

Universidad de Nariño



Diseño, construcción y análisis de eficiencia de un Motor Stirling impulsado por una fuente de calor solar.

Autor

**Juan Felipe Insuasti Paz
Candidato a Maestría**

**PhD. Luis Aphranio Portilla Salazar
Asesor de Trabajo de Grado**

**PhD. Jaime David Mora Paz
Co-Asesor de Trabajo de Grado**

**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Física
San Juan de Pasto**

Contenido

Resumen	1
1. Introducción	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Máquinas térmicas	3
2.2. Motor Stirling	3
2.3. Investigaciones previas	5
2.4. Fundamentos de diseño y termodinámica	7
3. Concepto de diseño	14
3.1. Requerimientos	14
3.2. Criterios de evaluación	17
3.3. Alternativas de diseño	18
3.4. Materiales de construcción	23
3.5. Matriz de selección	23
4. Diseño mecánico detallado	26
4.1. Concentrador cóncavo esférico	26
4.2. Cálculo de engranajes	27
4.3. Boceto	30
4.4. Descripción de los componentes del dispositivo	31
5. Programación y componentes electrónicos	35
5.1. Programación con Python	35
5.2. Componentes electrónicos	44
6. Pruebas de Operación	47
6.1. Reflectividad	47
6.2. Protocolos de experimentación	49
6.3. Ejecución de pruebas	51
6.4. Resistencia eléctrica de trabajo	59
6.5. Cálculo de eficiencia teórico - práctica	61
6.6. Análisis de resultados	75

7. Conclusiones	85
7.1. Aportes del proyecto	85
7.2. Resultados principales	86
7.3. Cumplimiento de objetivos	87
7.4. Recomendaciones	88
A. Apéndice: Códigos Python	89
A.1. Cálculos Python	89
A.2. Código general	93
A.3. Código para Calibración	104
B. Apéndice: Códigos Arduino	110
B.1. Sistema de seguimiento solar	110
B.2. Medidor de voltaje	112
B.3. Medidor de temperatura	113
B.4. Código general	115
B.5. Código para Calibración	121
C. Apéndice: Planos del Dispositivo	124

Resumen

Con el creciente interés en el estudio de los motores de combustión externa, caracterizados por su eficiencia y con la necesidad de encontrar nuevas alternativas de producción de energías limpias, surge el desarrollo de este proyecto, innovador en el departamento de Nariño. En este trabajo se lleva a cabo el diseño y construcción de un motor Stirling y un sistema de seguimiento solar, utilizando software CAD-CAM e impresión 3D, obteniendo así un prototipo funcional que puede transformar energía térmica en energía mecánica, y posteriormente energía eléctrica mediante un dínamo. Con el objetivo de poner a prueba su eficiencia, se realizan pruebas con dos fuentes de calor: combustión y radiación solar. Las pruebas siguen un protocolo experimental implementado para tal fin, el cual se apoya en un sistema de adquisición de datos construido y programado por el autor, usando Arduino y programación en Python. Con los datos recaudados, se realiza un análisis de los ciclos Stirling con y sin regeneración que son comparados con los datos registrados en las pruebas prácticas, realizadas en la ciudad de Pasto y en el municipio de Buesaco. El análisis incluye el cálculo de eficiencias teóricas, reales, factores de desempeño y un índice de rendimiento relativo. Finalmente, mediante el índice de aprovechamiento de energía propuesto aquí (cociente entre el calor suministrado y el calor absorbido por el sistema), cuando se usa radiación solar, gracias al concentrador solar construido, el gas de trabajo logra aprovechar mucho mejor la energía disponible que cuando se aplica calor de combustión.

1. Introducción

Una máquina térmica es un dispositivo diseñado para transformar energía térmica en trabajo mecánico, aprovechando la diferencia de temperatura entre dos focos. Dentro de este tipo de máquinas se encuentran los motores de combustión externa, donde la combustión ocurre fuera del motor, permitiendo calentar un fluido que realiza trabajo en un sistema cerrado. Los motores Stirling son un ejemplo de estos, operando mediante un ciclo termodinámico cerrado que alterna el calentamiento y enfriamiento de un gas, produciendo así movimiento mecánico.

Las fuentes de calor por radiación solar aprovechan la energía del sol para generar calor, presentando ventajas en la disponibilidad y bajo costo en zonas con alta irradiación. Al ser una fuente constante y accesible, se convierte en una opción atractiva para aplicaciones que requieren energía térmica de bajo a medio rango de temperatura. Su versatilidad hace que sea una excelente alternativa para adaptarla a los motores Stirling.

La combinación de motores de combustión externa y fuentes de calor solar, ofrece un enfoque innovador y eficiente para la generación de energía. La capacidad de estos motores para operar con diversas fuentes de calor, junto con las ventajas de la radiación solar, permite una integración efectiva que promueve el uso sostenible y eficiente de los recursos energéticos disponibles.

Este proyecto se enfoca en el diseño, construcción y análisis de un motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar. A través del cual se plantea una comparativa del rendimiento del motor bajo fuentes de calor por combustión y radiación solar, como también de forma teórica, mediante un planteamiento termodinámico.

2. Marco Teórico

El presente marco teórico abarca conceptos fundamentales de los motores Stirling, iniciando con las máquinas térmicas y sus principios básicos. A continuación, se describe el funcionamiento del motor Stirling, con énfasis en sus ciclos termodinámicos. Además, se revisarán investigaciones previas relevantes, que han contribuido a una comprensión más profunda de estos motores y sus aplicaciones prácticas, a nivel internacional, nacional y local. Finalmente, se presentan las fórmulas clave que serán utilizadas en esta investigación para el diseño y construcción, como también para su posterior análisis de desempeño y eficiencia.

2.1. Máquinas térmicas

Las máquinas térmicas son dispositivos que operan mediante ciclos termodinámicos, transformando energía térmica en trabajo mecánico. El calor fluye desde un foco caliente a un foco frío, convirtiendo una parte de esa energía en trabajo útil.



Figura 1: Esquema fundamental de una máquina térmica.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1 se observa el esquema de una máquina térmica, donde Q_C es calor cedido por el foco caliente, W es el trabajo generado por la máquina térmica y Q_F es el calor cedido por la misma hacia el foco frío.

2.2. Motor Stirling

Los motores Stirling son motores de combustión externa que funcionan en base a los ciclos Stirling, produciendo trabajo neto mediante un intercambio de calor.

Este motor funciona bajo cuatro procesos: expansión isotérmica, enfriamiento isocoro, compresión isotérmica y calentamiento isocoro, cuyos detalles se explican más adelante. Este motor tiene un ciclo cerrado, donde el gas de trabajo (aire, helio, o hidrógeno), intercambia temperaturas en las fuentes de calor y frío que se encuentran en el sistema. A diferencia de los motores de combustión interna, estos no producen explosiones dentro de los cilindros, por medio de bujías o inyectores, sino que toman el calor necesario para su funcionamiento de fuentes de calor externas.

El funcionamiento del motor Stirling inicia con el calentamiento del gas contenido en el cilindro de foco caliente. Alcanzada la temperatura correspondiente, el émbolo que se encuentra dentro del cilindro comenzara a elevarse manteniendo su temperatura constante, en este punto el gas realiza un trabajo sobre el émbolo, por lo cual debe absorbe una cantidad igual de energía del foco caliente para mantener la temperatura (expansión isotérmica). Con el émbolo totalmente elevado el gas cede calor al regenerador a volumen constante, disminuyendo su energía interna y temperatura (enfriamiento isocoro). Una vez se da ese proceso, el émbolo empieza a descender a temperatura constante, generando así un trabajo sobre el gas, el cual cede una cantidad igual de calor al foco frío para mantener su temperatura (compresión isotérmica). Por último, el gas absorbe calor del regenerador a volumen constante, aumentando su energía interna y temperatura (calentamiento isocoro), como se observa en la Figura 2.

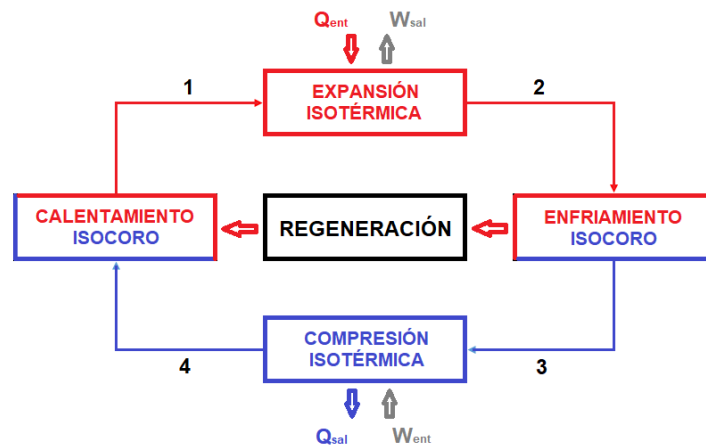


Figura 2: Esquema fundamental de Motor Stirling.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta los diagramas T-s (temperatura – entropía) y P-v (presión – volumen), en los cuales se puede observar el comportamiento de los procesos en el ciclo Stirling, Figura 3.

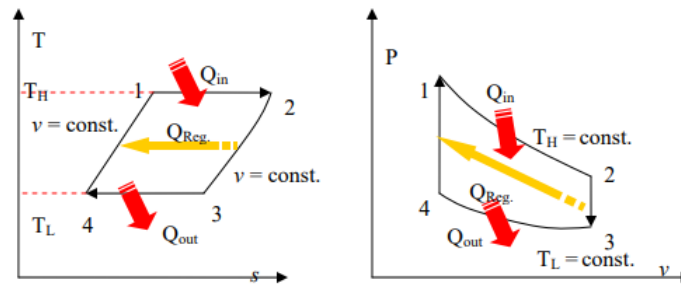


Figura 3: Diagrama Temperatura - Entropía y Presión - Volumen. Fuente: [1]

2.3. Investigaciones previas

En esta sección se presentan estudios y avances en el campo de los motores Stirling impulsados por fuentes de calor por radiación solar. Estas investigaciones ofrecen un contexto que respalda el desarrollo de la presente investigación, a nivel internacional, nacional y local.

Investigaciones Internacionales

Institución: Universidad Autónoma de Nuevo León.

País: Mexico

Título: Diseño y fabricación de un motor Stirling de bajo diferencial de temperatura para la generación de energía eléctrica, mediante energía solar térmica.

Este proyecto se enfoca en el diseño y fabricación de un motor Stirling tipo Gamma, con un bajo diferencial de temperatura. Su objetivo es desarrollar una metodología que permita analizar cómo los parámetros de diseño y las condiciones operativas afectan el rendimiento del motor. El proceso incluye estudiar antecedentes del motor Stirling tipo Gamma, definir un modelo termodinámico y diseñar el sistema mecánico. Una vez construido el prototipo, se evaluarán los parámetros de diseño clave y su influencia en el ciclo de funcionamiento del motor. [2]

Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)

País: Perú

Título: Diseño y construcción de un motor Stirling, con energía solar como fuente de poder.

Este proyecto se enfoca en el desarrollo de un motor Stirling que opera con energía solar, incluyendo el estudio y aprovechamiento de esta fuente energética, y su análisis y cálculo. El proyecto abarca el diseño y construcción del motor, utilizando un concentrador solar. Además, se estudia la radiación solar en Cusco, se desarrolla un concentrador parabólico y se analizan los parámetros del motor Stirling. Finalmente, se realizan experimentos para evaluar su rendimiento, considerando también un sistema de refrigeración y la estructura ajustable. [3]

Investigaciones Nacionales

Institución: Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Cafam

País: Colombia

Título: Prototipo de sistema termosolar para la generación de energía eléctrica a través del motor Stirling.

Este proyecto se enfoca en desarrollar un prototipo de captación solar que convierta energía térmica en eléctrica mediante un motor Stirling acoplado a un captador termosolar. Este sistema permite almacenar energía eléctrica para usos básicos, como cargar un teléfono móvil. Utilizando un enfoque cuantitativo y exploratorio, se evaluó la generación de voltaje, obteniendo valores máximos de 5.56 V en laboratorio y 7.40 V en condiciones de campo. Los resultados positivos sugieren la viabilidad del sistema y su potencial para investigaciones futuras. [4]

Institución: Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

País: Colombia

Título: Análisis de la eficiencia de un colector solar de disco con motor Stirling en la ciudad de Armenia, Colombia.

Este proyecto se enfoca en el análisis de la eficiencia térmica y óptica de un sistema con colector de disco parabólico y motor Stirling en Armenia, Colombia, para generar electricidad. Con un concentrador solar de 65 cm de diámetro, se realiza-

ron mediciones de temperatura y radiación solar durante 5 meses, evaluando así la eficiencia del sistema. Se implementó un sistema de seguimiento solar automático controlado por Arduino, logrando una eficiencia térmica promedio del 39,6 % y una eficiencia óptica del 33 %, comparables con colectores de disco en otros estudios. [5]

Investigaciones locales

No se encontraron antecedentes a nivel local de este tema.

2.4. Fundamentos de diseño y termodinámica

Esta sección presenta los análisis y las fórmulas correspondientes para el diseño y construcción del dispositivo, abordando la parte mecánica y electrónica. Además, se incluyen las ecuaciones para calcular las eficiencias del sistema y factores específicos del entorno de las pruebas.

