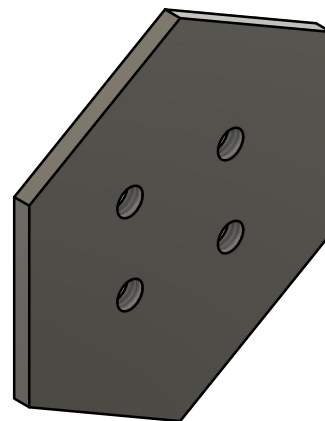
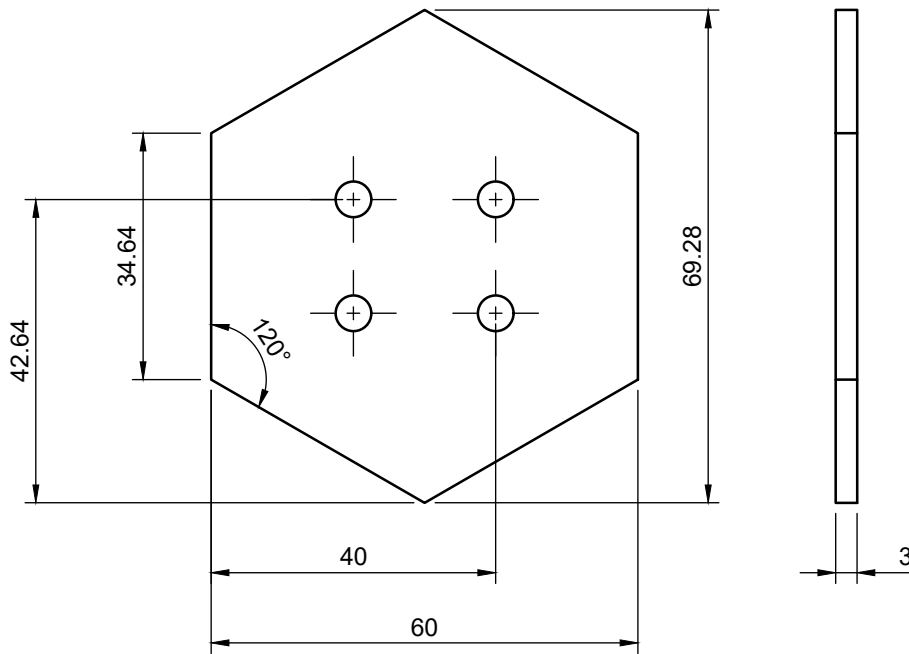


Platina de 12x3 mm doblada de tal manera de conseguir  $\frac{1}{6}$  de circunferencia y las dimensiones expuestas

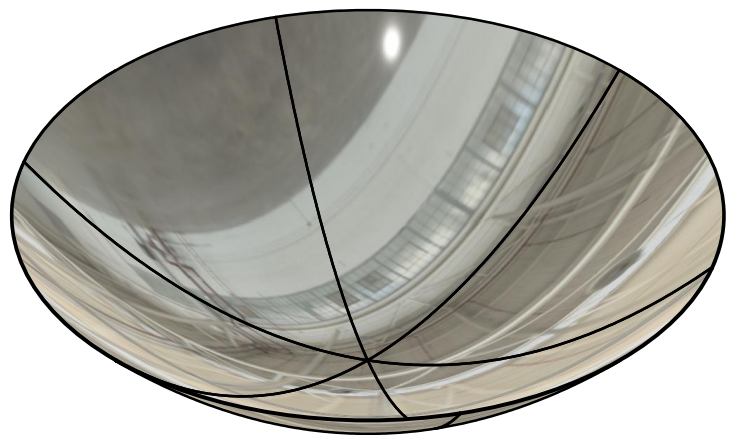
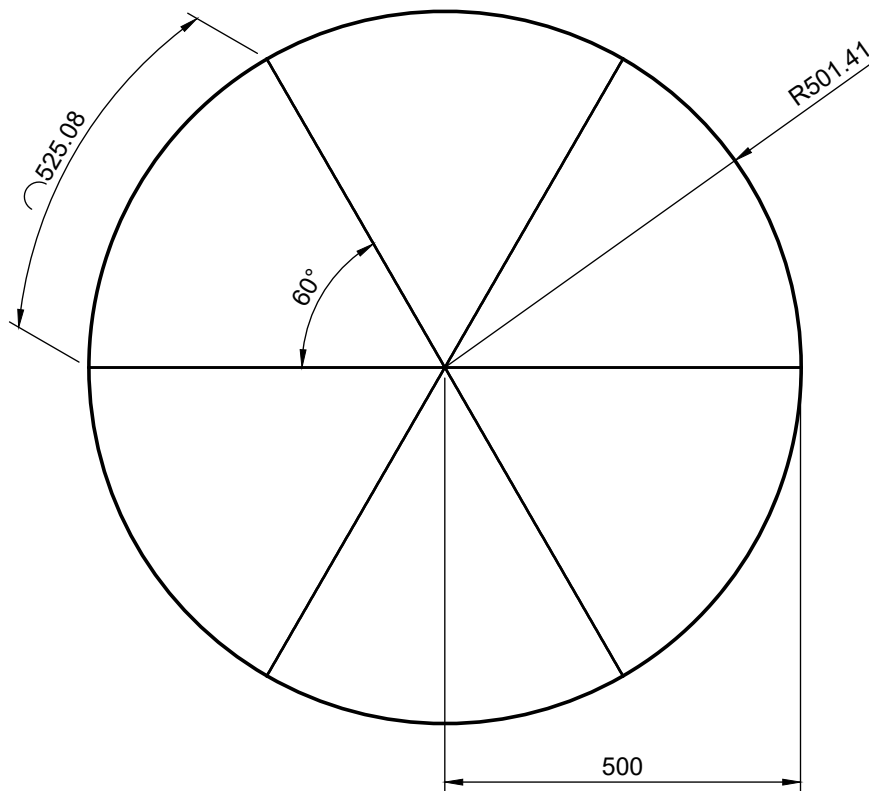
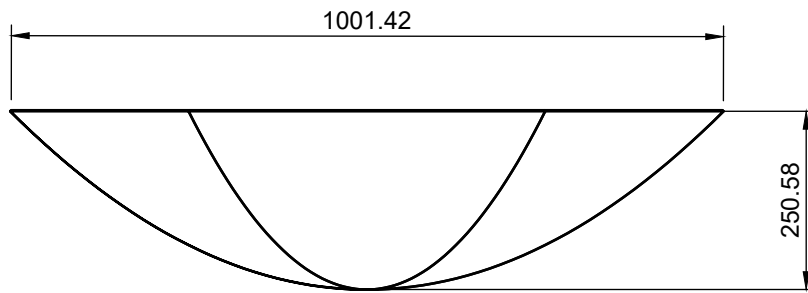
Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Disco parabólico	1:20	A4
	Pieza: Platina circunferencia	N° de plano: 5/9	Fecha: 26-06-2024



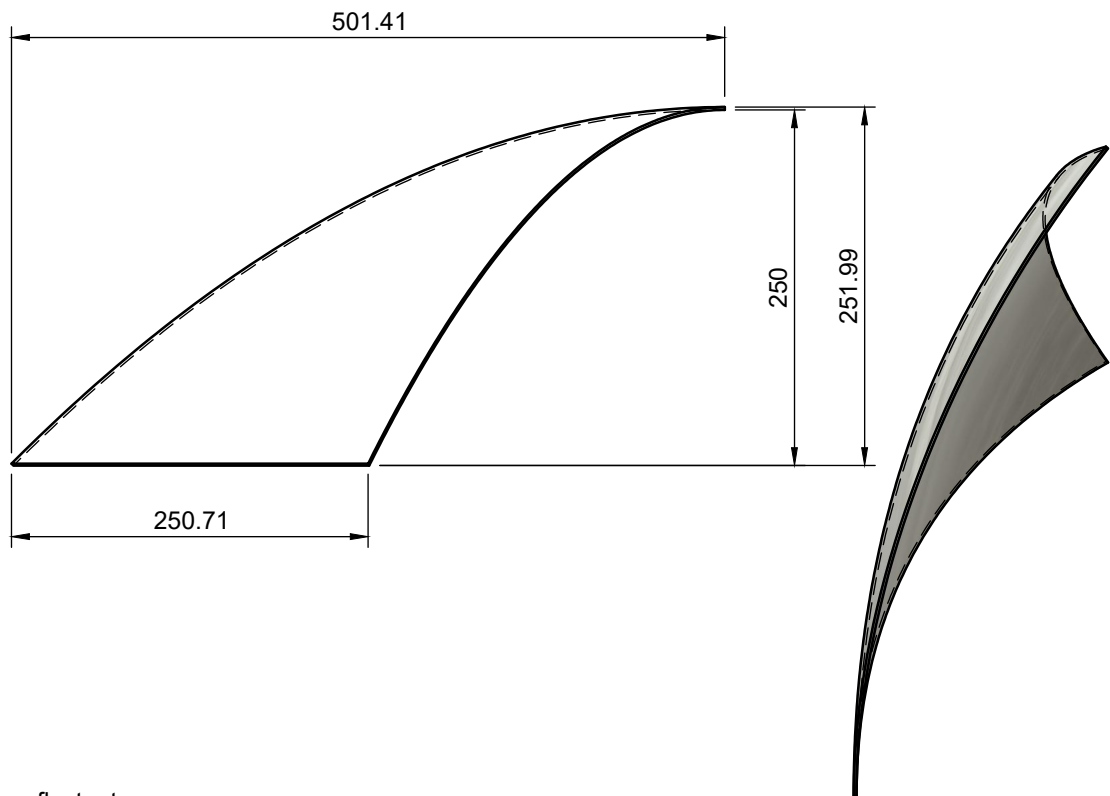
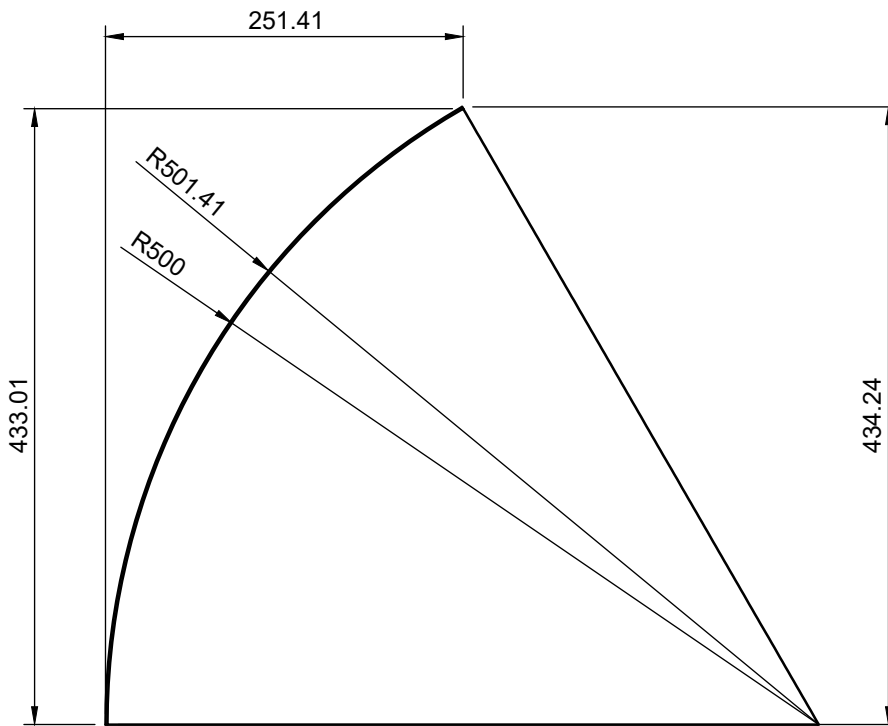
Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico	1:20
		Pieza: Hexágono chico montaje	N° de plano: 6/9
			Fecha: 26-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Disco parabólico	1:2	A4
	Pieza: Hexágono grande montaje	N° de plano: 7/9	Fecha: 26-06-2024