Cálculo de engranajes

Un engranaje es un mecanismo que transfiere potencia mecánica de un componente a otro. Para este cálculo se tiene en cuenta, el módulo (parámetro que define el tamaño de los dientes), número de dientes, ángulo de presión (valor estándar 20°), diámetro externo, primitivo e interno, el círculo de trazado, el espesor del diente y el radio del diente. [6]

Módulo (M)

$$M = \frac{\text{Diámetro primitivo}}{\text{Número de dientes}} \quad (1)$$

Diámetro externo (De)

$$De = \text{Módulo} \times (\text{Número de dientes} + 2) \quad (2)$$

Diámetro interno (Di)

$$Di = \text{Diámetro primitivo} - (2 \times \text{Módulo} \times \text{Constante Di}) \quad (3)$$

Circulo de trazado (Ct)

$$Ct = \text{Diámetro primitivo} \times \text{Constante Ct} \quad (4)$$

Debido a que el ángulo de presión es de 20° la constante (Ct) es de: 0,93969

Espesor de diente (E)

$$E = \text{Módulo} \times \text{Constante E} \quad (5)$$

Radio de diente (R)

$$R = \text{Módulo} \times 0,3 \quad (6)$$

Cálculo del divisor resistivo

Es un circuito compuesto por dos resistencias conectadas en serie que divide el voltaje de entrada, generando así un voltaje de salida menor. [7]

$$V_{\text{sal}} = \frac{V_{\text{ent}} \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

Donde

$V_{\text{sal}} \rightarrow$ voltaje de salida (V)

$R_1 \rightarrow$ resistencia 1 (Ω)

$R_2 \rightarrow$ resistencia 2 (Ω)

Cálculo de potencia

La potencia de salida es la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. [8]

$$P_{\text{sal}} = \frac{V^2}{R} \quad (8)$$

Donde

$P_{\text{sal}} \rightarrow$ potencia de salida (W)

$V \rightarrow$ voltaje (V)

$R \rightarrow$ resistencia (Ω)

Cálculo de eficiencia

Es una medida que indica qué tan efectivo es un sistema para convertir la energía

de entrada en trabajo útil o energía de salida. [9]

$$\eta = \frac{P_{\text{sal}}}{\dot{Q}_{\text{ent}}} \quad (9)$$

Donde

$\eta \rightarrow$ eficiencia

$P_{\text{sal}} \rightarrow$ potencia de salida (W)

$\dot{Q}_{\text{ent}} \rightarrow$ tasa de calor de entrada (W)

Cálculo de presión atmosférica

Es la fuerza ejercida por el peso del aire, esta varía con la altitud y las condiciones meteorológicas, teniendo un valor más alto al nivel del mar. [10]

$$p = p_0 \times \left(1 - \frac{L \times h}{T_0} \right)^{\frac{g \times M}{R \times L}} \quad (10)$$

Donde

$p \rightarrow$ presión atmosférica de acuerdo a la altitud de las pruebas realizadas (Pa)

$p_0 \rightarrow$ presión a nivel del mar

$L \rightarrow$ gradiente de la temperatura (K/m)

$h \rightarrow$ altitud a nivel del mar (m)

$T_0 \rightarrow$ temperatura en la superficie (K)

$g \rightarrow$ aceleración gravitacional (m/s^2)

$M \rightarrow$ masa molar del aire (kg/mol)

$R \rightarrow$ constante de los gases ideales ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

Cálculo de densidad del aire

Es la cantidad de masa de aire contenida en un volumen específico. [11] [12]

$$\rho_a = \frac{p_d}{R_d \times T} + \frac{p_v}{R_v \times T} \quad (11)$$

Donde

$\rho_a \rightarrow$ densidad del aire (kg/m^3)

$p_d \rightarrow$ presión parcial del aire seco (Pa)

$p_v \rightarrow$ presión parcial del vapor de agua (Pa)

$R_d \rightarrow$ constante de los gases específicos para el aire seco ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

$R_v \rightarrow$ constante de los gases específicos para el vapor de agua ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

$T \rightarrow$ temperatura ambiente en Kelvin (K)

Presión parcial del aire seco (p_d)

$$p_d = p - p_v \quad (12)$$

Donde

$P \rightarrow$ presión atmosférica

Presión parcial del vapor de agua (p_v)

$$p_v = HR \times p_{sat} \quad (13)$$

Donde

$HR \rightarrow$ humedad relativa

$p_{sat} \rightarrow$ presión de saturación de vapor de agua

Presión de saturación de vapor de agua (p_{sat}) [13]

$$p_{sat} = 6,1078 \text{ hPa} \times 10^{\frac{7,5 \times T_{roc}}{237,3 + T_{roc}}} \quad (14)$$

Donde

$T_{roc} \rightarrow$ temperatura de rocío ($^{\circ}\text{C}$)

Cálculo del número de moles

Es una medida que representa la cantidad de sustancia en un sistema. [14]

$$n = \frac{m_a}{M} \quad (15)$$

Donde

$m_a \rightarrow$ masa del aire (kg)

$M \rightarrow$ masa molar del aire (kg/mol)

Cálculo del trabajo realizado por el aire

Es el trabajo realizado por el aire dentro del motor Stirling. [15]

$$W = n \times R \times (T_1 - T_2) \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (16)$$

Donde

$n \rightarrow$ número de moles (mol)

$R \rightarrow$ constante de los gases ideales (J/(mol · K))

$T_1 \rightarrow$ temperatura foco caliente (K)

$T_2 \rightarrow$ temperatura foco frío (K)

$V_1 \rightarrow$ volumen inicial (m^3)

$V_2 \rightarrow$ volumen final (m^3)

Cálculo del calor de absorción

En el calor de absorción del motor se presenta dos cálculos. El primero corresponde a los Ciclos Stirling con regeneración, es decir, que el motor dispone de un regenerador, el cual almacena energía cuando el gas se desplaza desde el foco caliente hacia el foco frío y lo suministra nuevamente cuando el gas retorna al foco caliente. El segundo corresponde a los Ciclos Stirling sin regeneración, es decir, que no dispone de ningún regenerador que retorne el calor al gas de trabajo. Es importante aclarar que los Ciclos Stirling con regeneración tienen la misma eficiencia que los Ciclos teóricos ideales de Carnot. [15]

Calor de absorción sin regeneración

$$Q_{abs} = (n \times R \times T_1 \times \ln(\frac{V_2}{V_1})) + (n \times C_v \times (T_1 - T_2)) \quad (17)$$

Calor de absorción con regeneración

$$Q_{abs} = n \times R \times T_1 \times \ln(\frac{V_2}{V_1}) \quad (18)$$

Donde

$n \rightarrow$ número de moles (mol)

$R \rightarrow$ constante de los gases ideales ($J/(mol \cdot K)$)

$T_1 \rightarrow$ temperatura foco caliente (K)

$T_2 \rightarrow$ temperatura foco frío (K)

$V_1 \rightarrow$ volumen inicial (m^3)

$V_2 \rightarrow$ volumen final (m^3)

$C_v \rightarrow$ capacidad calorífica molar a volumen constante ($J/mol \cdot K$)

Cálculo del factor de desempeño

El factor de desempeño es la relación entre la eficiencia práctica obtenida del motor Stirling en las pruebas realizadas y la eficiencia teórica calculada con y sin regeneración. Este cálculo permite medir qué tan cerca está el motor Stirling de

alcanzar su eficiencia máxima posible. [11]

$$FDS_c = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Sc}} \quad (19)$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Ss}} \quad (20)$$

Donde

$FDS_c \rightarrow$ factor de desempeño Stirling con regeneración

$FDS_s \rightarrow$ factor de desempeño Stirling sin regeneración

$\eta_{pr\acute{a}ctica} \rightarrow$ eficiencia práctica

$\eta_{Sc} \rightarrow$ eficiencia Stirling con regeneración

$\eta_{Ss} \rightarrow$ eficiencia Stirling sin regeneración

Cálculo de la potencia solar

Es la cantidad de energía que se puede generar a partir de la radiación solar.

$$P_{solar} = A_{Efec} \times I_{solar} \times \eta \quad (21)$$

Donde

$P_{solar} \rightarrow$ potencia solar capturada (W)

$A_{Efec} \rightarrow$ área de apertura efectiva del concentrador (m^2)

$I_{solar} \rightarrow$ irradiancia solar (W/m^2)

$\eta \rightarrow$ reflectividad

Cálculo de la tasa de calor de entrada requerida

Es la tasa de calor de entrada que necesita el sistema para funcionar, con fuentes de calor por combustión o con radiación solar.

$$\dot{Q}_{req} = Q_{abs} \times CPS \quad (22)$$

Donde

$\dot{Q}_{sum} \rightarrow$ tasa de calor de entrada suministrada (W)

$\dot{Q}_{req} \rightarrow$ tasa de calor de entrada requerida, con y sin regeneración (W)

$Q_{abs} \rightarrow$ calor de absorción con y sin regeneración por ciclo (J)

CPS $\rightarrow$ ciclos por segundo

Cálculo del índice de rendimiento relativo de las fuentes de calor

Comparativa del desempeño de las fuentes de calor por combustión y por radiación solar que tienen entre sí.

$$\text{IRR} = \frac{\eta_{\text{solar}}}{\eta_{\text{combustión}}} \quad (23)$$

Donde

$\eta_{\text{solar}} \rightarrow$ eficiencia con fuente de calor por radiación solar

$\eta_{\text{combustión}} \rightarrow$ eficiencia con fuente de calor por combustión

3. Concepto de diseño

Este capítulo aborda el planteamiento del diseño del dispositivo, estableciendo los requerimientos necesarios y los criterios fundamentales de evaluación. Aquí se definen los parámetros de diseño que permiten cumplir con los objetivos del proyecto, evaluando las posibles alternativas y seleccionando los materiales de construcción más adecuados. Finalmente, se presenta una matriz de selección que compara las opciones presentadas, con las cuales mediante una evaluación se hace la elección final, asegurando que el diseño cumpla con todos los requisitos establecidos.

3.1. Requerimientos

Se establece un estudio relacionado a las condiciones requeridas del dispositivo, donde se plantea en base a su funcionamiento las restricciones de diseño y las condiciones de operación, como también las consideraciones de manufactura.

Funciones

El dispositivo se divide en dos secciones, por un lado, se encuentra el motor Stirling y por otro, el sistema de seguimiento solar. La descripción de los mismos se hará por separado.

Motor Stirling

Se requiere de un motor Stirling que funcione en la intemperie, bajo fuentes de calor por radiación solar, basado en los principios termodinámicos expuestos en el Capítulo 2, sección 2.2.

Sistema de seguimiento solar

La luz solar es la fuente de calor del motor Stirling elegida en este proyecto, reemplazando a las fuentes de combustión de alcohol o derivados de petróleo. Para trabajar con energía solar, se requiere de un diseño que tenga la capacidad de transferir calor a uno de los cilindros del motor. El hecho de que sea solar, indica que se debe implementar un sistema que siga la posición solar en las horas de trabajo establecidas. Por lo tanto, uno de los objetivos principales de diseño es el de orientar el dispositivo en el ángulo más apropiado según la hora.

Restricciones de diseño

Es importante tener en cuenta las restricciones que se tienen en todos los aspectos del dispositivo, empezando por las fuentes de calor, las dimensiones de trabajo y los materiales de construcción.

Fuentes de calor

- Debido a la búsqueda de nuevas alternativas de energía limpia, además de implementar procesos innovadores en este tipo de motores se opta por una fuente de calor solar.

Dimensiones de trabajo

- Para la fabricación de algunos componentes del modelo se hará uso de algunos equipos, entre ellos una impresora 3D, la cual tiene unas dimensiones establecidas de trabajo: 40cm × 40cm × 40cm, ancho, largo, alto, respectivamente, lo que lleva a restringir los componentes a esas dimensiones.

Materiales de construcción

- Para los componentes del motor se debe hacer uso de materiales resistentes a altas temperaturas, al igual que los materiales de sujeción usados para el mismo.
- La impresora 3D tiene la capacidad para trabajar con diferentes materiales, por ende, se debe buscar uno que tenga las propiedades mecánicas requeridas para el sistema.

Condiciones de operación

Es importante considerar las condiciones a las que va a estar sometido el dispositivo, como también, las horas de trabajo y la accesibilidad a las conexiones eléctricas.

Horas de trabajo

- De acuerdo a la información obtenida las horas de trabajo ideales son de las 9:00 am hasta las 3:00 pm donde se percibe mayor radiación solar.

Condiciones climáticas

- Debido a que la fuente de calor será solar, es importante considerar las condiciones climáticas adecuadas para el correcto funcionamiento del dispositivo. Para ello se considera que es necesario que en las horas de trabajo el cielo este completamente despejado (ausencia de nubes), además de una radiación solar acorde a las necesidades del motor.

Instalaciones eléctricas

- Para la obtención de datos del comportamiento del dispositivo será necesario el uso de instrumentos de medición, los cuales requieren de conexiones eléctricas, por ende, es necesario considerar la ubicación del dispositivo.

Consideraciones de manufactura

Para las consideraciones de manufactura se tiene en cuenta los procesos de producción, el tiempo de fabricación y el costo de adquisición y trabajo de los diferentes componentes del dispositivo.

Procesos de producción

Para la elaboración del modelo, se tienen disponibles los siguientes equipos:

- Impresora 3D
- Torno
- Fresadora
- Prensa hidráulica
- Soldador

Con respecto a las instalaciones de trabajo, se cuenta con el multi-taller de física y el taller particular Inemco. Estos cuentan con las herramientas y equipos necesarios para el correcto desarrollo del proyecto, además de contar con la impresora 3D.