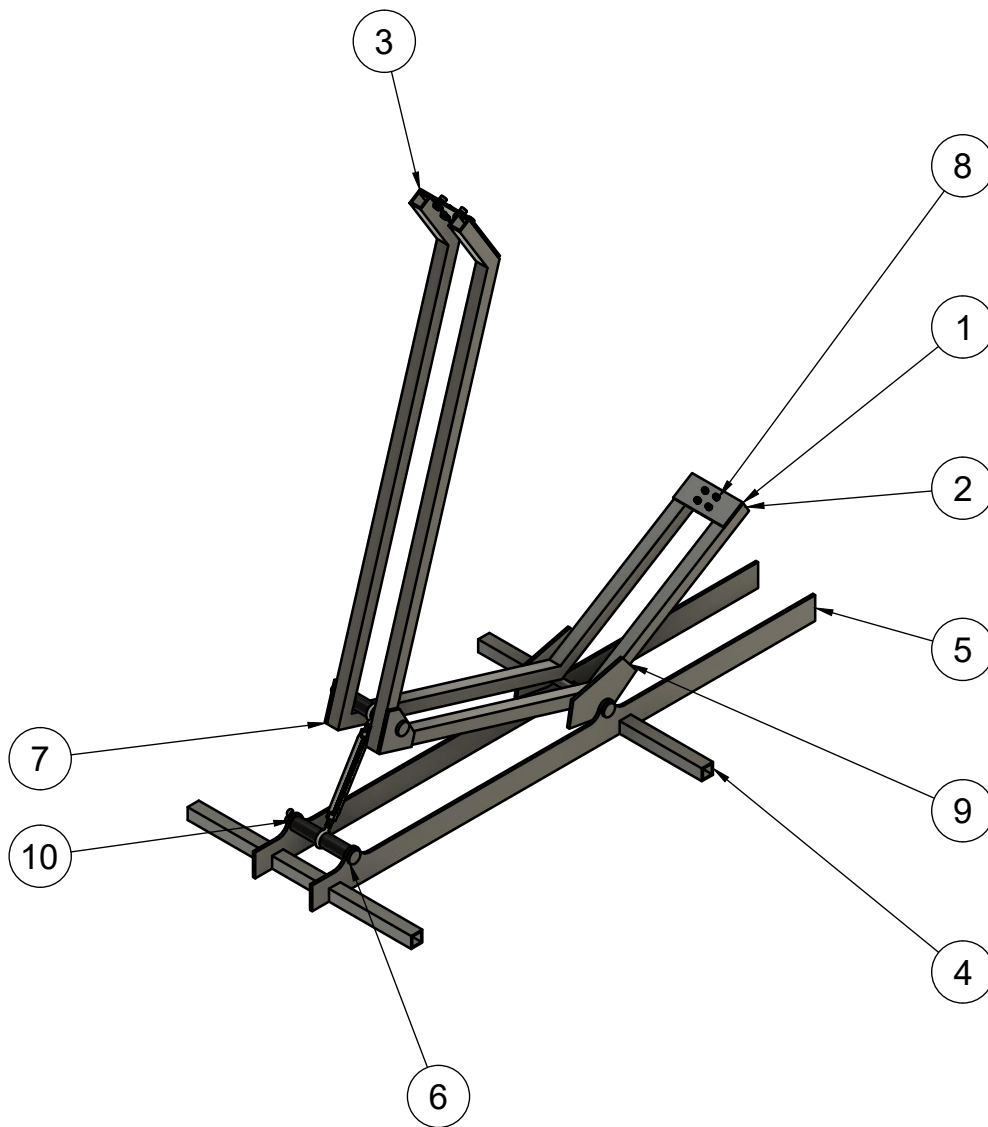


Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico	1:20
		Pieza: Zonas reflectantes	N° de plano: 8/9
		Fecha:	26-06-2024



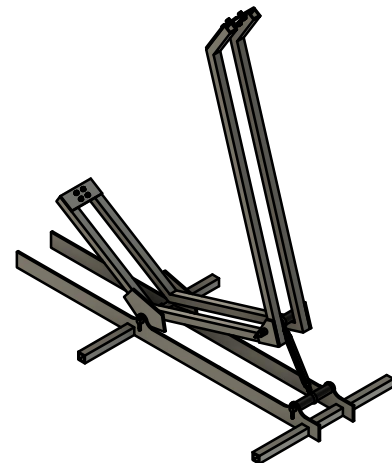
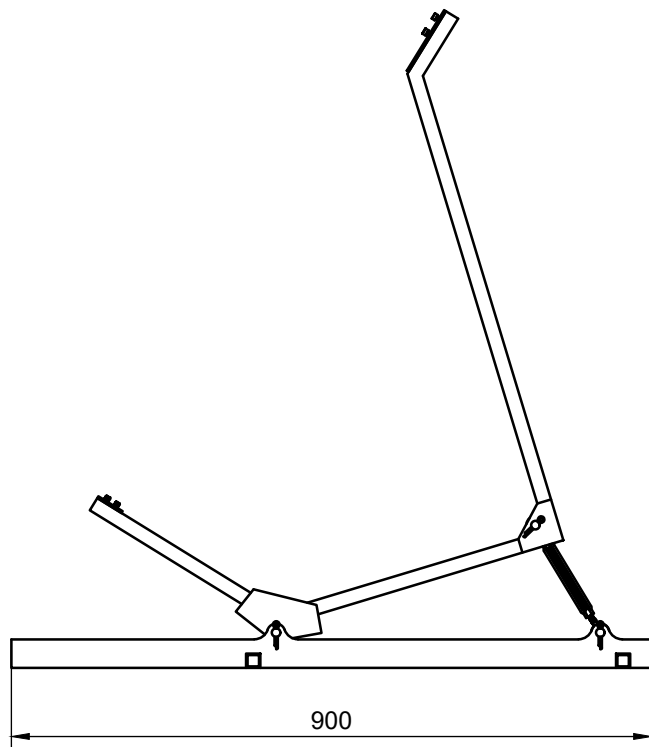
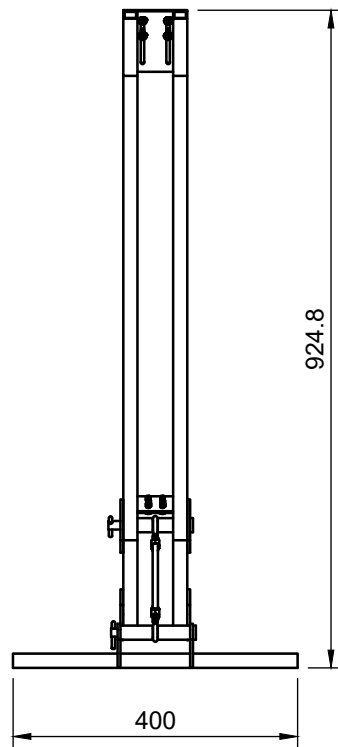
La zona reflectante se asumo como un material tipo espejo de 2mm de espesor con forma de  $\frac{1}{8}$  de parábola

Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Disco parabólico 1:2	A4
		Pieza: Zona reflectante	N° de plano: 9/9 Fecha: 26-06-2024



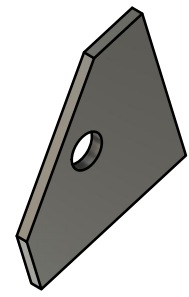
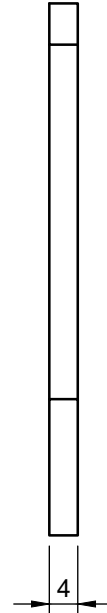
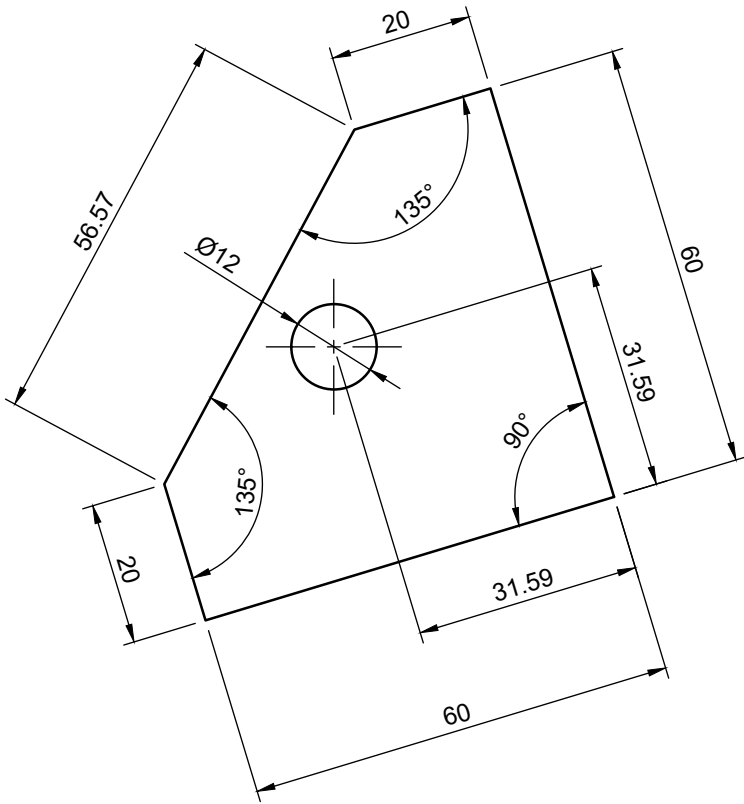
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Placa montaje
2	2	Barra soporte
3	1	Placa unión motor
4	2	Barra base
5	2	Base
6	3	Eje base
7	2	Placa regulador angulo
8	1	Componentes industriales montaje
9	1	Placa eje
10	1	Separadores

Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:8	A4
	Pieza: Montaje	N° de plano: 1/12	Fecha: 25-06-2024

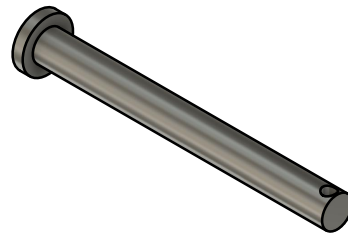
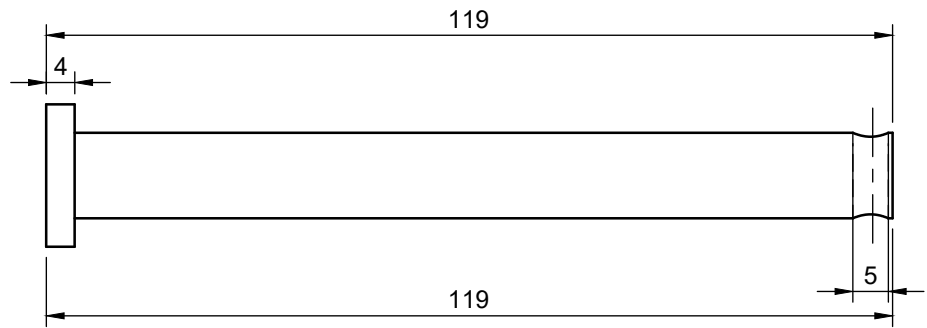
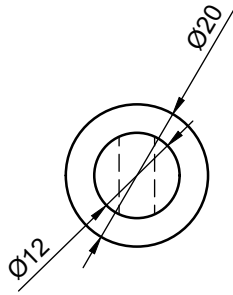


Diseñado por: <b>Edgardo Merino</b>	<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:8	A4
	Pieza: Montaje	N° de plano: 2/12	Fecha: 25-06-2024

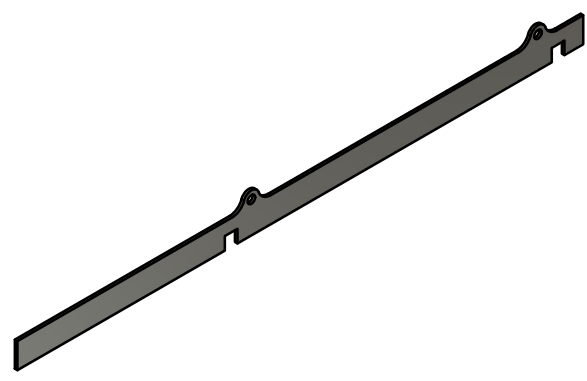
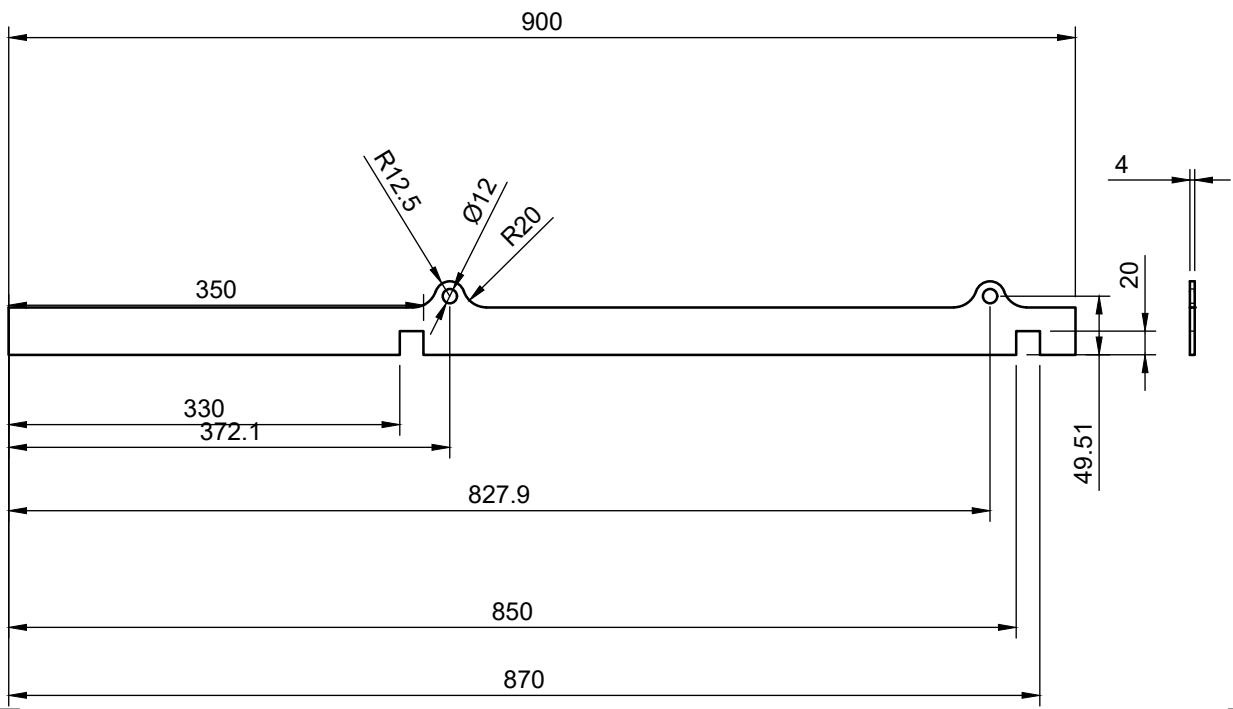




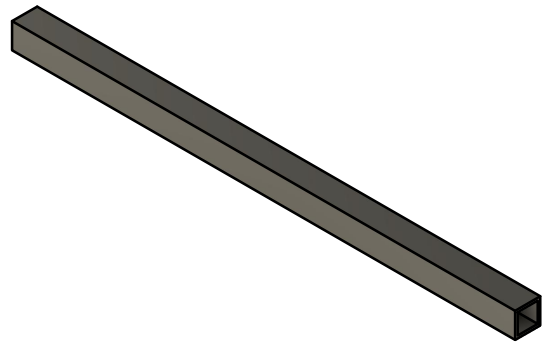
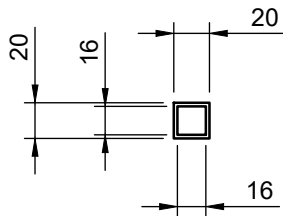
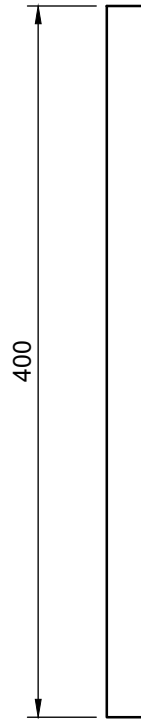
Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:10	A4
	Pieza: Placa regulador angulo	N° de plano: 3/12	Fecha: 25-06-2024



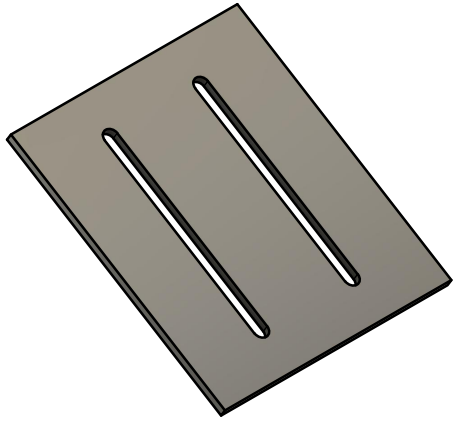
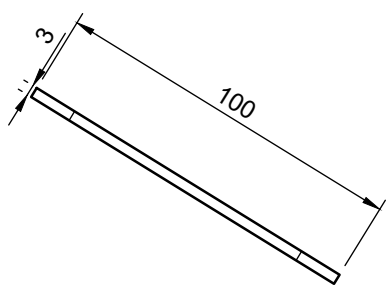
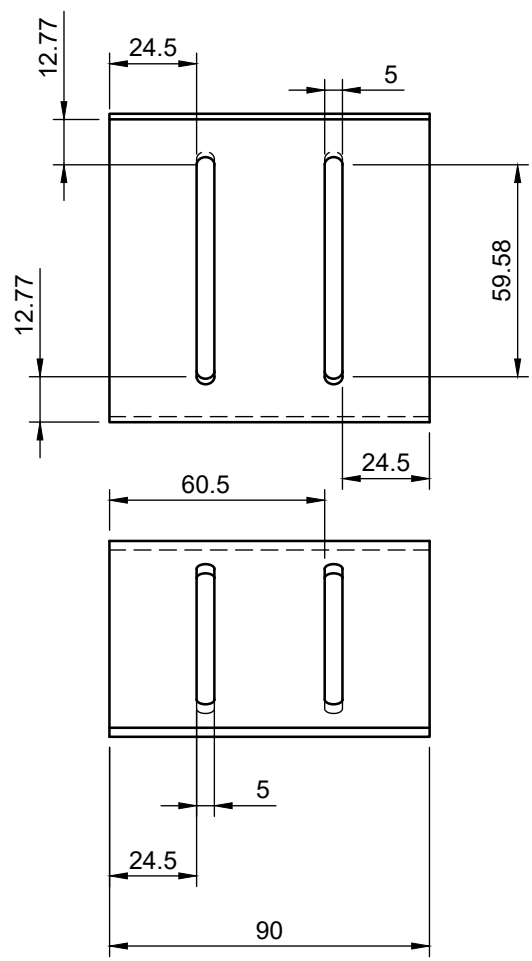
Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:20	A4
	Pieza: Eje base	N° de plano: 4/12	Fecha: 25-06-2024



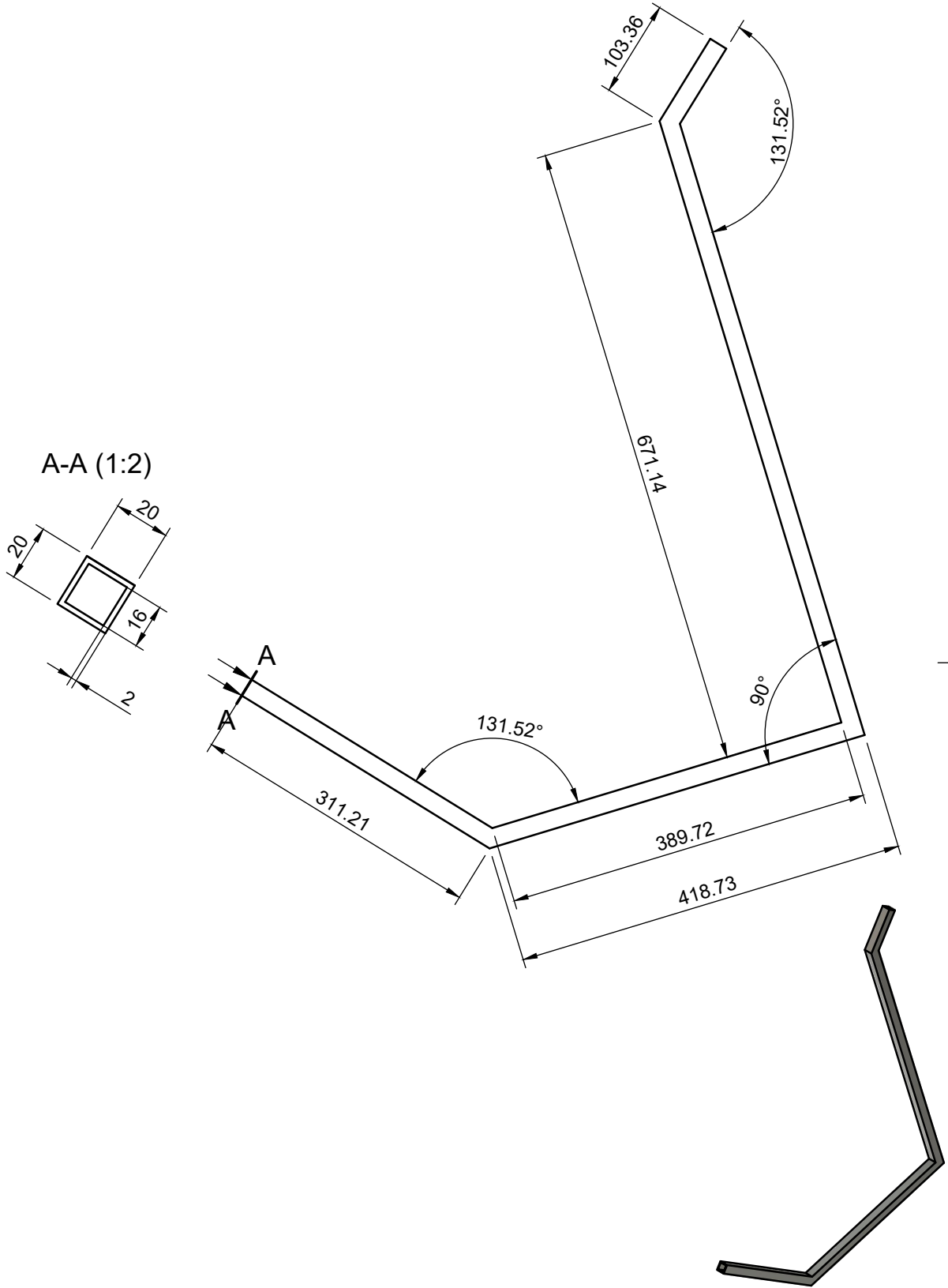
Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:2	A4
	Pieza: Base	N° de plano: 5/12	Fecha: 25-06-2024



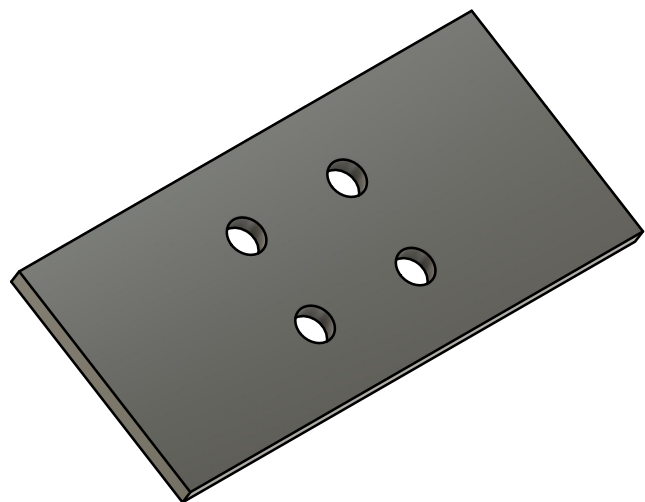
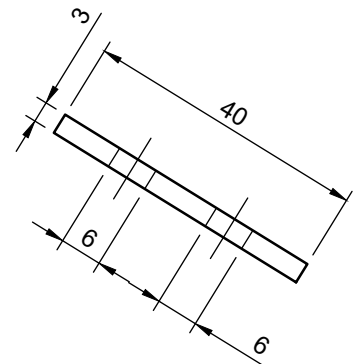
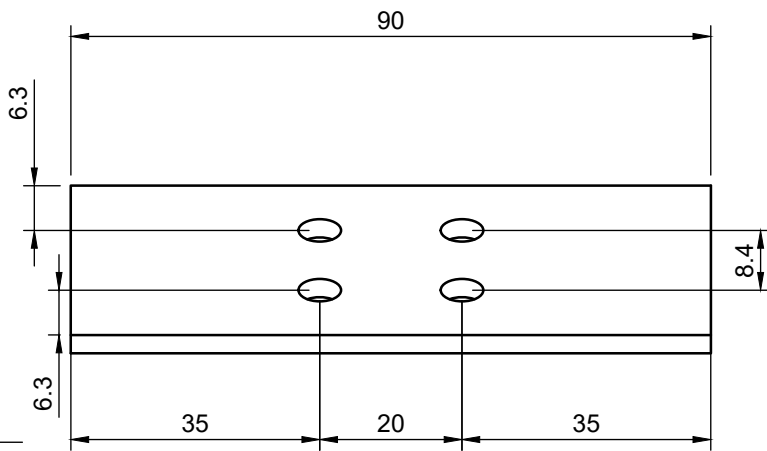
Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Elementos montaje	1:4
		Pieza: Barra base	N° de plano: 6/12
			Fecha: 25-06-2024