Tiempo de fabricación

Motor Stirling

Es necesario considerar los tiempos de corte y orificios de las bielas, doblado de

ejes de pistones, torneado de volante de inercia, pegamento siliconado resistente a altas temperaturas para cilindros y pistones, además de calibrar y poner a punto todas las herramientas y equipos que se dispondrán para la ejecución de estos componentes.

Sistema de seguimiento solar

Es necesario considerar los tiempos de impresión 3D por cada componente del sistema de seguimiento, extracción de soportes y bases de las piezas después de imprimir, además de la calibración y limpieza del equipo después de cada impresión.

Base del dispositivo

Es necesario considerar los tiempos de orificios y remaches de cada una de las piezas de la base, así como también la correcta ubicación de los componentes tanto del motor Stirling como el sistema de seguimiento solar.

3.2. Criterios de evaluación

Es necesario definir los aspectos cualitativos que se deben evaluar en las alternativas de diseño de cada uno de los componentes del dispositivo, contemplando tanto el motor Stirling, como el sistema de seguimiento solar.

Motor Stirling

Para esta sección del dispositivo se debe tener en cuenta algunas características esenciales, como la resistencia térmica de los materiales, la disposición de los cilindros y la ubicación en el dispositivo.

Resistencia térmica de los materiales → Construcción de los componentes del motor con materiales resistentes a altas temperaturas.

Disposición de los cilindros → Ubicación de los cilindros acorde a la exposición de las fuentes de acción (calor – frío).

Ubicación en el dispositivo → Apropiaada ubicación relativa del motor con respecto al sistema de seguimiento solar.

Sistema de seguimiento solar

Para esta sección del dispositivo se debe tener en cuenta algunas características esenciales, como las horas de trabajo por día y la precisión del sistema.

Horas de trabajo → Análisis posicional del sol respecto a las horas del día y un estudio de radiación de acuerdo al desplazamiento solar.

Precisión del sistema → Acorde funcionamiento del sistema respecto a la trayectoria y posición del sol.

Dispositivo general

Para el dispositivo general que se conforma por el motor Stirling y el sistema de seguimiento solar se considera como característica esencial la facilidad de montaje y mantenimiento de todos los componentes que lo conforman, priorizando para ello, los sistemas de sujeción a implementar.

3.3. Alternativas de diseño

Tras realizar el estudio pertinente de todas las funciones correspondientes al dispositivo, se propone una serie de alternativas para suplir cada una de estas. Para ello se expone las diferentes opciones que se plantean, con una descripción de su funcionamiento.

Tipos de Motor Stirling

Tipo alfa

Se compone de dos cilindros – pistón completamente sellados, es decir, no permiten el ingreso ni salida del fluido de trabajo, pero sí se conectan entre sí, ubicados a 90°, y están expuestos a una fuente de calor y fuente de frío respectivamente. Figura 4.

Tipo beta

Se compone por un cilindro, un pistón de potencia y uno de desplazamiento, el cual se encarga de introducir el fluido de trabajo para posteriormente ser sometido a la fuente de calor y completar el ciclo termodinámico. Figura 5.

Tipo gamma

Se compone por dos cilindros – pistón, con un proceso similar al de tipo beta, la diferencia radica en que el pistón de desplazamiento se encuentra en un cilindro

independiente que conecta por una abertura con el cilindro del pistón de potencia, muy similar al tipo alfa, pero los pistones están ubicados de forma paralela y el cilindro de desplazamiento no está sellado. Figura 6.

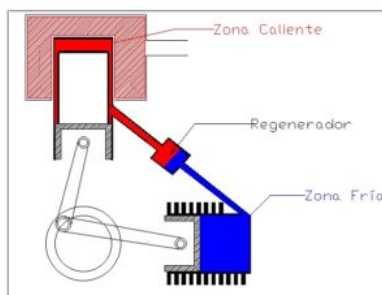


Figura 4: Motor Stirling tipo alfa. Fuente: [16]

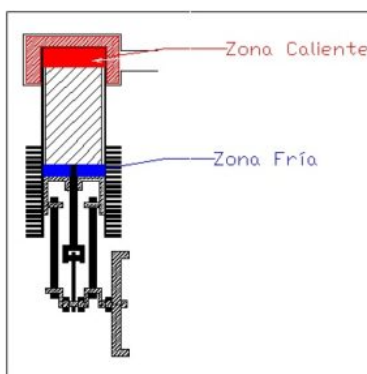


Figura 5: Motor Stirling tipo beta. Fuente: [16]

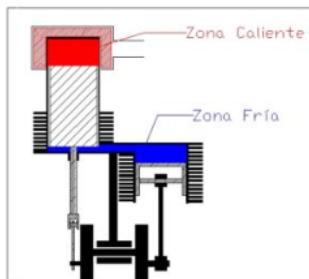


Figura 6: Motor Stirling tipo gamma. Fuente:[16]

Sistemas de seguimiento solar

Fuente de calor

Concentrador cóncavo esférico

Se propone una superficie esférica recubierta de un material reflectante, capaz de re-direccionar la luz solar a la ubicación del motor, haciendo las veces de fuente de calor.

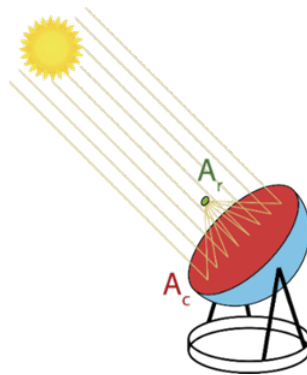


Figura 7: Colector esférico. Fuente: [17]

Concentrador óptico

Se propone ubicar un lente por encima del motor que concentre los rayos solares sobre el cilindro de potencia y obteniendo así la fuente de calor requerida.



Figura 8: Concentrador óptico. Fuente:[18]

Sistema de seguimiento

Sistema de seguimiento mecánico

Se propone la implementación de componentes mecánicos para recrear el desplazamiento del sol en las horas que se deseen trabajar. En este sistema se pueden implementar engranajes, levas, ejes, rodamientos, entre otros.



Figura 9: Mecanismos. Fuente:[19]

Sistema de seguimiento sensorial

Se propone la implementación de sensores capacitados para detectar la radiación solar y poder dirigir el sistema en la dirección apropiada de acuerdo a la posición del sol. Es necesario aclarar que dependería de sistemas mecánicos para su funcionamiento. *Fuerza motriz del sistema de seguimiento*



Figura 10: Sensor de radiación solar. Fuente:[20]

Motor eléctrico DC

Es un dispositivo motriz encargado de transmitir movimiento y potencia de forma continua a cualquier sistema que lo requiera. Generalmente sus revoluciones por minuto (rpm) son altas.



Figura 11: Motor de corriente continua. Fuente:[21]

Motor paso a paso

Es un motor eléctrico no continuo, es decir que, al entrar en contacto con la corriente eléctrica no rota de forma indefinida, este es programable y adaptable a las necesidades de cada caso.

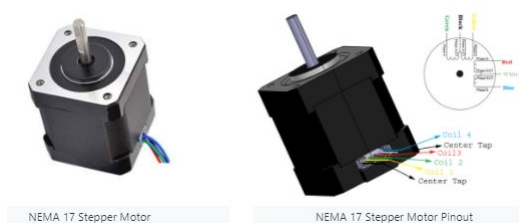


Figura 12: Motor paso a paso. Fuente:[22]

Motor de reloj

Es un sistema mecánico que genera rotaciones cada segundo, minuto y hora del día. Este proceso lo realiza con el uso de componentes mecánicos como engranajes, muelles, ruedas, entre otros.

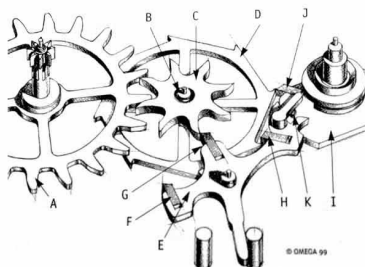


Figura 13: Motor de reloj. Fuente:[23]

3.4. Materiales de construcción

Una vez identificadas las alternativas para cada uno de los procesos, es necesario analizar los materiales para la construcción de cada uno de ellos, teniendo en cuenta todos los requerimientos y necesidades de los mismos.

Motor Stirling

Los materiales que se consideran para la fabricación del motor son:

- Aluminio
- Acero
- Hierro
- Cristal

Sistema de seguimiento solar

Los materiales que se consideran para la fabricación del sistema de seguimiento solar son:

- Teflón
- PLA (ácido poli-láctico)
- Nylon
- TPU (termoplástico elastómero)

3.5. Matriz de selección

Una vez presentadas las alternativas de diseño, se hace una breve descripción de las necesidades de cada uno de los componentes, los cuales se seleccionan posteriormente y se realiza una breve descripción del funcionamiento general del dispositivo.

Necesidades de los componentes

Tipos de motor Stirling

Se requiere un motor Stirling con facilidad de construcción, que no intercambie el fluido, para evitar pérdidas por fugas y con la disposición de cilindros separada para evitar que las aberraciones del concentrador no calienten los dos cilindros.

Fuentes de calor

Se requiere un concentrador fácil de construir, preciso y adaptable a los componentes del dispositivo.

Sistema de seguimiento solar

Se requiere de sistema que se pueda programar para seguir el movimiento solar, que se precisó con la ubicación de trabajo y que se pueda adaptar a los componentes del dispositivo.

Fuerza motriz

Se requiere un motor precisó que se pueda programar y adaptar al sistema de seguimiento solar.

Materiales de construcción del motor

Se requiere materiales duros, resistentes a temperaturas y presiones altas y de bajo costo.

Materiales de construcción del sistema de seguimiento

Se requiere materiales duros, rígidos y resistentes a temperaturas ambiente altas, de fácil manejo y de bajo costo.

Selección de componentes

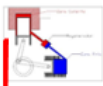
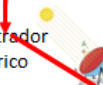
De acuerdo a las alternativas presentadas y las necesidades de los componentes se realiza un análisis de cada una de ellas, asignando un valor de 5 si satisface la necesidad y un valor de 0 si no lo hace. Este análisis se registra en el Cuadro 1 y la matriz de selección final en el Cuadro 2.

Descripción funcionamiento

El motor está conformado por un cilindro – pistón y un cilindro – membrana, unidos a un volante de inercia que está conectado a un generador eléctrico. La fuente de calor para el motor es luz solar dirigida por reflexión hacia uno de los cilindros mediante un sistema de seguimiento solar, el cual se compone por un concentrador cóncavo esférico transportado por un conjunto de engranajes, estos son accionados automáticamente por un motor paso a paso programado con arduino, mientras que la fuente de frío está dada por el ambiente, encargado de disipar el calor por medio de convección natural.

Selección de componentes		
Ítem	Alternativa	Necesidad
Tipos de motor Stirling	Alfa	5
	Beta	0
	Gamma	0
Fuentes de calor solar	Concentrador esférico	5
	Concentrador óptico	0
Sistema de seguimiento solar	Mecánico	5
	Sensorial	0
Fuerza motriz	Motor eléctrico	0
	Motor paso a paso	5
	Motor de reloj	0
Materiales motor	Aluminio	5
	Acero	0
	Cristal	0
Materiales sistema seguimiento solar	Teflón	0
	PLA	5
	Nylon	0

Cuadro 1: Selección de componentes

Matriz de selección motor Stirling impulsado por una fuente de calor solar			
Tipos de motor	Tipo Alfa 	Tipo Beta 	Tipo Gamma 
Fuente de calor	Concentrador Esférico 	Concentrador solar 	NA
Sistema de seguimiento	Sensorial 	Mecánico 	NA
Fuerza motriz	Motor eléctrico 	Motor de reloj 	Motor paso a paso 
Materiales motor	Aluminio 	Acero 	Cristal 
Materiales Sistema	Teflón 	PLA 	Nylon 

Cuadro 2: Matriz de selección

4. Diseño mecánico detallado

Con la matriz de selección definida, se procede a determinar las dimensiones de trabajo del concentrador cóncavo esférico, como también los cálculos correspondientes a la cremallera y el engranaje motriz (piezas del sistema de seguimiento). Los detalles del diseño del resto de los componentes tanto del motor Stirling como el sistema del seguimiento solar, se definen de acuerdo a las características geométricas de los materiales disponibles para satisfacer los requerimientos (émbolos, cilindros, bielas, volante, soporte, etc.), para los cuales no se realizaron cálculos específicos.

4.1. Concentrador cóncavo esférico

Siendo este uno de los componentes más importantes del dispositivo, se definen las medidas de diseño, de acuerdo a las restricciones de los equipos disponibles para su respectiva fabricación.

Diámetro de apertura $\rightarrow$ 48 cm

Radio de curvatura $\rightarrow$ 60 cm

Distancia focal $\rightarrow$ 30 cm

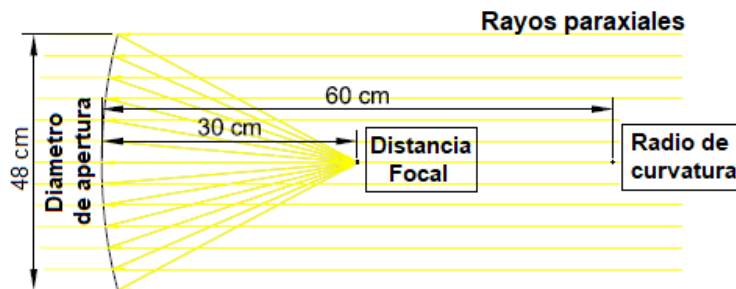


Figura 14: Esquema de una superficie cóncava esférica.