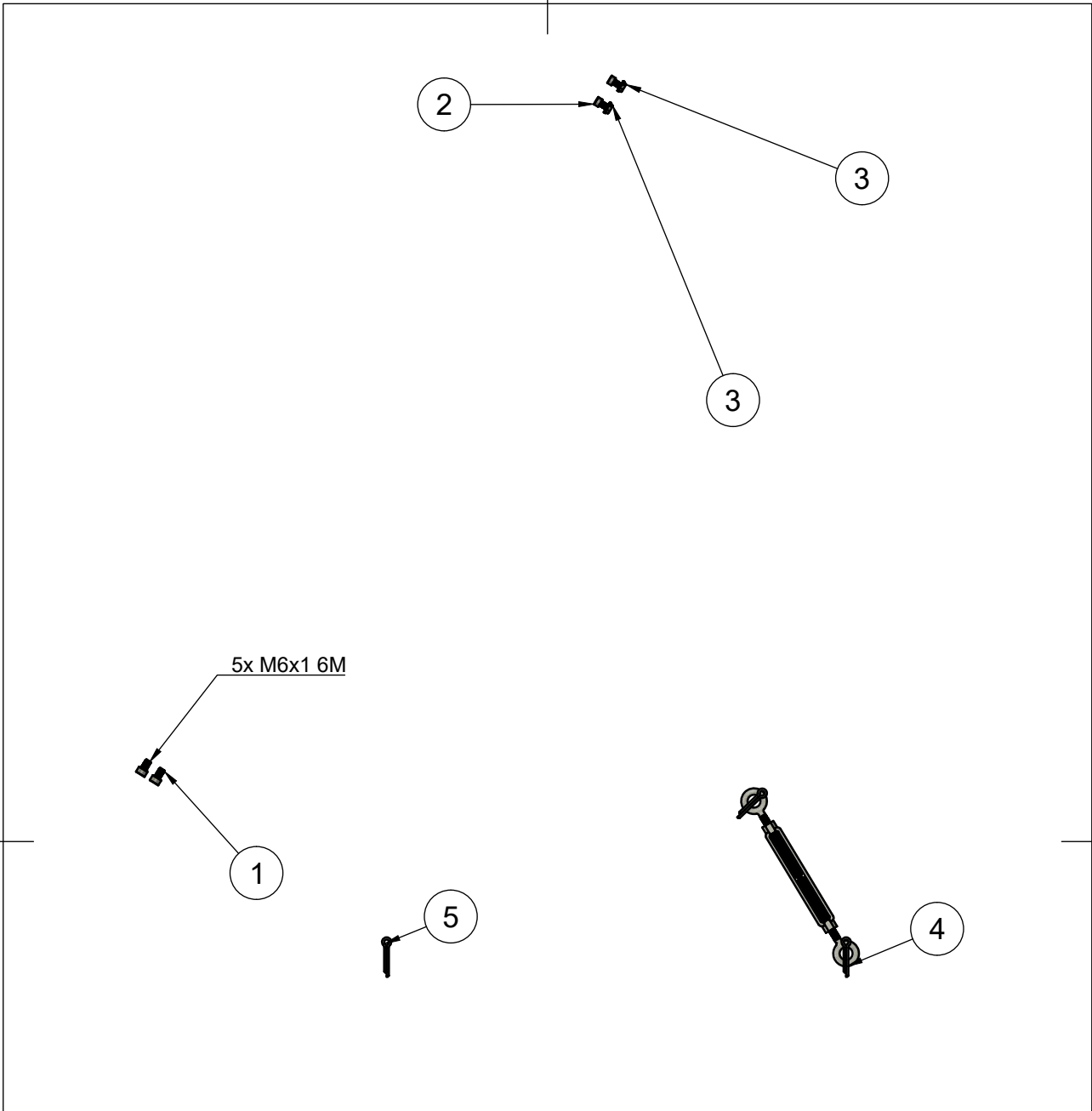
Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Elementos montaje 1:4	A4
		Pieza: Placa unión motor 7/12	Fecha: 25-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino		Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:2	A4
	Pieza: Barra soporte	N° de plano: 8/12	Fecha: 25-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:2	A4
	Pieza: Placa montaje	N° de plano: 9/12	Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	4	91290A316_Alloy Steel Socket Head Screw
2	4	91290A228_Alloy Steel Socket Head Screw
3	4	94920A300_Medium-Strength Steel Serrated Flange Locknut (1)
4	1	2999T51_Forged Galvanized Steel Turnbuckle
5	3	98350A450_Cotter Pin

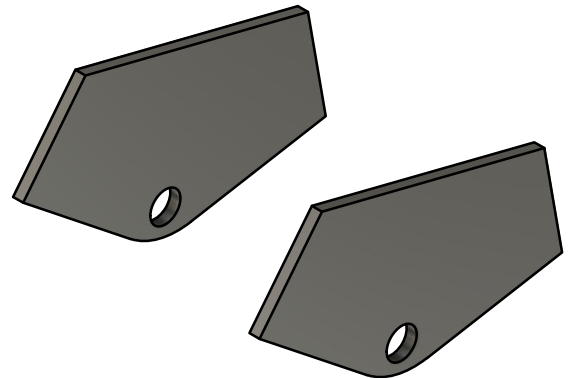
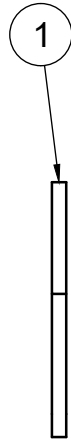
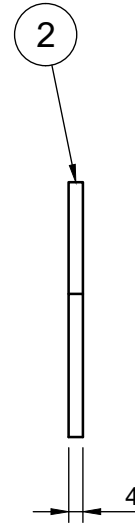
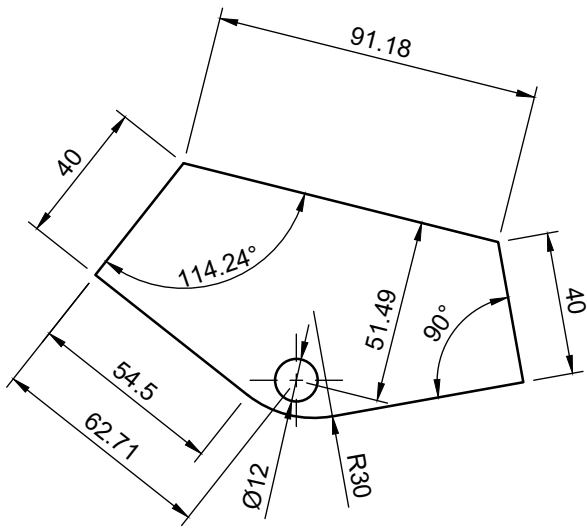
Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.

Elementos montaje	1:2	A4
Pieza: Componentes industriales montaje	N° de plano: 10/12	Fecha: 25-06-2024



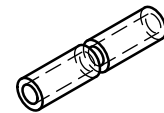
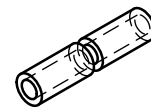
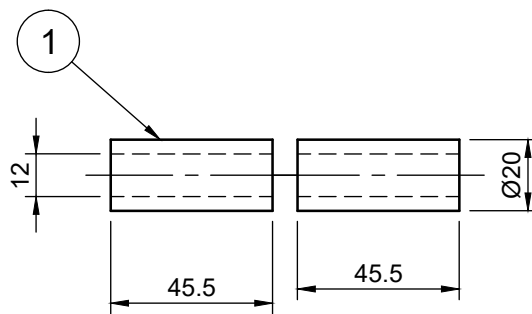
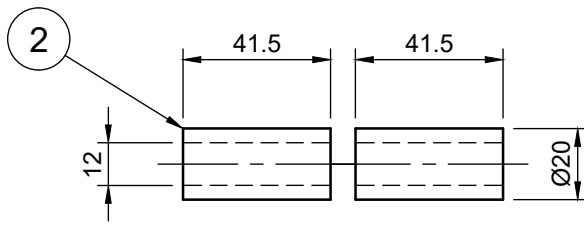


Lista de piezas

elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Placa angulo
2	1	Placa angulo 1

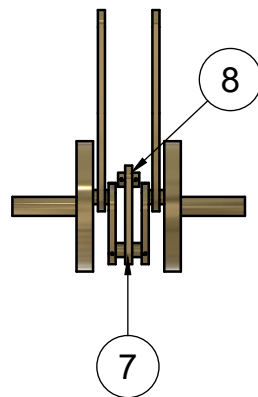
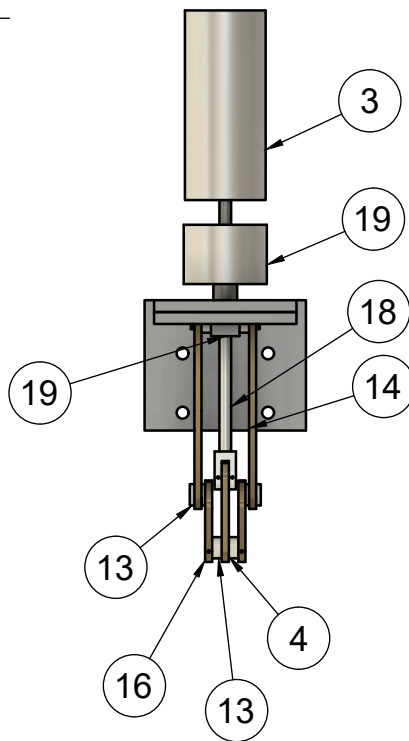
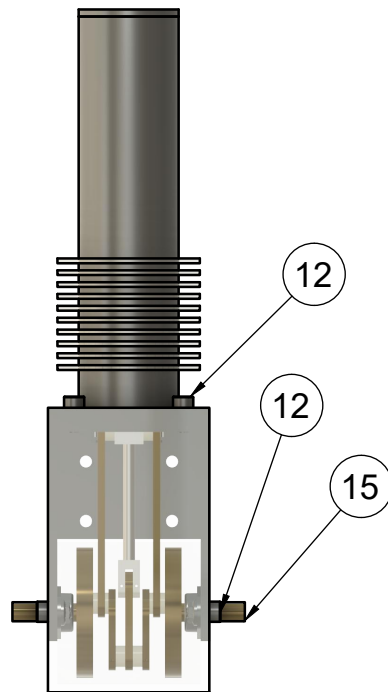
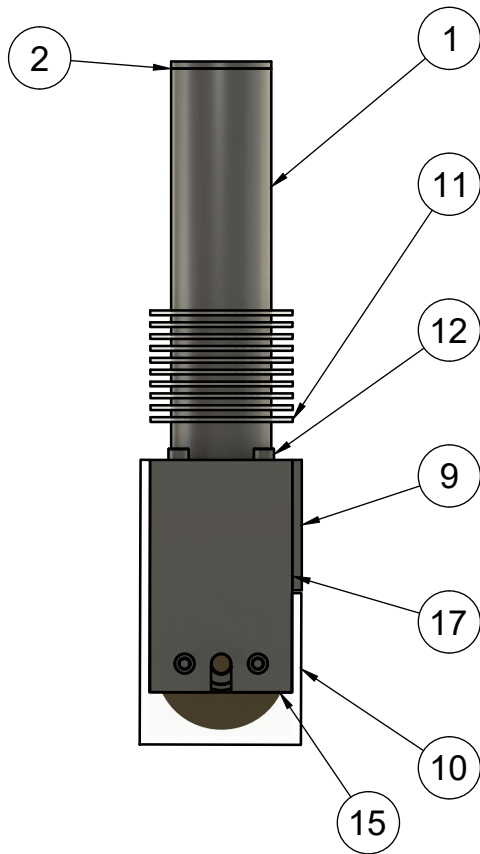
Diseñado por: Edgardo Merino
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.

Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Elementos montaje	1:2	A4
Pieza: Placa eje	N° de plano: 11/12	Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	2	Separador eje
2	2	Separador eje superior

Diseñado por: Edgardo Merino	Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Elementos montaje	1:2	A4
	Pieza: Separadores	N° de plano: 12/12	Fecha: 25-06-2024