Fuente: Elaboración propia.

De los valores presentados, el diámetro de apertura se determina con las medidas de la impresora 3D, no solo por su fabricación, sino por las medidas de la base que lo sostiene, la cual sí se obtiene de la impresora.

Es importante tener en cuenta que al trabajar con colectores esféricos se presentan aberraciones, estas son imperfecciones del sistema óptico, el cual no enfoca la luz de forma adecuada, es decir, no proporciona un punto focal, sino un área de concentración.

4.2. Cálculo de engranajes

En esta sección se presenta el cálculo del engranaje guía del sistema de seguimiento solar (cremallera) y el engranaje que está acoplado al motor paso a paso (engranaje motriz).

Cremallera

Es necesario aclarar que tanto los engranajes como la cremallera deben tener el mismo valor de módulo, debido a que es la única manera que coincidan los dientes de los mismos. Las formulas usadas en esta sección se encuentran previamente presentadas en el Capítulo 2, sección 2.4.

$$\text{Módulo (M)} \\ M = \frac{D_p}{\text{Número de dientes}} = \frac{740 \text{ mm}}{360} = 2,05556 \text{ mm}$$

$$\text{Número de dientes (N)} \\ N = 360$$

$$\text{Angulo de presión } (\alpha) \\ \alpha = 20^\circ$$

$$\text{Diámetro externo (De)} \\ De = \text{Módulo} \times (\text{Número de dientes} + 2) \\ De = 2,05556 \text{ mm} \times (360 + 2) \\ De = 744,11272 \text{ mm} \approx 744,10 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro interno (Di)} \\ Di = \text{Diámetro primitivo} - (2 \times \text{Módulo} \times \text{Constante Di}) \\ Di = 740,0016 \text{ mm} - (2 \times 2,05556 \text{ mm} \times 1,167) \\ Di = 735,20392296 \text{ mm} \approx 735,20 \text{ mm}$$

$$\text{Circulo de trazado (Ct)} \\ Ct = \text{Diámetro primitivo} \times \text{Constante Ct}$$

Debido a que el ángulo de presión es de 20° la constante (C_t) es de: 0,93969

$$C_t = 740,0016 \text{ mm} \times 0,93969$$

$$C_t = 695,372103504 \text{ mm} \approx 695,40 \text{ mm}$$

Espesor de diente (E)

$$E = \text{Módulo} \times \text{Constante } E$$

$$E = 2,05556 \text{ mm} \times 1,5708$$

$$E = 3,2295648 \text{ mm} \approx 3,23 \text{ mm}$$

Radio de diente (R)

$$R = \text{Módulo} \times 0,3$$

$$R = 2,05556 \text{ mm} \times 0,3$$

$$R = 0,616668 \text{ mm} \approx 0,62 \text{ mm}$$

De acuerdo a estos cálculos y a las herramientas del programa asistido por computadora (SolidWorks) se obtiene el diseño final, como se observa en la Figura 19.

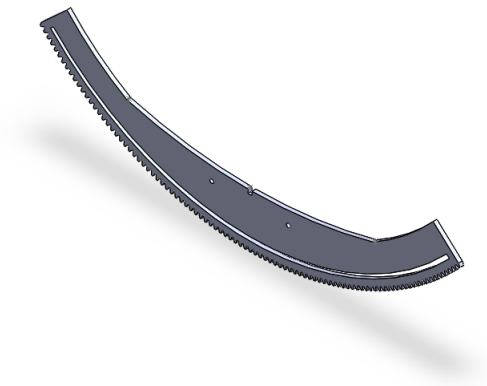


Figura 15: Cremallera.
Fuente: Elaboración propia.

Engranaje motriz

Es necesario especificar ciertas variables como:

Módulo (M)

$M = 2,05556 \text{ mm}$, este valor coincide con el de la cremallera.

Número de dientes (N)

$$N = 360$$

Angulo de presión (α)

$$\alpha = 20^\circ$$

Diámetro externo (De)

$$De = \text{Módulo} \times (\text{Número de dientes} + 2)$$

$$De = 2,05556 \text{ mm} \times (16 + 2)$$

$$De = 37,00008 \text{ mm} \approx 37,0 \text{ mm}$$

Diámetro primitivo (Dp)

$$Dp = \text{Módulo} \times \text{Número de dientes}$$

$$Dp = 2,05556 \text{ mm} \times 16$$

$$Dp = 32,88896 \text{ mm} \approx 33,0 \text{ mm}$$

Diámetro interno (Di)

$$Di = \text{Diámetro primitivo} - (2 \times \text{Módulo} \times \text{Contante Di})$$

$$Di = 32,88896 \text{ mm} - (2 \times 2,05556 \text{ mm} \times 1,167)$$

$$Di = 28,09128296 \text{ mm} \approx 28,10 \text{ mm}$$

Circulo de trazado (Ct)

$$Ct = \text{Diámetro primitivo} \times \text{Contante Ct}$$

Debido a que el ángulo de presión es de 20° la contante (Ct) es de: 0,93969

$$Ct = 32,88896 \text{ mm} \times 0,93969$$

$$Ct = 30,9054268224 \text{ mm} \approx 31,0 \text{ mm}$$

Espesor de diente (E)

$$E = \text{Módulo} \times \text{Contante E}$$

$$E = 2,05556 \text{ mm} \times 1,5708$$

$$E = 3,2295648 \text{ mm} \approx 3,23 \text{ mm}$$

Radio de diente (R)

$$R = \text{Módulo} \times 0,3$$

$$R = 2,05556 \text{ mm} \times 0,3$$

$$R = 0,616668 \text{ mm} \approx 0,62 \text{ mm}$$

De acuerdo a estos cálculos y a las herramientas del programa asistido por compu-

tadora (SolidWorks) se obtiene el diseño final, como se observa en la Figura 20.

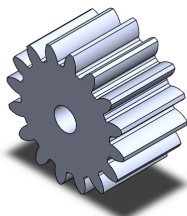
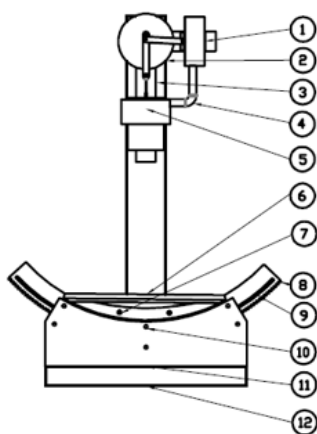


Figura 16: Engranaje motriz.
Fuente: Elaboración propia.

4.3. Boceto

Con la designación de las medidas del concentrador y los cálculos de los engranajes, se realiza el diseño detallado de cada uno de los componentes del motor Stirling y el sistema de seguimiento solar, los cuales conforman el dispositivo en su totalidad. A continuación, se presenta un boceto general del dispositivo con la enumeración de cada una de los componentes. Adicional a ello se presenta una vista tridimensional isométrica.



N°	Componentes
1	Cilindro - Membrana
2	Volante de inercia
3	Base del motor
4	Regenerador
5	Cilindro - Pistón
6	Concentrador esférico
7	Soporte de colector
8	Cremallera
9	Guía de mecanismo
10	Engranajes
11	Base sistema de seguimiento
12	Base del dispositivo

Figura 17: Componentes del dispositivo.
Fuente: Elaboración propia.

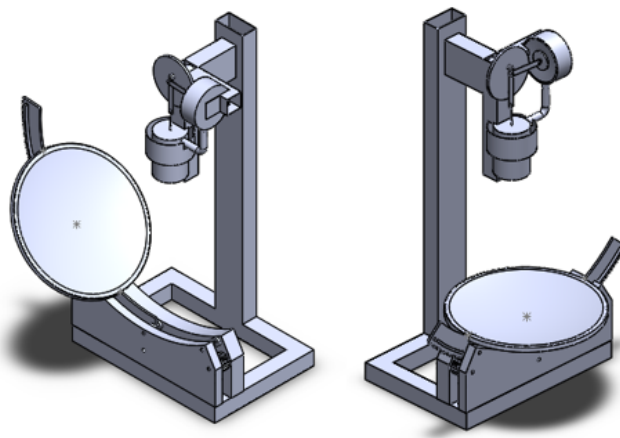
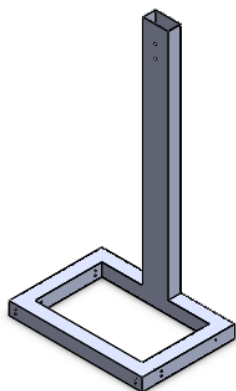


Figura 18: Vista general.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Descripción de los componentes del dispositivo

Es importante presentar una breve descripción de los componentes más representativos que conforman el dispositivo, de los cuales se puede encontrar detalles más específicos relacionados a su forma, medidas y detalles de construcción, así como también la ubicación en el ensamble, en los planos anexados en el Apéndice C.

Base Dispositivo

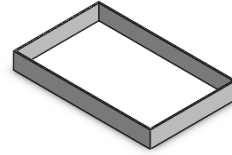


La base del dispositivo es la encargada de unificar el Motor Stirling y el Sistema de Seguimiento Solar.

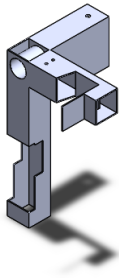
En la parte superior se encuentran 2 orificios de $1/4$ de pulgada, los cuales se usan para unir la base con el motor y en la parte inferior se encuentran 16 orificios de $5/32$ de pulgada, los cuales se usan para unir la base con el Sistema de Seguimiento.

Base Circuito

La base del circuito es la encargada de soportar el sistema de control y recepción de datos del dispositivo, la pieza se obtuvo mediante impresión 3D.



Base Motor Stirling

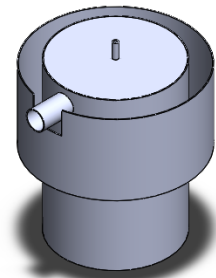


La base del Motor Stirling es la encargada de unificar los cilindros de calor y frío, además del volante de inercia.

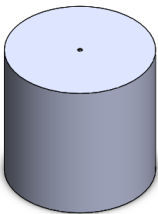
Se compone de tres piezas, las cuales están unidas mediante tornillos de 3/16 de pulgada, como se especifica en los planos del Apéndice C.

Cilindro Foco Caliente

El cilindro del foco caliente se conforma de cuatro piezas, el cilindro principal, un cilindro secundario que contiene el fluido refrigerante (agua), la tapa y el cilindro saliente que funciona como conexión con el cilindro de foco frío, cada pieza está soldada con estaño y recubierta con silicona térmica gris, de acuerdo a su ubicación.



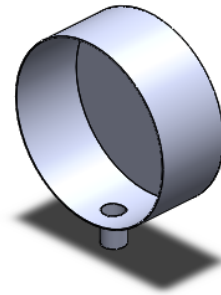
Émbolo Foco Caliente



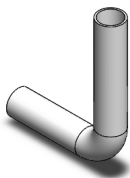
El émbolo del foco caliente se compone de dos piezas, el cilindro principal y su respectiva tapa, las cuales están unidas con soldadura y silicona térmica gris, en el centro de la tapa se encuentra un orificio donde va incorporado una guía para su respectivo funcionamiento, el cual consiste en movimientos de vaivén en el eje vertical que permiten el desplazamiento del fluido de trabajo (aire).

Cilindro Foco Frío

El cilindro del foco frío se conforma por dos piezas, el cilindro principal y un cilindro saliente que funciona como conexión con el cilindro de foco caliente, estas piezas están soldadas con estaño y recubierta con silicona térmica gris, en este caso el cilindro no tiene tapa, sino un recubrimiento con una membrana elástica que hace las veces de émbolo.



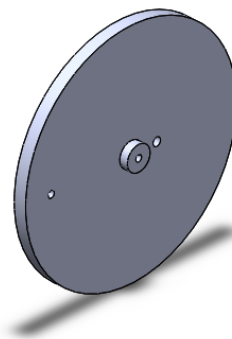
Conexión Focos



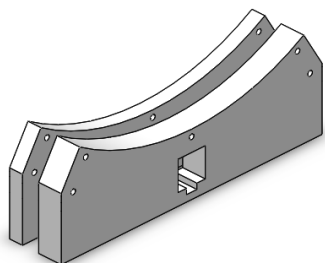
La conexión de los focos se compone de una pieza de PVC transparente, la cual cumple la función de conectar a los focos de calor y frío, permitiendo así el desplazamiento del fluido de trabajo.

Volante de Inercia

El volante de inercia cuenta con tres orificios, el del extremo tiene la función de soportar el contrapeso, el cual se encarga de contrarrestar el peso del émbolo del foco caliente, logrando así un equilibrio, el orificio más cercano al centro se encarga de soportar el cigüeñal el cual permite la unión con las bielas de los dos focos y el orificio central es el soporte y conexión con el motor dinamo.