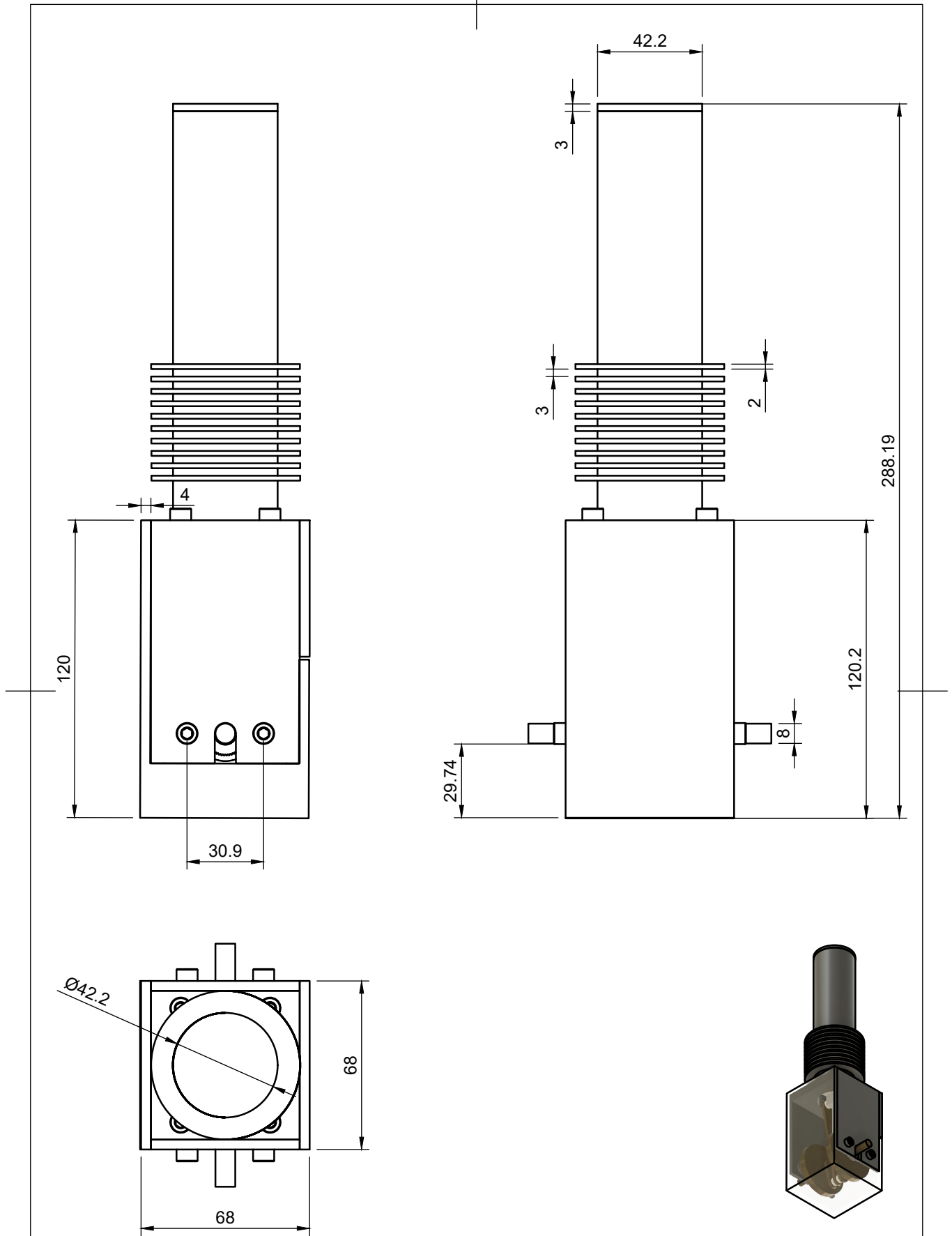
Lista de piezas

elemento	nombre de pieza
1	Camisa pistón
2	Tapa camisa pistón
3	Desplazador
4	Biela desplazador
5	Placa unión camisa pistón
6	Placa unión camisa y eje
7	Pasador biela desplazador
8	Pasador desplazador
9	Placa de unión a montaje
10	Tapa de seguridad
11	Aletas
12	Componentes industriales
13	Separadores ejes
14	Bielas pistón
15	Eje volante de inercia
16	Brazo desplazador
17	Placas laterales
18	Barra desplazador y conector
19	Pistón conector

Diseñado por:  
**Edgardo Merino**  
 Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Motor Stirling	1:3	A4
Pieza: Motor Beta 50%	N° de plano: 1/21	Fecha: 25-06-2024

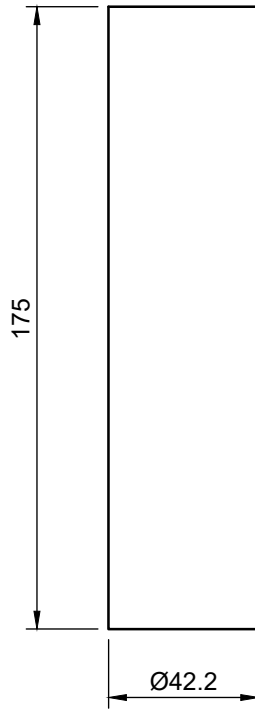
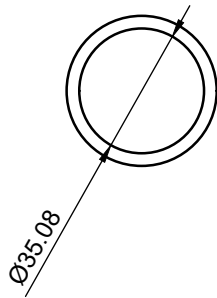


Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

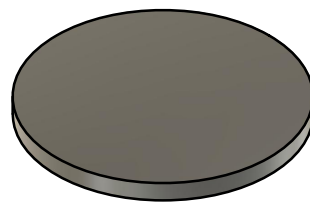
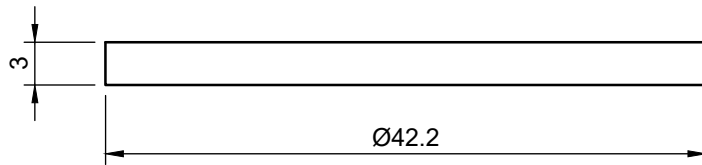
Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

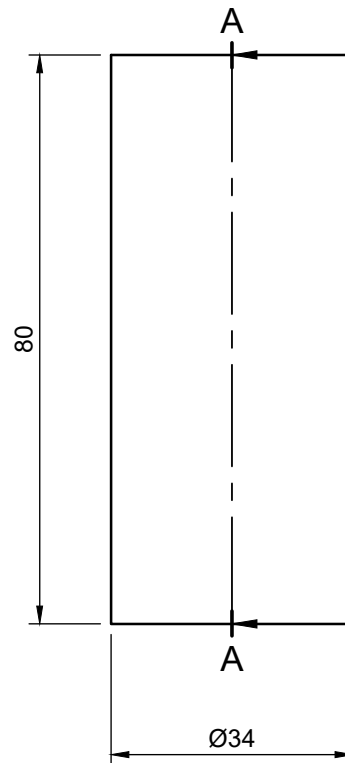
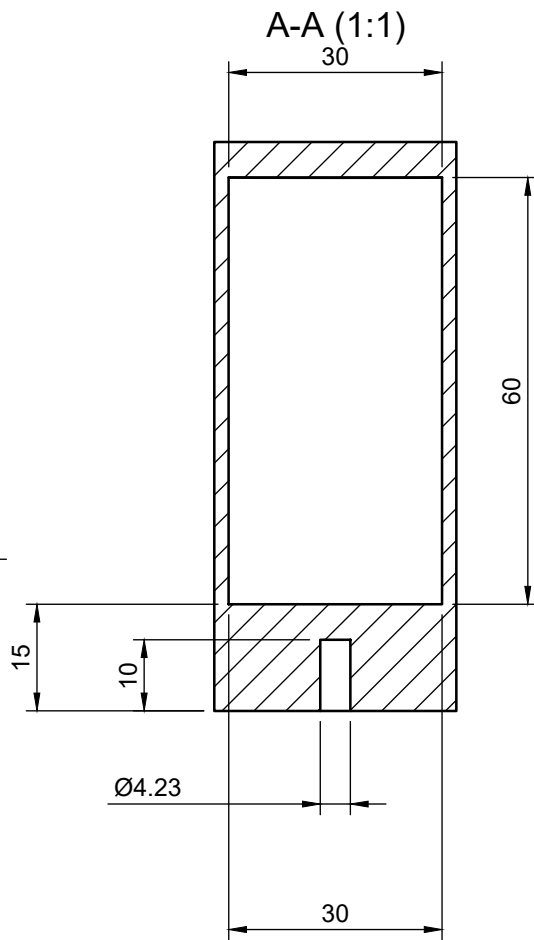
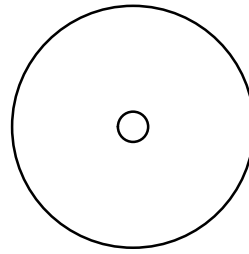
Motor Stirling	1:4	A4
Pieza: Motor Beta 50%	N° de plano: 2/21	Fecha: 25-06-2024



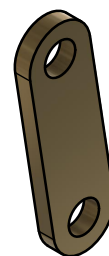
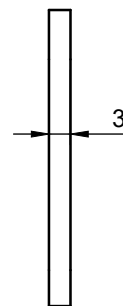
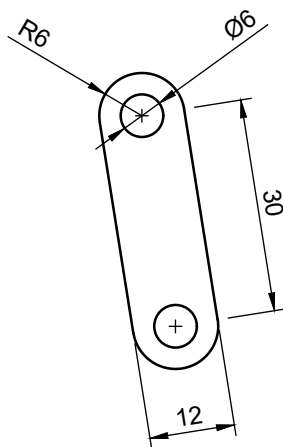
Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:2	A4
	Pieza: Camisa pistón	N° de plano: 3/21	Fecha: 25-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino	<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:2	A4
	Pieza: Tapa camisa pistón	N° de plano: 4/21	Fecha: 25-06-2024

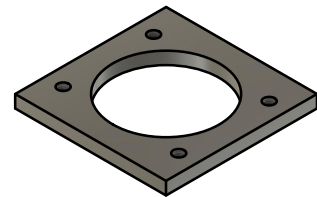
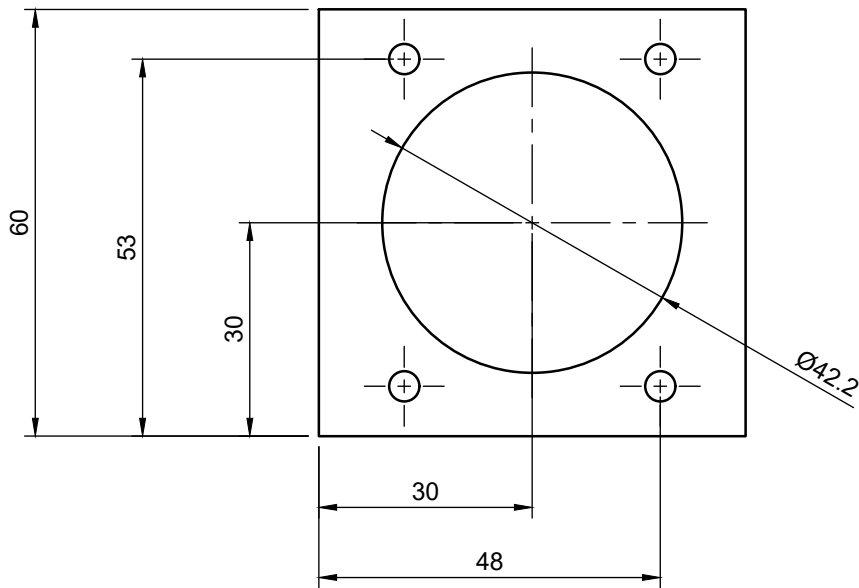
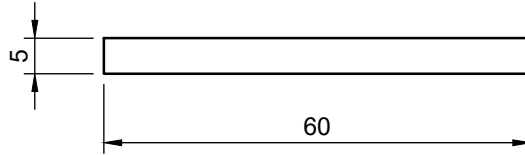


Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:2	A4
	Pieza: Desplazador	N° de plano: 5/21	Fecha: 25-06-2024

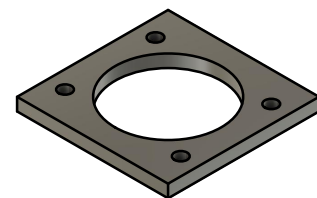
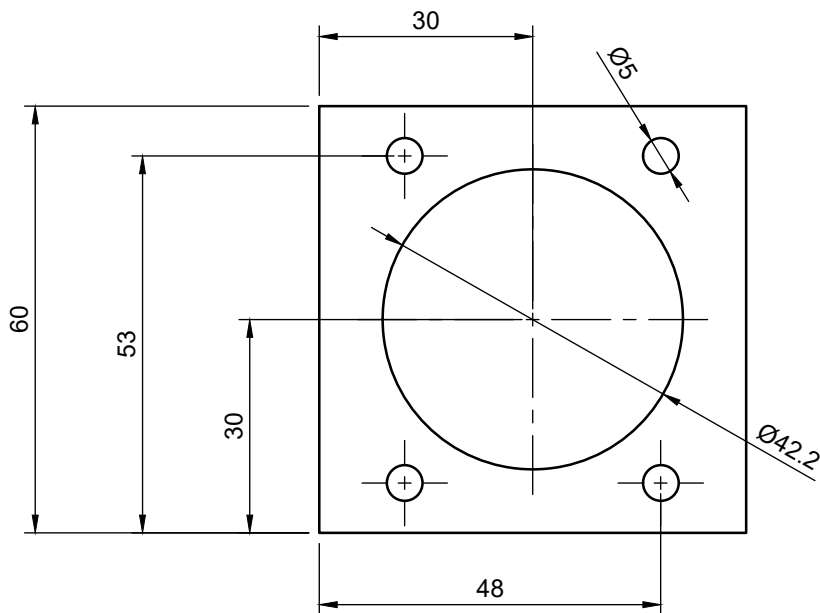
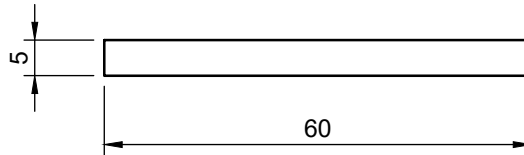


Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:1	A4
	Pieza: Biela desplazador	N° de plano: 6/21	Fecha: 25-06-2024

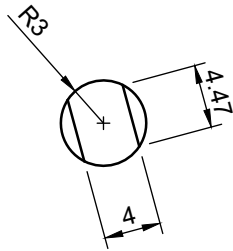




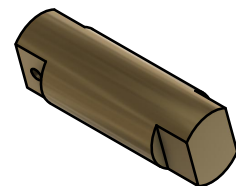
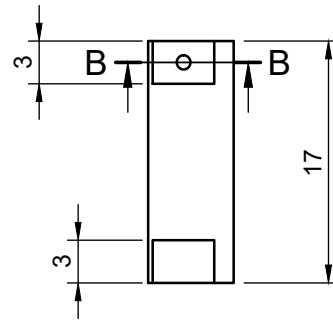
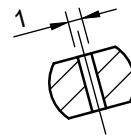
Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Motor Stirling	1:2
		Pieza: Placa unión camisa pistón	N° de plano: 7/21
			Fecha: 25-06-2024



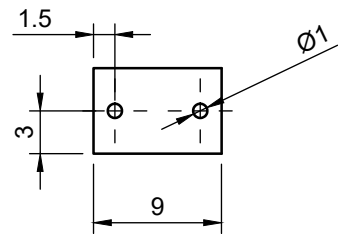
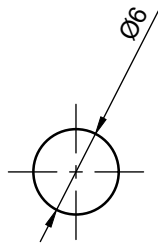
Diseñado por: Edgardo Merino	<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:2	A4
	Pieza: Placa unión camisa y eje	N° de plano: 8/21	Fecha: 25-06-2024



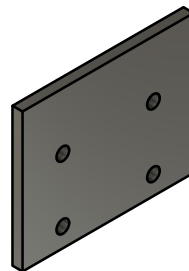
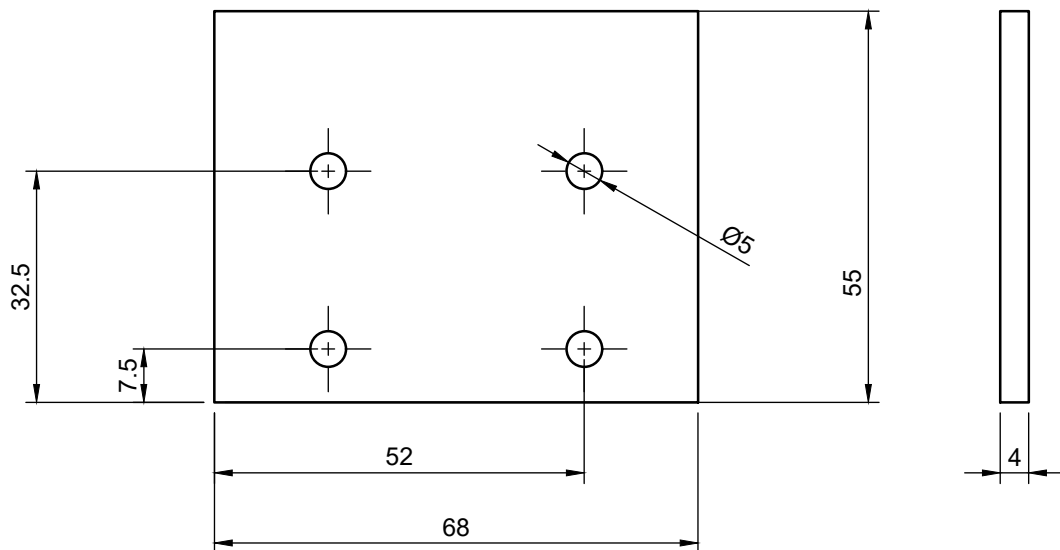
B-B (2:1)



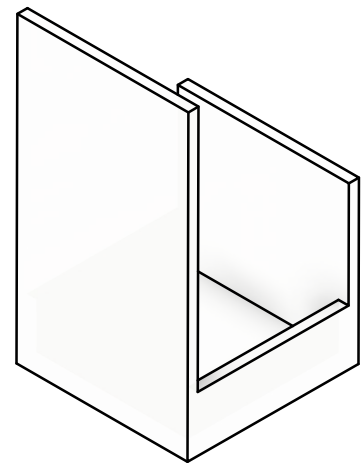
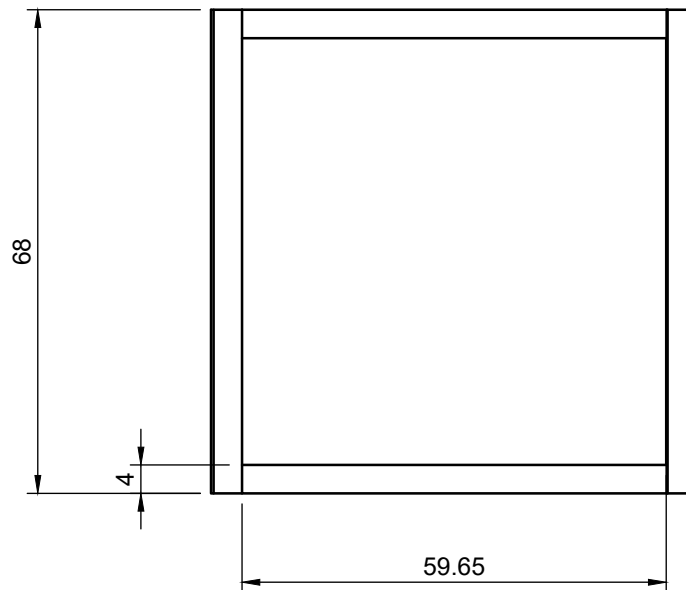
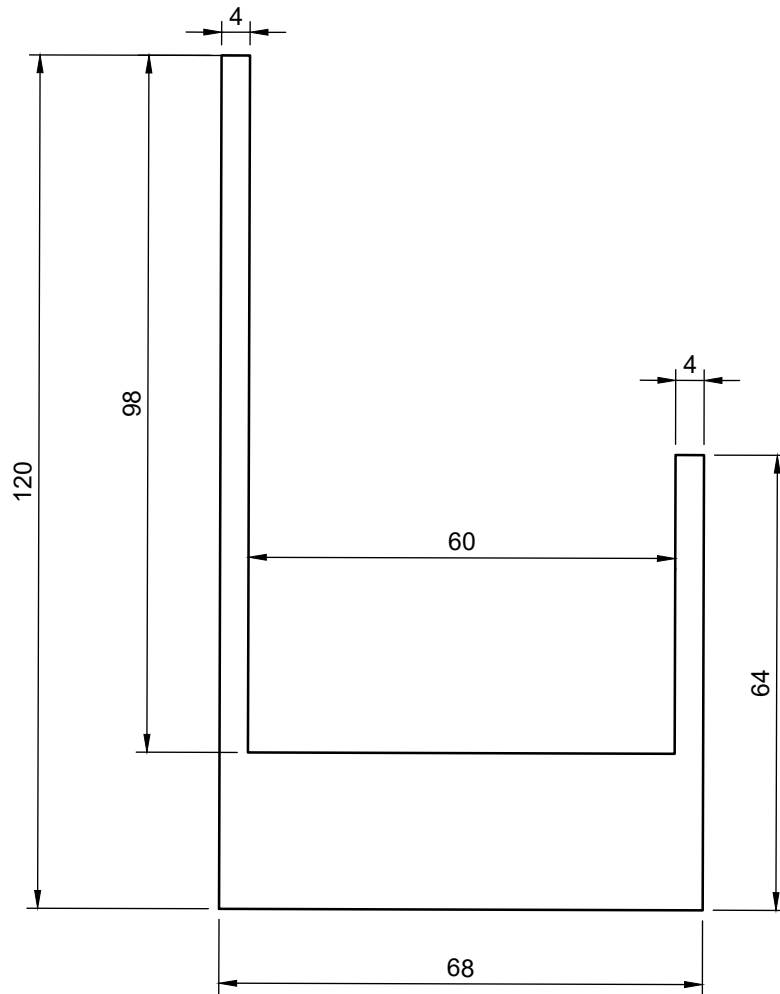
Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Motor Stirling	1:2
		Pieza:	N° de plano:
		Pasador biela desplazador	9/21
			Fecha: 25-06-2024



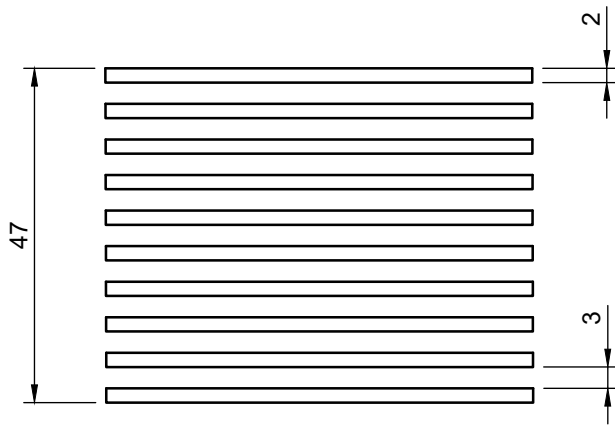
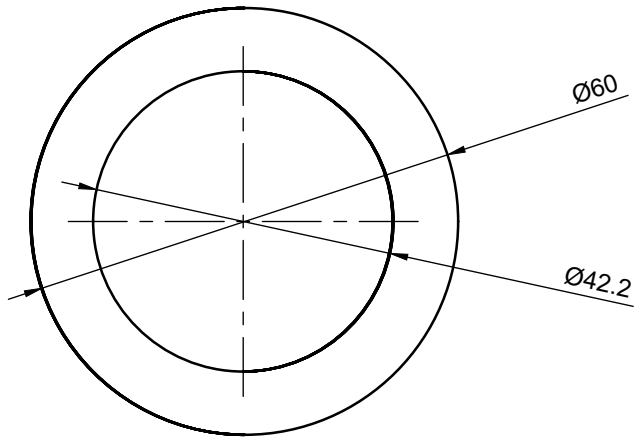
Diseñado por: Edgardo Merino	<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:2	A4
	Pieza: Pasador desplazador	N° de plano: 10/21	Fecha: 25-06-2024



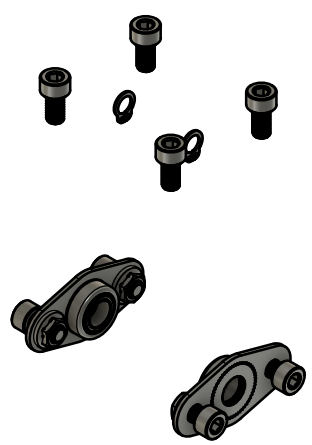
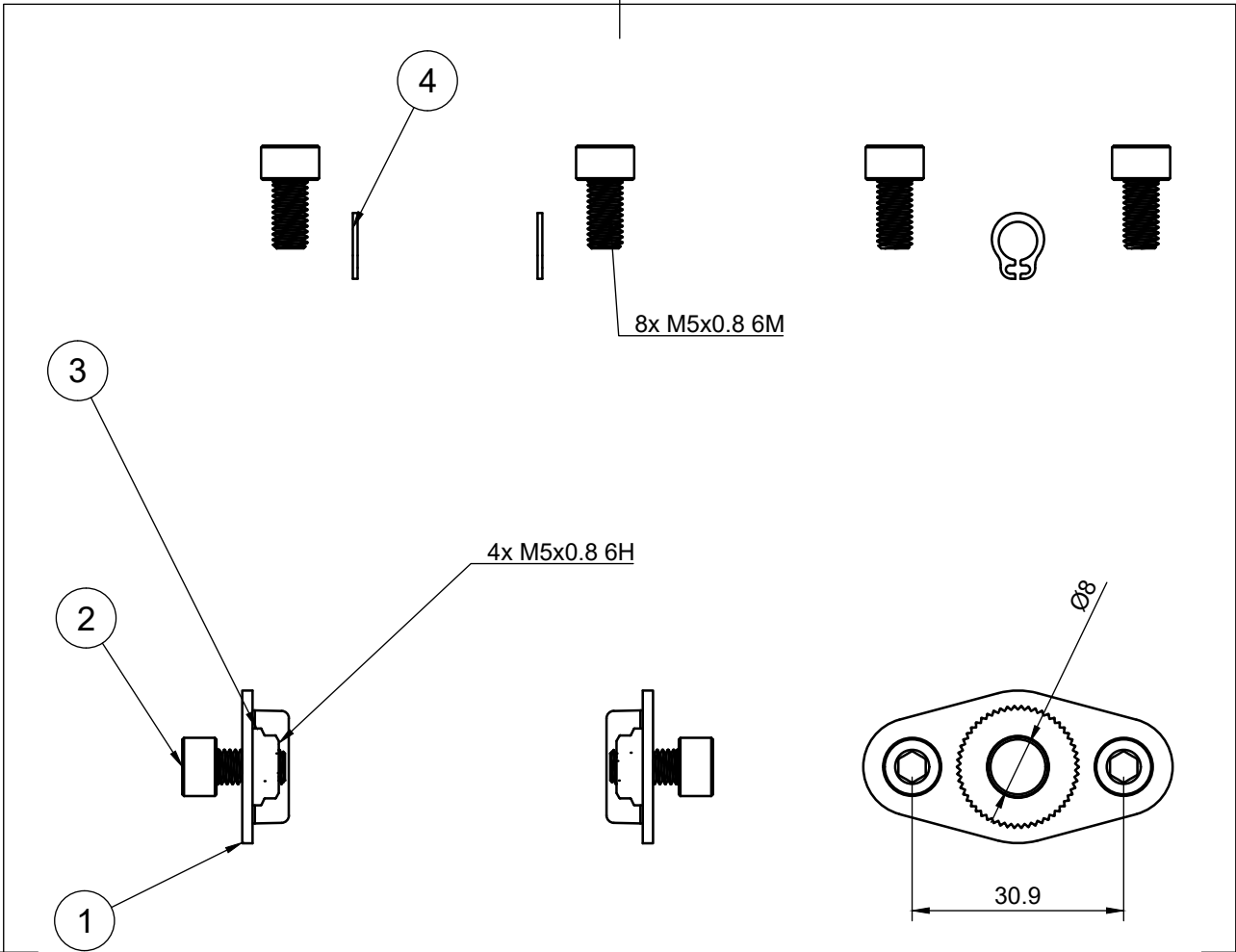
Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Motor Stirling	1:2
		Pieza: Placa de unión a montaje	N° de plano: 11/21
			Fecha: 25-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino	<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>		
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:1	A4
	Pieza: Tapa de seguridad	N° de plano: 12/21	Fecha: 25-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.	Motor Stirling	1:2	A4
	Pieza: Aletas	N° de plano: 13/21	Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	2	4473N18_Mounted Ball Bearing with Two-Bolt Flange
2	8	91290A224_Alloy Steel Socket Head Screw
3	4	94920A300_Medium-Strength Steel Serrated Flange Locknut
4	2	98541A114_External Retaining Ring