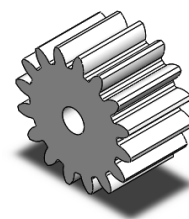
Base Sistema de Seguimiento Solar



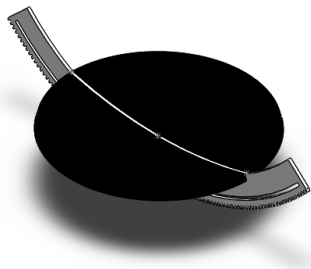
La base del sistema de seguimiento solar se compone por dos piezas principales que están unidas por cinco ejes. Los dos ejes ubicados en los extremos inferiores soportan un engranaje cada uno, en los cuales se asienta la cremallera junto con el engranaje motriz unido al motor paso a paso, los ejes superiores tienen unidos una serie de rodamientos, los cuales impiden que la cremallera se descarrile de su posición.

Engranaje Motriz

El engranaje motriz es el encargado de generar los movimientos de todo el sistema de seguimiento solar por medio de un motor paso a paso que tiene adaptado, gracias a los engranajes ubicados en los extremos se puede tener una sincronía en todo el sistema.



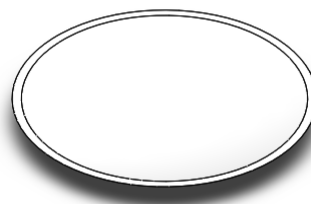
Soporte de concentrador con cremallera



La cremallera tiene un diseño que garantiza que en cualquier posición en la que se encuentre el concentrador apuntará a la misma distancia focal. Debido a que su espesor es muy pequeño se incorpora un soporte en cada lado para ubicar de forma correcta el concentrador solar.

Concentrador cóncavo esférico

El concentrador solar es la base principal para la producción de energía calorífica necesaria para el funcionamiento del dispositivo, la pieza está recubierta por un material reflectante, el cual permite dicha función.



5. Programación y componentes electrónicos

En este capítulo se presentan los procedimientos para automatizar el sistema de seguimiento solar y el de adquisición de datos. Además se describen los componentes electrónicos, su función en el dispositivo, y su respectiva ubicación en el circuito implementado.

5.1. Programación con Python

Estimación de tiempo del recorrido del sol

Para determinar el tiempo de recorrido del sol se tiene en cuenta la hora de salida y puesta del mismo. Los datos se obtienen de la plataforma “maplogs.com”.

Fecha	Salida de sol	Puesta de sol	Duración del día	16/03/2024	06:13:51 AM	06:20:30 PM	12h 6m 39s
01/03/2024	06:18:04 AM	06:23:54 PM	12h 5m 50s	17/03/2024	06:13:31 AM	06:20:14 PM	12h 6m 43s
02/03/2024	06:17:50 AM	06:23:43 PM	12h 5m 53s	18/03/2024	06:13:12 AM	06:19:58 PM	12h 6m 46s
03/03/2024	06:17:35 AM	06:23:31 PM	12h 5m 56s	19/03/2024	06:12:53 AM	06:19:42 PM	12h 6m 49s
04/03/2024	06:17:20 AM	06:23:19 PM	12h 5m 59s	20/03/2024	06:12:33 AM	06:19:26 PM	12h 6m 53s
05/03/2024	06:17:04 AM	06:23:07 PM	12h 6m 3s	21/03/2024	06:12:13 AM	06:19:10 PM	12h 6m 57s
06/03/2024	06:16:48 AM	06:22:54 PM	12h 6m 6s	22/03/2024	06:11:54 AM	06:18:54 PM	12h 7m 0s
07/03/2024	06:16:32 AM	06:22:41 PM	12h 6m 9s	23/03/2024	06:11:34 AM	06:18:37 PM	12h 7m 3s
08/03/2024	06:16:15 AM	06:22:27 PM	12h 6m 12s	24/03/2024	06:11:14 AM	06:18:21 PM	12h 7m 7s
09/03/2024	06:15:58 AM	06:22:14 PM	12h 6m 16s	25/03/2024	06:10:54 AM	06:18:05 PM	12h 7m 11s
10/03/2024	06:15:41 AM	06:22:00 PM	12h 6m 19s	26/03/2024	06:10:34 AM	06:17:49 PM	12h 7m 15s
11/03/2024	06:15:23 AM	06:21:45 PM	12h 6m 22s	27/03/2024	06:10:14 AM	06:17:32 PM	12h 7m 18s
12/03/2024	06:15:05 AM	06:21:31 PM	12h 6m 26s	28/03/2024	06:09:54 AM	06:17:16 PM	12h 7m 22s
13/03/2024	06:14:47 AM	06:21:16 PM	12h 6m 29s	29/03/2024	06:09:34 AM	06:17:00 PM	12h 7m 26s
14/03/2024	06:14:28 AM	06:21:01 PM	12h 6m 33s	30/03/2024	06:09:15 AM	06:16:44 PM	12h 7m 29s
15/03/2024	06:14:10 AM	06:20:45 PM	12h 6m 35s	31/03/2024	06:08:55 AM	06:16:28 PM	12h 7m 33s

Figura 19: Salida y puesta de sol mes de Marzo 2024. Fuente:[24]

Para hacer una relación de las horas de recorrido del sol con la posición angular del mismo, se toma el primer valor del mes y se asocia con los ángulos, teniendo en cuenta que la hora de salida del sol representa 0° y la puesta del sol 180° .

Valores de trabajo

Salida de sol $\rightarrow$ 6h 18m 4s am

Puesta de sol $\rightarrow$ 6h 23m 54s pm

Duración de recorrido solar $\rightarrow 12\text{h } 5\text{m } 50\text{s}$

Se toma el valor de duración de recorrido solar y se convierte todo a horas, tanto los minutos como los segundos.

12 horas

$$5 \text{ minutos} \rightarrow 5\cancel{\text{min}} \times \frac{1\text{h}}{60\cancel{\text{min}}} = 0,0833333 \text{ h}$$

$$50 \text{ segundos} \rightarrow 50\cancel{\text{s}} \times \frac{1\text{h}}{3600\cancel{\text{s}}} = 0,0138889 \text{ h}$$

Se suman obteniendo así, el valor total en horas

$$\boxed{12,0972222}$$

Teniendo este valor se hace la relación de horas con la posición angular.

$$(0^\circ) \rightarrow \boxed{6\text{h } 18\text{m } 4\text{s am}}$$

$(1^\circ) \rightarrow$ Para calcular este valor se toma la representación en horas de la duración de recorrido solar y se divide entre 180 que corresponde al recorrido total.

$$\frac{12,0972222\text{h}}{180} = 0,06720679\text{h} \approx 0,067 \text{ h} \rightarrow 0 \text{ horas}$$

$$0,067\cancel{\text{h}} \times \frac{60\cancel{\text{min}}}{1\cancel{\text{h}}} = 4,02 \text{ min} \rightarrow 4 \text{ minutos}$$

$$0,02\cancel{\text{min}} \times \frac{60\cancel{\text{s}}}{1\cancel{\text{min}}} = 1,2 \text{ s} \rightarrow 1 \text{ segundos}$$

$$\boxed{4\text{m } 1\text{s}}$$

$(45^\circ) \rightarrow$ Para calcular este valor se toma la representación en horas de la duración de recorrido solar y se divide entre 4.

$$\frac{12,0972222\text{h}}{4} = 3,0243056\text{h} \approx 3,024 \text{ h} \rightarrow 3 \text{ horas}$$

$$0,024\cancel{\text{h}} \times \frac{60\cancel{\text{min}}}{1\cancel{\text{h}}} = 1,44 \text{ min} \rightarrow 1 \text{ minutos}$$

$$0,44\cancel{\text{min}} \times \frac{60\cancel{\text{s}}}{1\cancel{\text{min}}} = 26,4 \text{ s} \rightarrow 26 \text{ segundos}$$

Este resultado se lo suma al valor correspondiente a 0° :

$$6\text{h } 18\text{m } 4\text{s} + 3\text{h } 1\text{m } 26\text{s} = 9\text{h } 19\text{m } 30\text{s}$$

9h 19m 30s am

(90°) → Para calcular este valor se toma la representación en horas de la duración de recorrido solar y se divide entre 2.

$$\frac{12,0972222\text{h}}{2} = 6,0486111\text{h} \approx 6,049\text{ h} \rightarrow 6\text{ horas}$$

$$0,049\cancel{\text{h}} \times \frac{60\cancel{\text{min}}}{1\cancel{\text{h}}} = 2,94\text{ min} \rightarrow 2\text{ minutos}$$

$$0,94\cancel{\text{min}} \times \frac{60\text{s}}{1\cancel{\text{min}}} = 56,4\text{ s} \rightarrow 56\text{ segundos}$$

Este resultado se lo suma al valor correspondiente a 0°:

$$6\text{h } 3\text{m } 33\text{s} + 6\text{h } 2\text{m } 56\text{s} = 12\text{h } 6\text{m } 29\text{s}$$

12h 6m 29s pm

(135°) → Para calcular este valor se toma el valor correspondiente a 90° y se suma el valor correspondiente a 45°.

$$12\text{h } 6\text{m } 29\text{s} + 3\text{h } 1\text{m } 26\text{s} = 3\text{h } 7\text{m } 55\text{s}$$

3h 7m 55s pm

$$(180^\circ) \rightarrow 6\text{h } 23\text{m } 54\text{s pm}$$

Resultados obtenidos (Cuadro 3).

El valor obtenido de 1° es de gran importancia, debido a que con el se puede estimar el tiempo de recorrido del sistema de seguimiento solar, el cual funciona con componentes mecánicos (engranajes) y componentes electrónicos (arduino y motor paso a paso). En la Figura 20 se presenta un gráfico donde se asocia la posición angular del sol con las horas obtenidas anteriormente.

Para evitar hacer estos cálculos en cada prueba, se diseñó un programa en Python, el cual permite obtener los datos de forma inmediata, volviendo así, el proceso más eficiente. El código se presenta en el apéndice A, sección A.1.

Resultados		
Grados	Horas	Periodo
0°	6h 18m 4s	am
45°	9h 19m 30s	am
90°	12h 6m 29s	pm
135°	3h 7m 55s	pm
180°	6h 23m 54s	pm

Cuadro 3: Grados asociados a posición solar

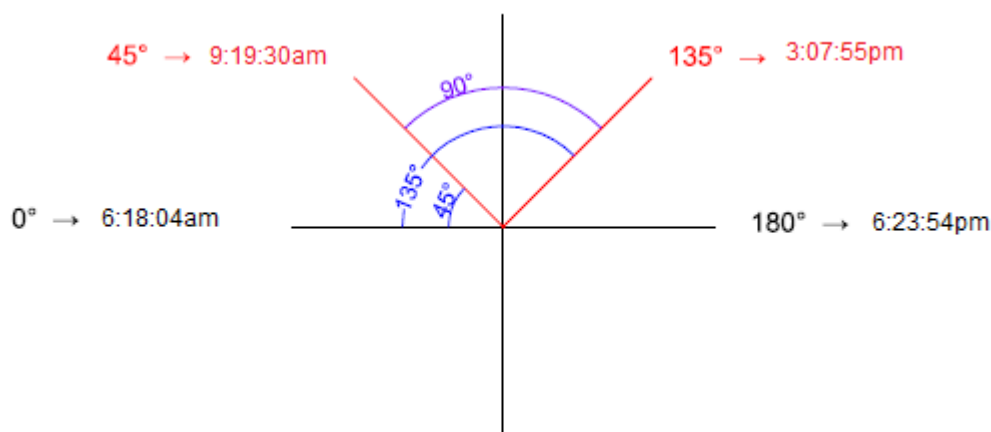


Figura 20: Relación de posición solar y horas.

Fuente: Elaboración propia.

Programación sistema de seguimiento solar

Uno de los aspectos más importantes del proyecto es analizar los datos suministrados por los sensores anteriormente mencionados, para lo cual es fundamental la precisión en la posición de inicio y finalización de trabajo del dispositivo. Por esta razón se enlazo el código Arduino con un código Python, consiguiendo así, una mayor autonomía del mismo. El código se presenta en el apéndice A, sección A.2.

Descripción

El código cumple las siguientes funciones:

- 1.- Recepción de datos mediante ventana emergente.

Permite ingresar la hora de salida y puesta del sol, como también la hora de inicio y finalización de una sesión de trabajo del dispositivo, Figura 21.

Column 1	Column 2	Column 3
Hs:	Ms:	Ss:
Hp:	Mp:	Sp:
Hi:	Mi:	Si:
Hf:	Mf:	Sf:

Calcular

Figura 21: Ventana emergente.
Fuente: Elaboración propia.

Donde H, M y S corresponden a la hora, minuto y segundo de los distintos momentos (cada uno en una fila diferente e identificados por su segunda letra):

- Primera fila (s) para la salida del sol,
- Segunda fila (p) para la puesta del sol,
- Tercera fila (i) para el inicio de la prueba,
- Cuarta fila (f) para la finalización de la prueba.

2.- Envío de datos al programa Arduino.

Una vez ingresados los datos anteriormente mencionados se presiona el botón calcular e internamente el programa calcula los valores correspondientes a la duración de recorrido solar, la posición solar inicial de trabajo, los grados de reubicación, la posición solar final de trabajo, los grados de rotación, los grados de reubicación final, como también los valores enviados a Arduino entre ellos el tiempo de recorrido por grado en milisegundos de acuerdo a requerimientos del programa y el tiempo de corrección si se requiere, como se observa en la Figura 22.

Sistema de Seguimiento			
Hs:	6	Ms:	18
Hp:	6	Mp:	23
Hi:	11	Mi:	30
Hf:	12	Mf:	30
Ss:	4	Sp:	54
Si:	0	Sf:	0

Duración de recorrido solar: 12 horas 5 minutos 50 segundos
 Posición solar inicial de trabajo: 77.4°
 Grados de reubicación a.m.: 12.6°
 Posición solar final de trabajo: 92.3°
 Grados de rotación: 14.9°
 Grados de reubicación final: 2.3°
 Valores enviados a Arduino
 V1=163.8 V2=7.8 V3=241944.0 V4=15.0
 V5=39.0 V6=4032.0 V7=936.0 V8=24192.0

Calcular

Figura 22: Ventana emergente.
Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de corrección se estima cuando los ángulos relacionados con la hora de inicio son valores decimales, por ende, se tiene en cuenta el desfase en el tiempo y se corrige en el código Arduino.

3.- Control del horario para la toma de datos de los sensores.

Permite que de acuerdo a la hora de inicio anteriormente ingresada en la ventana emergente, empiece la toma de datos de forma automática, Figura 23.

Hi:	11	Mi:	30	Si:	0
-----	----	-----	----	-----	---

Figura 23: Hora de inicio.
Fuente: Elaboración propia.

4.- Gráficas en tiempo real.

Una vez se llegue la hora de inicio, donde previamente el sistema de seguimiento solar se ubicó, Python abre una ventana donde se visualizan dos gráficas. En la gráfica de la izquierda se puede observar los datos de voltaje recibidos por el dinamómetro, y en la gráfica de la derecha se puede visualizar los datos de temperatura recibidos por las termocuplas ubicadas en los respectivos focos.

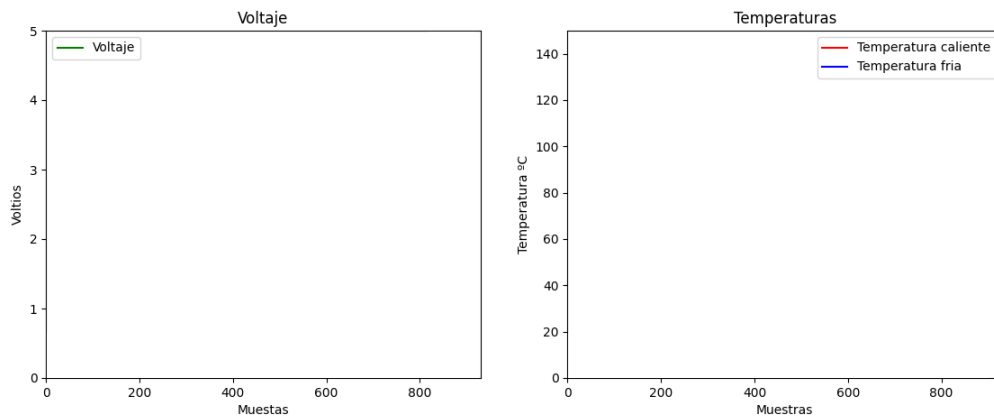


Figura 24: Gráficas tiempo real.
Fuente: Elaboración propia.

5.- Almacenamiento de datos.

Mientras se están visualizando en tiempo real las gráficas, el código está almacenando los datos en una hoja de Excel, donde se puede identificar el número de la muestra de voltaje y temperaturas y la fecha y hora en la que fueron tomadas. Una vez culminado el trabajo, el sistema de seguimiento solar vuelve a su posición inicial y automáticamente se guarda en una hoja de Excel bajo el nombre de “Datos_recolectados” y también se guardan las gráficas en formato “PNG”, bajo el nombre de “Gráfica_voltaje_temperaturas”.

Calibración de sistema de seguimiento solar

Hasta el momento los datos usados para la programación han sido teóricos, obtenidos de la página “magplogs.com”, los cuales proporcionan las horas de salida y puesta del sol diarios. Para corroborar su precisión se diseñó un código Python que permite reajustar el sistema de seguimiento solar de acuerdo a posibles desfases presentados, como es el caso de la ubicación del foco. Para ello el programa abre una ventana que pide las horas de salida y puesta del sol, como también la hora de inicio del proceso de calibración, como se observa en la Figura 25.

The screenshot shows a window titled 'Calibración' with a standard Windows title bar (minimize, maximize, close buttons). Inside, there are three columns of input fields. The first column contains 'Hs:', 'Hp:', and 'Hi:'. The second column contains 'Ms:', 'Mp:', and 'Mi:'. The third column contains 'Ss:', 'Sp:', and 'Si:'. Below these fields is a button labeled 'Calcular y enviar'. At the bottom of the window, there is a label 'Reubicación:' followed by an empty input field and a button labeled 'Enviar'.

Figura 25: Ventana de datos para calibración.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez ingresados los datos anteriormente mencionados se presiona el botón calcular y enviar e internamente el programa calcula los valores correspondientes a la duración de recorrido solar, la posición angular en la que queda el sistema de seguimiento, los grados de reubicación, el valor que debe enviar a Arduino para realizar el movimiento y la hora límite que se tiene para verificar la ubicación del foco, como se observa en la Figura 26.

This screenshot shows the same 'Calibración' window, but now with numerical values entered in the input fields: Hs: 6, Ms: 18, Ss: 4, Hp: 6, Mp: 23, Sp: 54, Hi: 11, Mi: 30, Si: 0. The 'Calcular y enviar' button is still present. The output area, which was empty in Figure 25, now displays the following text: 'Duración de recorrido solar: 12 horas 5 minutos 50 segundos', 'Posición solar inicial de trabajo: 77.4°', 'Grados de reubicación a.m.: 12.6°', 'Valor de arduino: 157.5', and 'Hora limite de evaluación: 11 horas 32 minutos 25 segundos'. The 'Reubicación:' label and 'Enviar' button remain at the bottom.

Figura 26: Ventana de datos ejemplo.

Fuente: Elaboración propia.

El ejemplo se hace con los datos del 1 de marzo de 2024, a las 11:30:00 am. De-

bido a que la cremallera del sistema de seguimiento solar está ubicada en la parte central, tiene una ubicación de 90° de acuerdo a la posición solar, por ende, las reubicaciones se hacen a partir de ello. En este ejemplo la hora de inicio corresponde con una posición angular de 77.4° , por lo cual su reubicación será de 12.6° y el valor calculado para que Arduino ejecute ese desplazamiento es de 157.5 pasos por vuelta, que es el valor enviado al programa Arduino. Por ultimo tenemos la hora límite de evaluación que da 11:32:25, es decir que se tiene 2 minutos y 25 segundos para hacer la evaluación. Esto varía dependiendo de la hora de salida y puesta del sol y la hora de inicio de la prueba.

Si se presenta algún desfase, se puede reajustar la posición de la cremallera. Para el reajuste se escribe 1 en Reubicación, si se desea aproximar 1° a la posición central, es decir que ya no serían 12.6° respecto a la ubicación base, sino 11.6° , teniendo como posición angular final 78.4° . En caso contrario se escribe 2 en Reubicación, si se desea alejar 1° de la posición central, es decir que ya no serían 12.6° respecto a la ubicación base, sino 13.6° , teniendo como posición angular final 76.4° . Una vez escrito cualquiera de los dos valores se presiona el botón Enviar como se observa en la Figura 32, el proceso puede hacerse la veces necesarias. Los códigos Python y Arduino usados para este proceso se presentan en el apéndice A, sección A.3 y B, sección B.5 respectivamente.

The screenshot shows a window titled "Calibración" with the following elements:

- Input Fields:**
 - Hs: 6, Ms: 18, Ss: 4
 - Hp: 6, Mp: 23, Sp: 54
 - Hi: 11, Mi: 30, Si: 0
- Buttons:** "Calcular y enviar" (Calculate and send) and "Enviar" (Send).
- Text Area:**

```
Duración de recorrido solar: 12 horas 5 minutos 50 segundos
Posición solar inicial de trabajo: 77.4°
Grados de reubicación a.m.: 12.6°
Valor de arduino: 157.5
Hora limite de evaluación: 11 horas 32 minutos 25 segundos
```
- Reubicación:** A field labeled "Reubicación:" with the value "1 o 2" and an "Enviar" button next to it.

Figura 27: Valores de calibración.
Fuente: Elaboración propia.

5.2. Componentes electrónicos

Sistema de seguimiento solar

Para el funcionamiento del motor paso a paso Nema 17 17hs8401b 1.7a, es necesario un controlador *Driver* Drv8825 y un Arduino (Mega 2560), los cuales están conectados a una fuente de 12V.

Conexión componentes

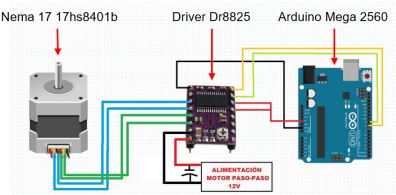


Figura 28: Diagrama de conexión. Fuente: [25]

Descripción de funcionamiento

El sistema de seguimiento solar está compuesto principalmente por una cremallera impulsada por un engranaje motriz, el cual está acoplado al motor paso a paso encargado de girar 1° cada cierta cantidad de tiempo, esto depende de las horas de salida y puesta del sol.

Medidor de Voltaje

Para el medidor se usó un divisor de voltaje resistivo usando dos resistencias conectadas directamente al Arduino mega 2560, una resistencia de 100 Kilo ohm conectada a GND y al puerto analógico A0 y una resistencia 1 Mega ohm conectada al puerto analógico A0, el cual recibe el voltaje a registrar.

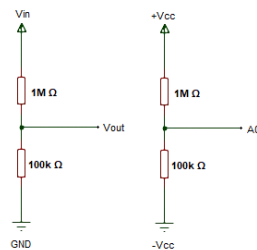


Figura 29: Montaje de resistencias en arduino.
Fuente: Elaboración propia.

El arduino tiene la capacidad de medir hasta 5V, por ello se usa la formula del divisor de voltaje. La formula usada en esta sección se encuentra previamente presentada en el Capítulo 2, sección 2.4.

$$V_{\text{sal}} = \frac{V_{\text{ent}} \times R_2}{R_1 + R_2},$$

donde

$$R_1 = 1000000 \text{ ohm}$$

$$R_2 = 100000 \text{ ohm}$$

$$V_{\text{ent}} = 50 \text{ V}$$

Teniendo en cuenta que 50 V es el valor límite de medida.

$$V_{\text{out}} = \frac{50 \text{ V} \times 100000 \text{ ohm}}{1000000 \text{ ohm} + 100000 \text{ ohm}} = 4,545454545454545 \text{ V} \approx 4,54 \text{ V}$$

Siendo 4.54 V el voltaje máximo que leerá el Arduino.

Una vez se tenga este valor se procede mediante la programación del arduino a convertir estos datos a un lenguaje apropiado y de esta forma poder graficar y analizar los datos.

Medidor de temperatura

Para la medición de la temperatura se requiere de un Sensor Termocupla conectado a un módulo Arduino Max6675, el cual tiene un rango de medición de 0 °C a 1024 °C. Esta termocupla industrial trabaja con un rango adecuado, debido a la temperatura a la que se encuentra expuesto el cilindro del foco caliente. El módulo Max6675 tiene 5 pines de salida: GND, 5V, CSK, CS y SO, los cuales son programados gracias a las librerías de arduino.

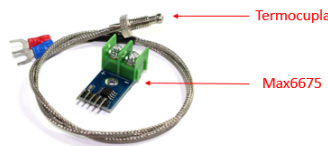


Figura 30: Termocupla tipo K Con Modulo Max6675. Fuente: [26]

Descripción del funcionamiento de los componentes electrónicos

La configuración de los componentes permite tomar 10 muestras de voltaje y temperatura del foco caliente y frio por cada rotación del sistema de seguimiento solar,

estos datos son registrados y graficados en tiempo real para su posterior evaluación y análisis.

Cada uno de estos componentes están ubicados en el circuito diseñado para el dispositivo, como se muestra en la Figura 31.

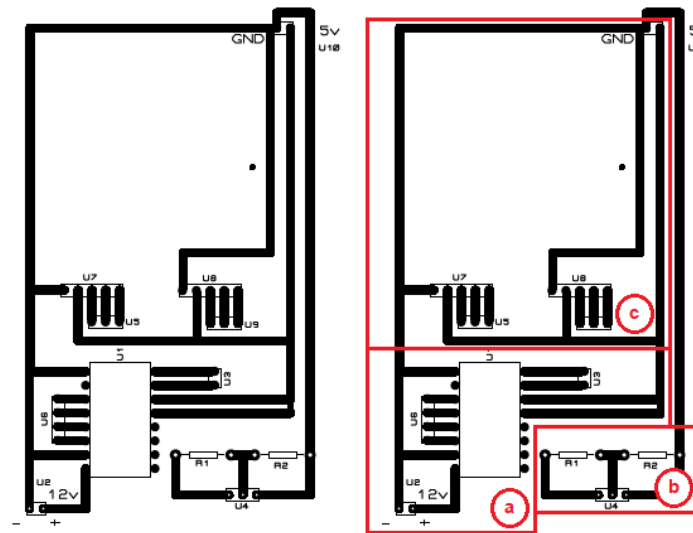


Figura 31: Diagrama PCB del dispositivo.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

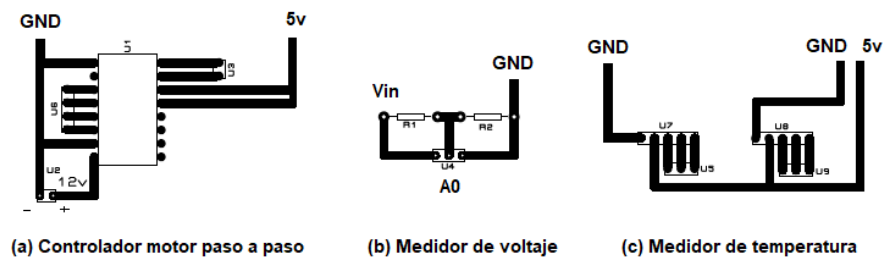


Figura 32: Secciones del diagrama PCB.