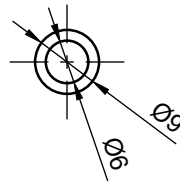
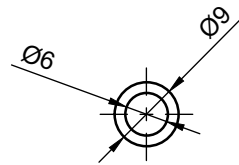
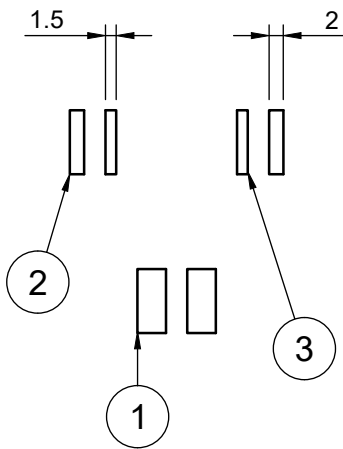
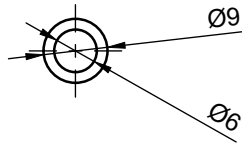
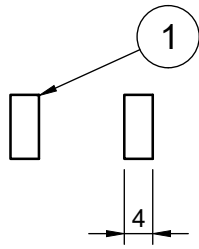
Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Motor Stirling	1:1	A4
Pieza: Componentes industriales	N° de plano: 14/21	Fecha: 25-06-2024





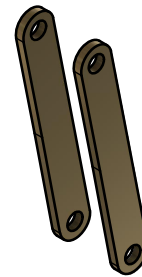
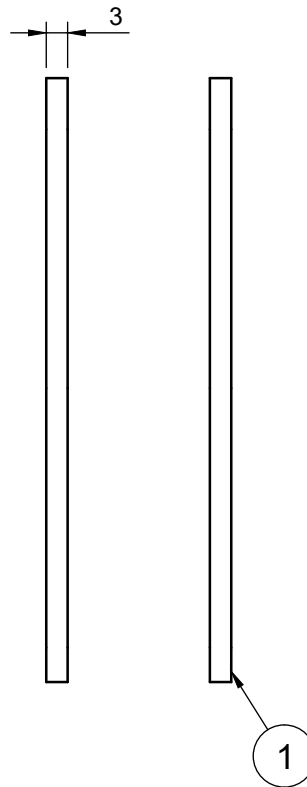
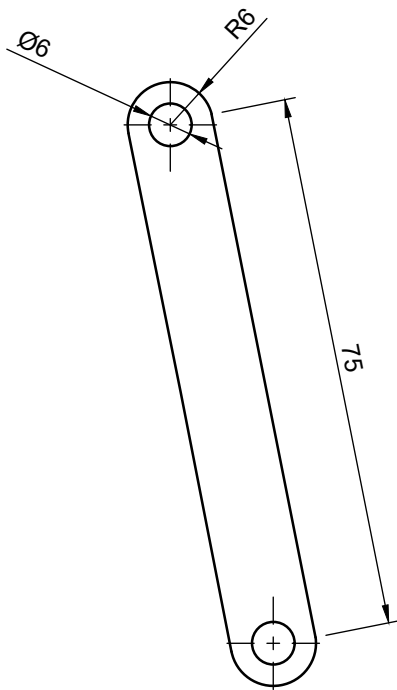
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	4	Separador partes motor
2	2	Separador ejes 2mm
3	2	Separador ejes 1.5mm

Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

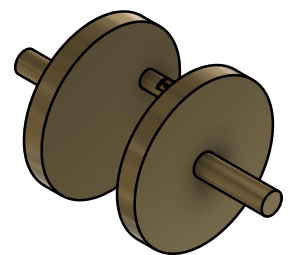
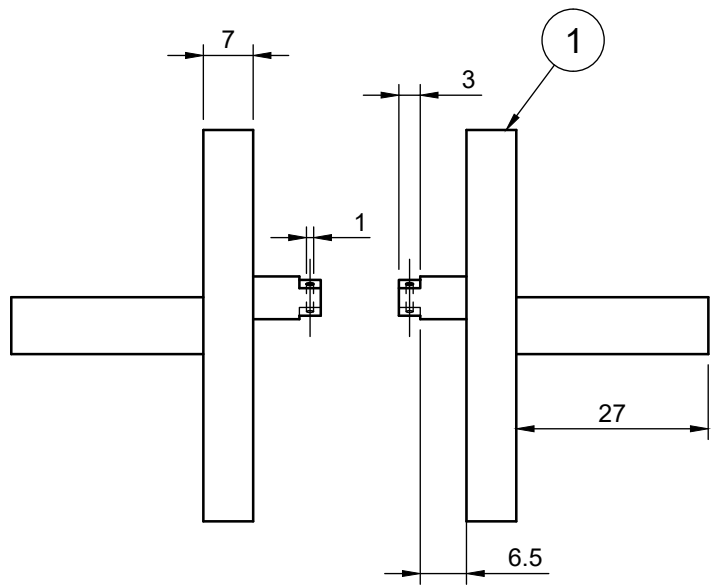
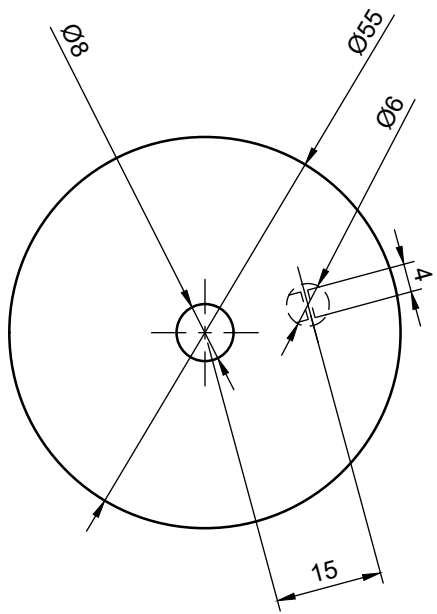
Motor Stirling	1:1	A4
Pieza: Separadores ejes	N° de plano: 15/21	Fecha: 25-06-2024



Lista de piezas		
elemento	ctd	número de pieza
1	2	Biela

Diseñado por: Edgardo Merino
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.

<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>		
Motor Stirling	1:1	A4
Pieza: Bielas pistón	N° de plano: 16/21	Fecha: 25-06-2024



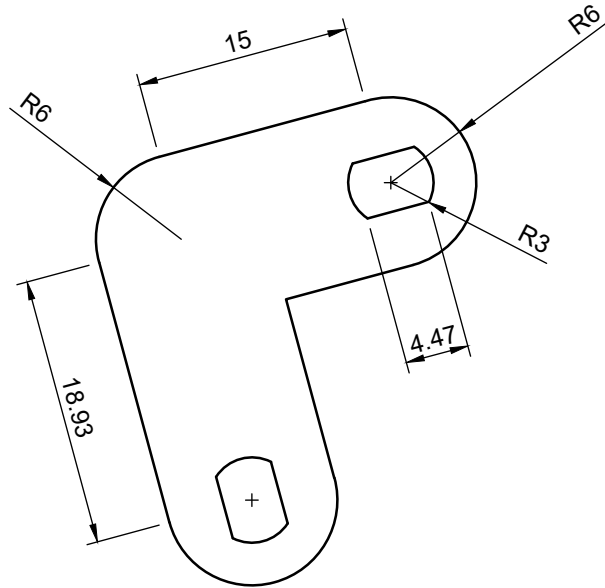
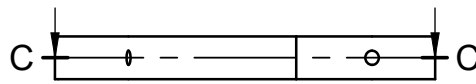
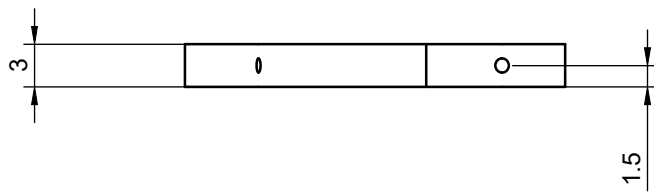
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	2	Volante de inercia

Diseñado por:  
Edgardo Merino

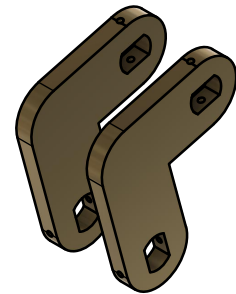
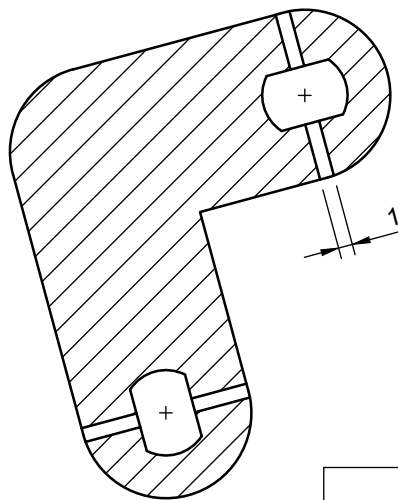
Departamento Ing. Mecánica  
FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Motor Stirling	1:1	A4
Pieza: Eje volante de inercia	N° de plano: 17/21	Fecha: 25-06-2024



C-C (2:1)



Lista de piezas

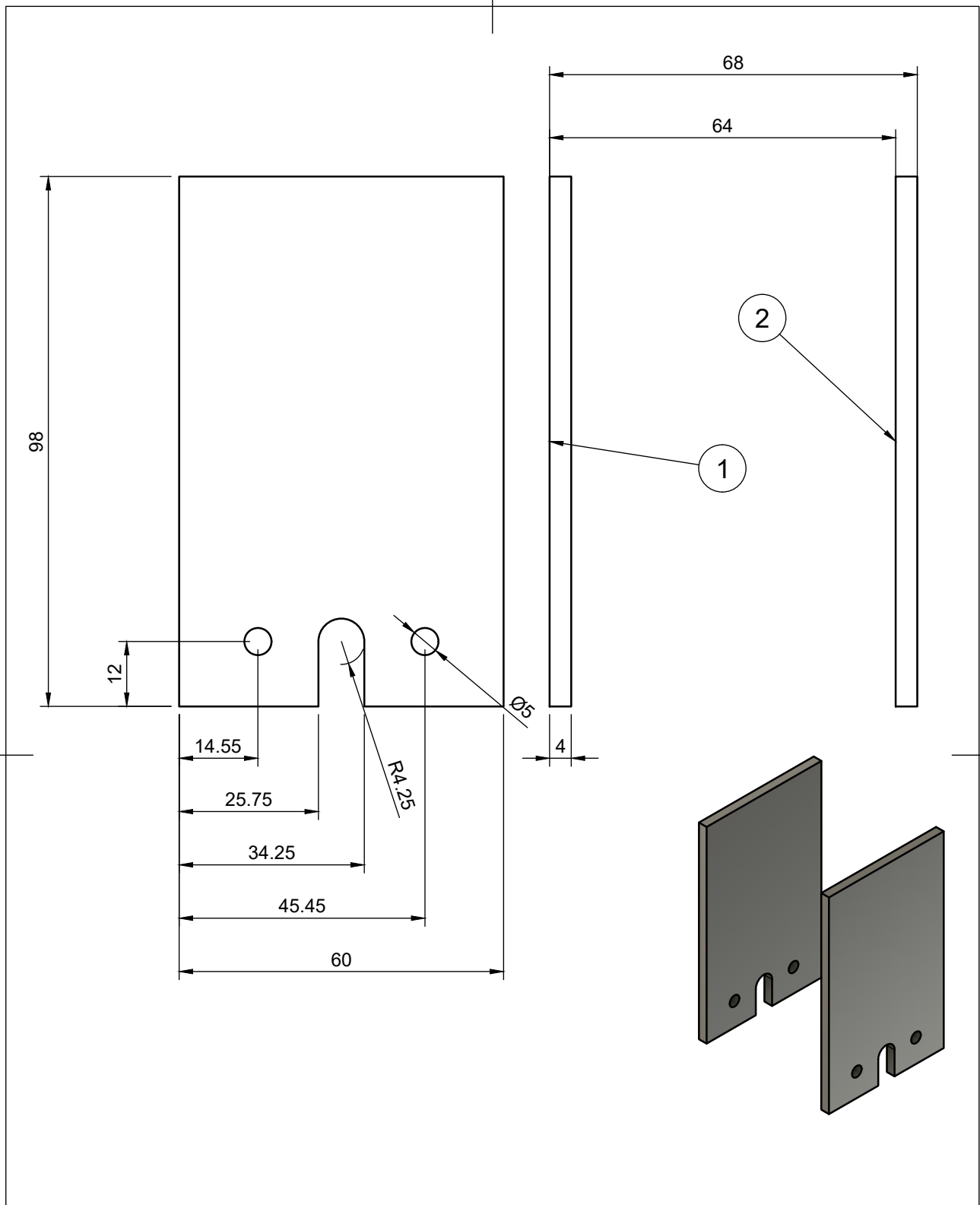
elemento	ctd	nombre de pieza
1	2	Eje a desplazador