Fuente: Elaboración propia.

6. Pruebas de Operación

En este capítulo se desarrollan las pruebas de todos los componentes del dispositivo, las especificaciones del paso a paso del funcionamiento del mismo y la ejecución de las pruebas, como también el análisis de resultados.

6.1. Reflectividad

En el desarrollo del proyecto se probó varias formas de fabricar y recubrir el concentrador solar. Para la fabricación se trabajó con impresión 3D, desbaste de madera con torno y por medio de un sistema de formación mediante aire comprimido con recubrimiento en fibra de vidrio. En cuestión del recubrimiento se trabajó con papel de regalo plateado, papel vinilo adhesivo cromado, pintura anticorrosiva plateada y pintura en aerosol cromada. Finalmente se obtuvo mejor resultado con el sistema de formación en conjunto con el recubrimiento de vinilo adhesivo cromado.

Teniendo el montaje con el recubrimiento de vinilo se obtuvo el el valor de la reflectividad de forma práctica. Para el procedimiento se usó una aplicación móvil llamada “Iluminancia - Medidor de luz Lux”, por medio del teléfono móvil disponible “Vivo Y53s”, adicional a ello se usó una superficie plana forrada con el material ya descrito. El procedimiento consiste en medir el espectro luminoso incidente de la superficie reflectante (valor indirecto) y a su vez se mide el espectro luminoso directo de la luz solar (valor directo). Cabe resaltar que los dos valores se toman sucesivamente, es decir, se toman los valores indirectos e inmediatamente se toman los valores directos, con el fin de hacer la evaluación bajo las mismas condiciones.

La toma de datos se realizó varias veces en un período de un mes donde se obtuvo una serie de resultados los cuales fueron evaluados con respecto a la concordancia de los mismos. Estos datos se realizaron en días completamente despejados como se observa en la Figura 33.

Después de analizar todos los resultados se resume en 10 datos concretos que permiten obtener la reflectividad. La operación se da mediante la división del valor indirecto sobre el valor directo. La reflectividad correspondiente al papel vinilo adhesivo cromado tiene un valor de 61 %, como se observa en cuadro número 4.

La información presentada se conforma inicialmente por dos columnas correspondientes a los valores indirectos, con el fin de obtener un valor más certero, se toma el valor 2 veces en la misma sesión, los cuales se promedian posteriormente y se ubican en la tercera columna. Con respecto a los valores directos se realiza el mismo procedimiento, contenidos en la siguiente sección del cuadro. En la última columna se obtiene el resultado de la división de los promedios, obteniendo así el valor de la reflectividad ubicado en la parte inferior derecha del mismo.



Figura 33: Condiciones climáticas para pruebas de reflectividad.
Fuente: Elaboración propia.

	Valores indirectos (Ix)			Valores indirectos (Ix)			Reflectividad
	Valores	Promedio	Promedio	Valores	Promedio	Promedio	
1	119939	119939	119939	196799	195419	196109	0,61
2	87651	87651	87651	151914	147718	149816	0,59
3	96639	96639	96639	149191	144024	146607,5	0,66
4	95430	97340	96385	155582	155213	155397,5	0,62
5	96646	85921	91283,5	160146	160439	160292,5	0,57
6	97278	97278	97278	159580	158181	158880,5	0,61
7	90752	103093	96922,5	166488	166941	166714,5	0,58
8	103380	103380	103380	162585	164352	163468,5	0,63
9	93423	93423	93423	156075	153558	154816,5	0,60
10	120838	120838	120838	189417	189087	189252	0,64
Promedio Final							0,61

Cuadro 4: Datos de reflectividad

6.2. Protocolos de experimentación

Una vez concluido el proceso de diseño y construcción del dispositivo (motor Stirling - sistema de seguimiento solar) se procede a realizar las pruebas. Para ello se establece unos protocolos de experimentación de las mismas, correspondientes a dos distintas fuentes de calor para el motor.

Protocolo de pruebas por combustión

Para llevar a cabo el procedimiento correspondiente la fuente de calor por combustión se debe tener en cuenta los siguientes dispositivos e implementos:

- Motor Stirling
- Sistema de control de datos
- Computador
- Programa de toma de datos
- Alcohol etílico de 70°
- Mechero

Secuencia paso a paso

1. Ubicación del dispositivo en la zona de pruebas.
2. Verificación de conexiones del sistema de control de datos y conexión a computador.
3. Apertura del programa de toma de datos.
4. Medición de la masa inicial del alcohol.
5. Ubicación de mechero en el soporte de la base con su posterior encendido.
6. Ejecución del programa desde el computador.
7. Impulso al motor mediante fuerza externa producida manualmente.
8. Llenado de líquido refrigerante (agua) al motor Stirling.
9. Almacenamiento de datos (voltaje y temperatura de los focos) y sus respectivas gráficas.

10. Finalización de toma de datos y desconexión del puerto USB del computador.
11. Medición de la masa final del alcohol y registro de datos.

Protocolo de pruebas solares

Para llevar a cabo el procedimiento correspondiente con la fuente de calor por radiación solar se debe tener en cuenta los siguientes dispositivos e implementos:

- Motor Stirling
- Sistema de seguimiento solar
- Sistema de control de datos
- Computador
- Programa de toma de datos

Secuencia paso a paso

1. Exponer el dispositivo a la luz solar.
2. Verificación de conexiones del sistema de control de datos y conexión a computador.
3. Apertura del programa de toma de datos.
4. Ejecución del programa desde el computador.
5. Ubicación de concentrador solar de acuerdo a las horas de trabajo.
6. Impulso al motor mediante fuerza externa producida manualmente.
7. Llenado de líquido refrigerante (agua) al motor Stirling.
8. Almacenamiento de datos (voltaje y temperatura de los focos) y sus respectivas gráficas.
9. Finalización de toma de datos y desconexión del puerto USB del computador.

6.3. Ejecución de pruebas

Con el motor Stirling a punto y el sistema de seguimiento solar funcional, se somete el dispositivo a pruebas de combustión y solares. Estas pruebas se llevan a cabo en el municipio de Pasto y Buesaco, respectivamente. Para ello se tiene en cuenta la fecha, hora de pruebas y los protocolos de experimentación ya descritos, esenciales para poner en funcionamiento el dispositivo de forma adecuada.

Pruebas del dispositivo bajo fuente de calor por combustión

El procedimiento se realizó en el municipio de Pasto del 3 de agosto 2024 al 10 agosto 2024, obteniendo como resultado 5 pruebas exitosas con una duración de una hora cada una, recolectando 720 datos cada 5 segundos por variable. De estas pruebas se registraron gráficas representativas de voltaje, temperaturas del foco caliente y foco frío, como también los datos registrados en un documento Excel por cada una de ellas.

De los datos obtenidos se extrajo los valores máximos de cada una de las variables, como también los valores que más se repiten, denominados aquí como valores estables, los cuales se registran en tablas con sus respectivas gráficas, en cada una de las 5 pruebas..

Gráficas y datos

Primera prueba: 3 de agosto 2024

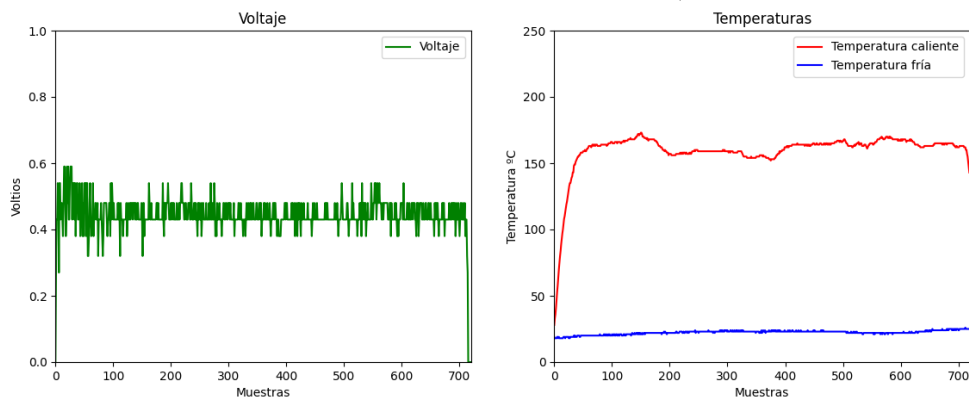


Figura 34: Gráfica de voltaje y temperaturas por combustión 3/08/2024.

Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,59	121	19
Voltaje Estable	0,43	161	23

Cuadro 5: Datos de voltaje máximo y estable por combustión 3/08/2024

Segunda prueba: 5 de agosto 2024

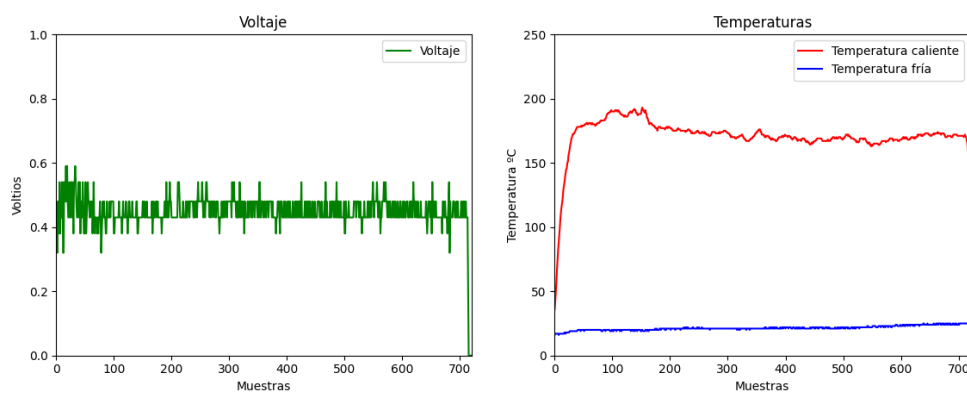


Figura 35: Gráfica de voltaje y temperaturas por combustión 5/08/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,59	150	18
Voltaje Estable	0,43	172	22

Cuadro 6: Datos de voltaje máximo y estable por combustión 5/08/2024

Tercera prueba: 6 de agosto 2024

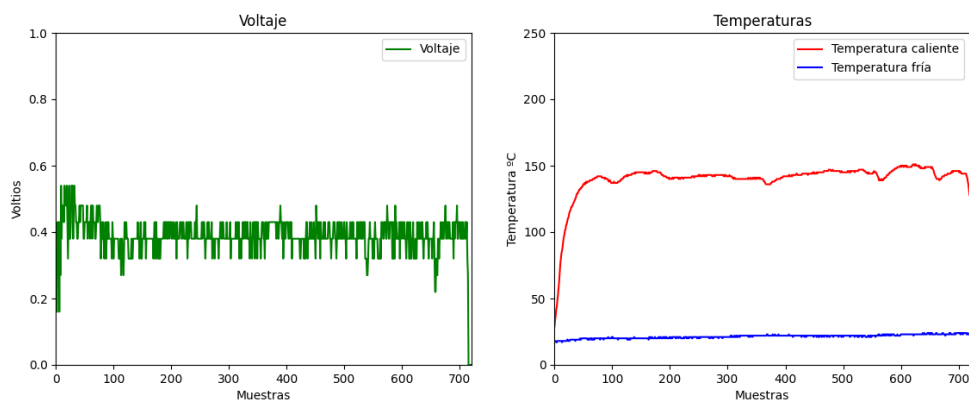


Figura 36: Gráfica de voltaje y temperaturas por combustión 6/08/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,54	106	19
Voltaje Estable	0,38	142	21

Cuadro 7: Datos de voltaje máximo y estable por combustión 6/08/2024

Cuarta prueba: 8 de agosto 2024

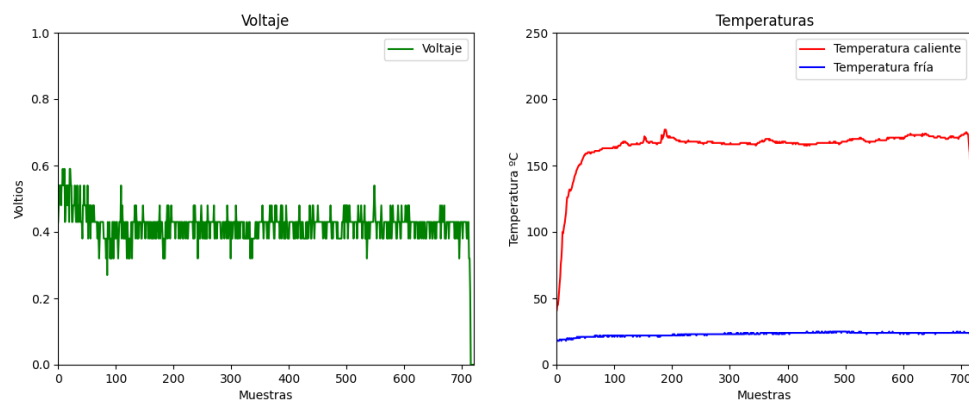


Figura 37: Gráfica de voltaje y temperaturas por combustión 8/08/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,59	109	19
Voltaje Estable	0,43	167	23

Cuadro 8: Datos de voltaje máximo y estable por combustión 8/08/2024

Quinta prueba: 10 de agosto 2024

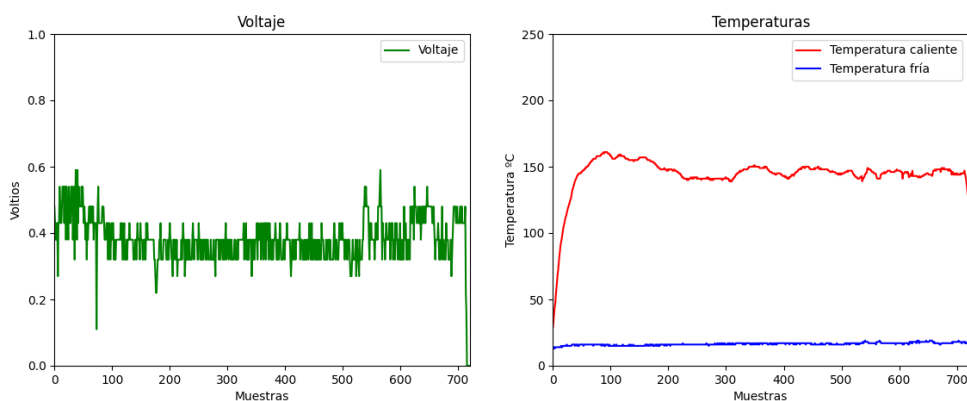


Figura 38: Gráfica de voltaje y temperaturas por combustión 10/08/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,59	140	17
Voltaje Estable	0,38	146	16

Cuadro 9: Datos de voltaje máximo y estable por combustión 10/08/2024

En el cuadro número 10 se recopilan los datos obtenidos en las pruebas realizadas, donde se calculan los promedios correspondientes a cada una de las variables anteriormente mencionadas. Estos valores son necesarios para obtener la eficiencia del dispositivo.