Diseñado por:  
Edgardo Merino

Departamento Ing. Mecánica  
FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Motor Stirling	1:1	A4
Pieza: Brazo desplazador	N° de plano: 18/21	Fecha: 25-06-2024



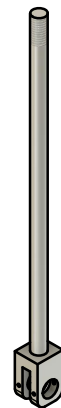
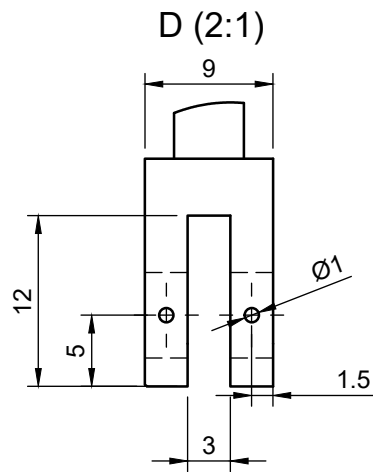
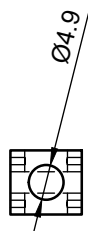
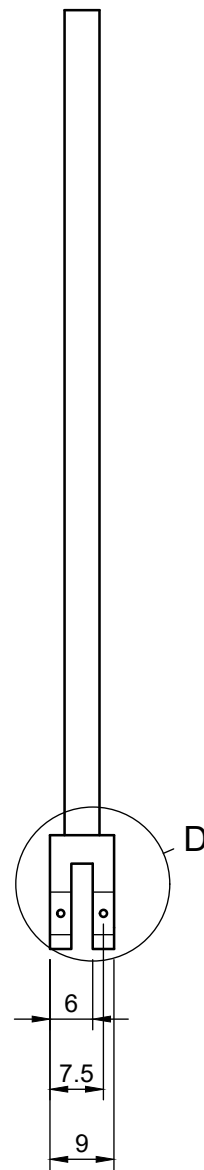
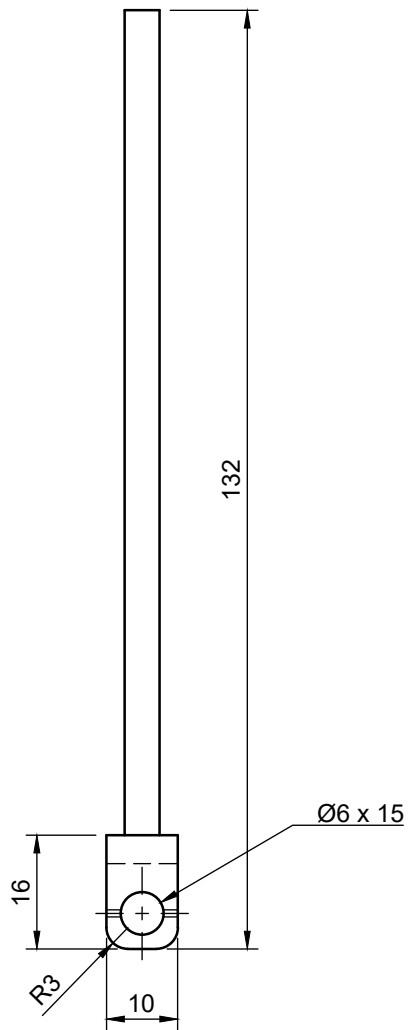
Lista de piezas		
elemento	ctd	nombre de pieza
1	1	Placa lateral soporte motor
2	1	Placa lateral soporte motor1

Diseñado por:  
**Edgardo Merino**

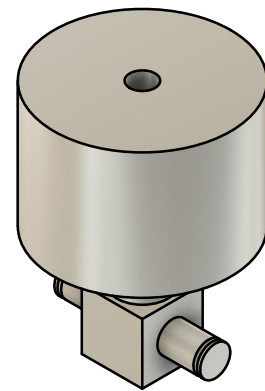
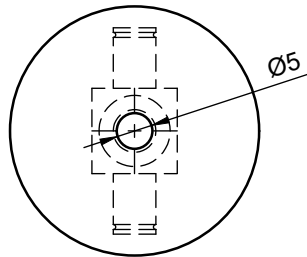
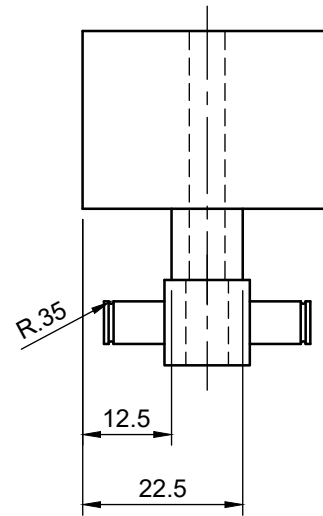
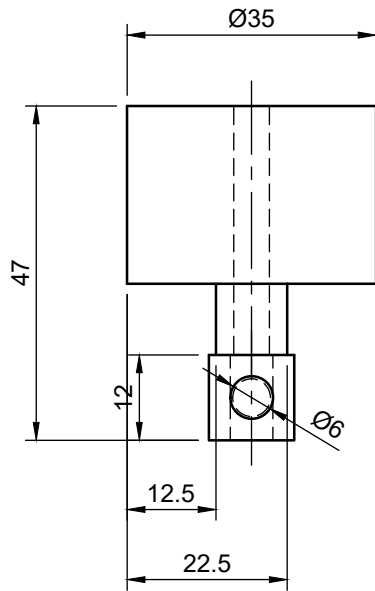
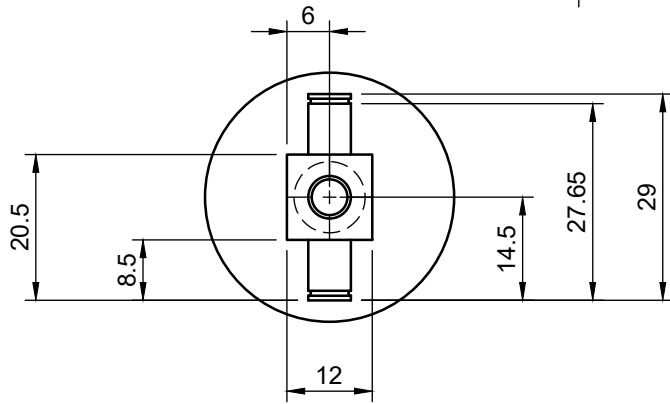
Departamento Ing. Mecánica  
 FCFM, Universidad de Chile.

**Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.**

Motor Stirling	1:1	A4
Pieza: Placas laterales	N° de plano: 19/21	Fecha: 25-06-2024



Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Motor Stirling	1:1
		Pieza: Barra desplazador y conector	N° de plano: 20/21
			Fecha: 25-06-2024
			A4



Diseñado por: Edgardo Merino		<b>Diseño y dimensionamiento de un disco parabólico Stirling, para uso docente.</b>	
Departamento Ing. Mecánica FCFM, Universidad de Chile.		Motor Stirling	1:1
		Pieza: Pistón conector	N° de plano: 21/21
			Fecha: 25-06-2024

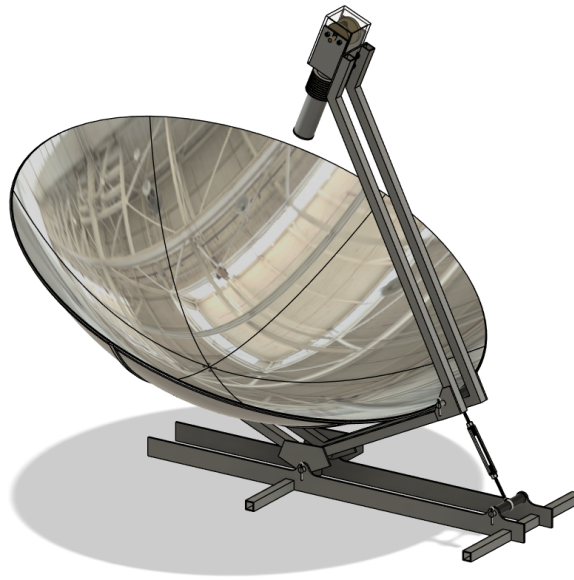
## Anexo E. Guía de laboratorio



# Guía de Laboratorio

## Disco Parabólico Stirling

**Profesor:** Nombre profesor  
Auxiliar: Nombre auxiliar  
Ayudante: Nombre ayudante



Como actividad evaluativa de la sesión de laboratorio, se debe generar un reporte técnico, el cual debe tener (como mínimo) lo siguiente:

- **Formato:** Título del laboratorio, membrete del departamento y de la universidad, código del curso y número de página. No es necesario que se haga una portada, basta con que el documento tenga un título claro en la parte superior. El membrete del departamento y de la universidad, el código del curso y el número de página deben ir en todas las páginas del documento. Se espera que el reporte no supere las 6 páginas tamaño carta y que la letra sea de tamaño mínimo 11 pt (referencia LaTeX).
- **Marco teórico:** Se debe describir el ciclo termodinámico de un motor Stirling  $\beta$ , junto al mecanismo de funcionamiento del motor que permite generar el ciclo mencionado anteriormente (pistón, desplazador, etc.). Se debe describir el funcionamiento de un disco parabólico y su geometría (ángulos, radio, área, punto focal, etc.).
- **Descripción de la actividad:** Se debe describir brevemente la actividad realizada; qué equipo se estudió, componentes, bosquejo de la instalación, instrumentación, etc. Se espera que alguien que lea el reporte sea capaz de decir qué fue lo que hicieron.

- **Metodología:**

1. Montar concentrador solar Stirling en el lugar indicado por el cuerpo docente.
2. Equiparse con los instrumentos de protección personal adecuados y utilizar protector solar para evitar quemaduras y daños oculares.
3. Verificar la posición del sol con respecto al disco, medir la irradiancia y direccionar el disco parabólico de tal forma que quede normal al sol.
4. Ajustar la posición del motor con respecto al punto focal.
5. Dar un impulso inicial al motor, de tal manera que inicie el ciclo.
6. Dejar funcionar el motor por unos minutos hasta llegar a estado estacionario.
7. Registrar los valores medidos por los sensores disponibles (temperatura, ángulo, RPM, torque, etc.) e ir variando la carga que se le aplica al motor por medio del generador eléctrico.
8. Retirar el concentrador solar de la posición normal al sol y esperar a que el motor deje de girar.
9. Desarmar el montaje y guardar las partes.

Se debe describir qué fue lo que se hizo y cómo se hizo; qué se midió, cómo se midió y cuál es “la receta”. Se busca que alguien pueda repetir la actividad leyendo lo que ustedes redacten.

- **Memoria de cálculo:** Se deben detallar todas las ecuaciones utilizadas para realizar los cálculos pertinentes. No basta con copiar las ecuaciones, se deben describir y mencionar qué significa cada variable.
- **Resultados:** Se deben entregar gráficos y tablas que sean legibles. Cada valor debe ir con su unidad de medida respectiva y utilizar un número de decimales acorde a la resolución del instrumento. Los resultados que se deben obtener corresponden a las siguientes actividades:
  1. **Curvas características:** Durante la actividad de laboratorio, se dejó girar el motor a máximas RPM y se fue variando la intensidad del freno aplicado al motor (registrando las mediciones obtenidas de los sensores a cada variación), haciendo descender las RPM de este. De esta actividad se pide construir 4 gráficos: 1 gráfico que muestre el torque vs. RPM, 1 gráfico que muestre la potencia vs. RPM, 1 gráfico que muestre la eficiencia vs. RPM y otro gráfico que muestre la diferencia de temperatura entre fuente caliente y fría vs. RPM.
- **Análisis y discusión de resultados:** Una vez obtenidos los resultados, se deben describir y analizar en función de la física que gobierna el fenómeno. En esta sección pueden comentar acerca de las principales fuentes de error que podrían haber afectado el desarrollo del experimento.