Delimitación de Datos						
Fecha de Prueba	Voltaje Máximo (V)	Temperatura Foco Frío (°C)	Temperatura Foco Caliente (°C)	Voltaje Estable (V)	Temperatura Foco Frío (°C)	Temperatura Foco Caliente (°C)
3/08/2024	0,59	19	121	0,43	23	161
5/08/2024	0,59	18	150	0,43	22	172
6/08/2024	0,54	19	106	0,38	21	142
8/08/2024	0,59	19	109	0,43	23	167
10/08/2024	0,59	17	140	0,38	16	146
Promedios	0,58	18	125	0,41	21	158

Cuadro 10: Datos de producción de voltaje y temperaturas de focos (combustión)

Pruebas del dispositivo bajo fuente de calor solar

El procedimiento se realizó en el municipio de Buesaco del 30 de agosto 2024 al 13 de septiembre 2024, obteniendo como resultado 3 pruebas exitosas con una duración de cinco minutos cada una, recolectando datos cada 4 segundos aproximadamente (se recuerda que este valor varía de acuerdo a las horas de salida y puesta del sol de cada día). Al igual que en combustión se registraron gráficas representativas de voltaje, temperaturas del foco caliente y foco frío, como también los datos registrados en un documento Excel. La duración de las pruebas depende del estado del clima, el cual debe estar completamente despejado, puesto que la disminución de irradiancia solar a causa de las nubes puede provocar la detención del motor.

En el registro que se presenta a continuación se puede observar la ventana emergente proporcionada por el código Python (apéndice A, sección A.2), con los datos acordes a cada uno de los días y horas de trabajo del dispositivo, como también las gráficas correspondientes a cada variable y sus respectivos datos, en cada una de las 3 pruebas.

Primera prueba: 9 de septiembre 2024

Sistema de Seguimiento

Hs: 6

Ms: 2

Ss: 36

Hp: 6

Mp: 10

Sp: 5

Hi: 11

Mi: 0

Si: 0

Hf: 12

Mf: 0

Sf: 0

Duración de recorrido solar: 12 horas 7 minutos 29 segundos

Posición solar inicial de trabajo: 73.6°

Grados de reubicación a.m.: 16.4°

Posición solar final de trabajo: 88.4°

Grados de rotación: 14.8°

Grados de reubicación final: 1.6°

Valores enviados a Arduino

V1=213.2 V2=5.2 V3=242494.0 V4=15.0

V5=13.0 V6=4042.0 V7=924.0 V8=16168.0

Calcular

Figura 39: Ventana emergente correspondiente a 9/09/2024 de 11AM - 12M.
Fuente: Elaboración propia.

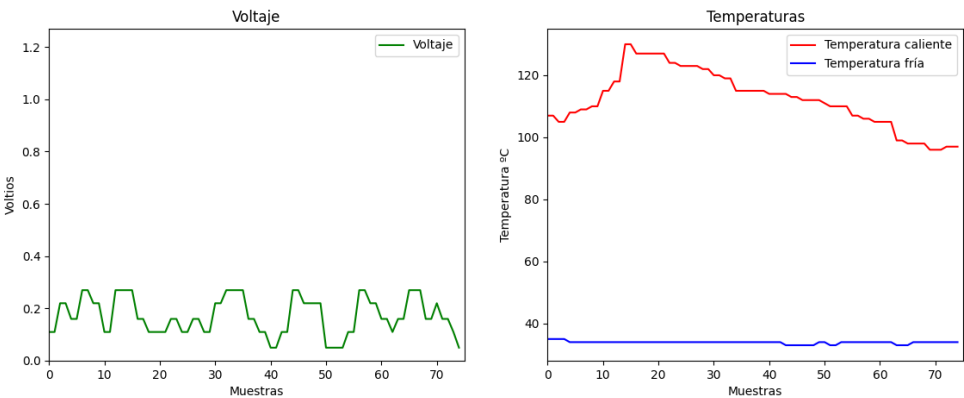


Figura 40: Gráfica de voltaje y temperaturas solares 9/09/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,27	113	34
Voltaje Estable	0,11	116	34

Cuadro 11: Datos de voltaje máximo y estable solar 9/09/2024

Segunda prueba: 10 de septiembre 2024

Sistema de Seguimiento

Hs: 6

Ms: 2

Ss: 7

Hp: 6

Mp: 9

Sp: 42

Hi: 11

Mi: 0

Si: 0

Hf: 12

Mf: 0

Sf: 0

Duración de recorrido solar: 12 horas 7 minutos 35 segundos

Posición solar inicial de trabajo: 73.7°

Grados de reubicación a.m.: 16.3°

Posición solar final de trabajo: 88.5°

Grados de rotación: 14.8°

Grados de reubicación final: 1.5°

Valores enviados a Arduino

V1=211.9 V2=2.6 V3=242528.0 V4=15.0

V5=13.0 V6=4042.0 V7=918.0 V8=8084.0

Calcular

Figura 41: Ventana emergente correspondiente a 10/09/2024 de 11AM - 12M.
Fuente: Elaboración propia.

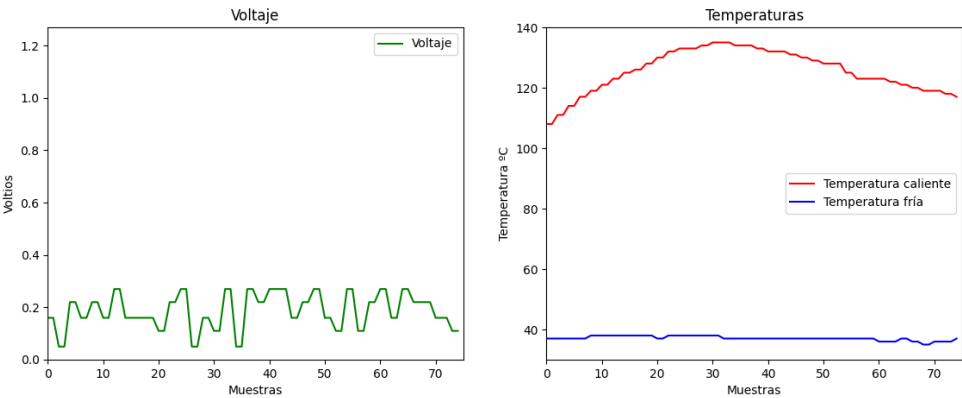


Figura 42: Gráfica de voltaje y temperaturas solares 10/09/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,27	129	37
Voltaje Estable	0,16	123	37

Cuadro 12: Datos de voltaje máximo y estable solar 10/09/2024

Tercera prueba: 11 de septiembre 2024

Sistema de Seguimiento

Hs: 6

Ms: 1

Ss: 48

Hp: 6

Mp: 9

Sp: 18

Hi: 11

Mi: 0

Si: 0

Hf: 12

Mf: 0

Sf: 0

Duración de recorrido solar: 12 horas 7 minutos 30 segundos

Posición solar inicial de trabajo: 73.8°

Grados de reubicación a.m.: 16.2°

Posición solar final de trabajo: 88.6°

Grados de rotación: 14.8°

Grados de reubicación final: 1.4°

Valores enviados a Arduino

V1=210.6 V2=2.6 V3=242500.0 V4=15.0

V5=13.0 V6=4042.0 V7=912.0 V8=8084.0

Calcular

Figura 43: Ventana emergente correspondiente a 11/09/2024 de 11AM - 12M.
Fuente: Elaboración propia.

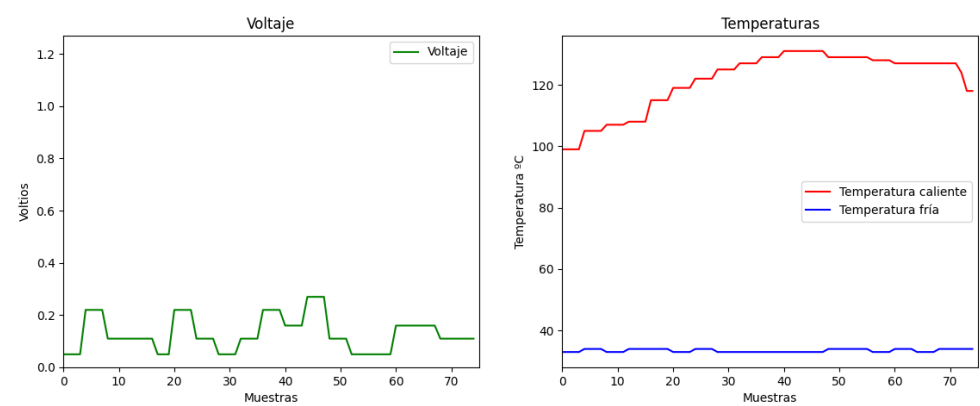


Figura 44: Gráfica de voltaje y temperaturas solares 11/09/2024.
Fuente: Elaboración propia.

	Voltaje	Temperatura caliente	Temperatura fría
Voltaje Máximo	0,27	131	33
Voltaje Estable	0,11	120	34

Cuadro 13: Datos de voltaje máximo y estable solar 11/09/2024

En el cuadro número 14 se recopilan los datos obtenidos en las pruebas realizadas, donde se calculan los promedios correspondientes a cada una de las variables anteriormente mencionadas.

Delimitación de Datos						
Fecha de Prueba	Voltaje Máximo (V)	Temperatura Foco Frío (°C)	Temperatura Foco Caliente (°C)	Voltaje Estable (V)	Temperatura Foco Frío (°C)	Temperatura Foco Caliente (°C)
9/09/2024	0,27	34	113	0,11	34	116
10/09/2024	0,27	37	129	0,16	37	123
11/09/2024	0,27	33	131	0,11	34	120
Promedios	0,27	35	124	0,13	35	120

Cuadro 14: Datos de producción de voltaje y temperaturas de focos (solar)

6.4. Resistencia eléctrica de trabajo

Una vez identificado el voltaje producido por el dispositivo, se procede a calcular la potencia de salida del mismo, para lo cual se identifica la resistencia acorde. Debido a que el comportamiento del motor es diferente con la fuente de calor por combustión y solar, se identifica la resistencia para cada una.

El fin de esta prueba es identificar el valor de resistencia más pequeño, el cual no altere el valor de voltaje original producido por el generador y permita calcular el valor de la potencia de salida del mismo.

Cálculo de resistencia por combustión

Para esta prueba se lleva a cabo el protocolo de experimentación determinado para combustión, la diferencia en esta prueba es que los terminales del dínamo no van al circuito general, sino a una conexión en protoboard donde se hace la medición del voltaje con diferentes resistencias.

En el cuadro número 15 se encuentran los valores de las resistencias de pruebas, el voltaje obtenido por cada una de ellas con el motor funcionado y la potencia calculada correspondiente a cada una de ellas. La fórmula usada en esta sección se encuentra previamente presentada en el Capítulo 2, sección 2.4.

Resistencia (Ω)	Voltaje producido (V)	Potencia (W)
1185	0,41	0,0002
982	0,41	0,0002
551	0,41	0,0003
100,8	0,41	0,0017
86,4	0,33	0,0013
51,2	0,16	0,0005
25,1	0,16	0,001
5,1	0,05	0,0005
4,1	0,04	0,0004
3,1	0,02	0,0001
2,1	0,01	0

Cuadro 15: Relación de resistencias con voltaje producido por combustión

De los datos obtenidos se puede identificar que entre más pequeña la resistencia el valor de voltaje disminuye, y a partir de la resistencia de $100,8\ \Omega$ en adelante el voltaje se mantiene en $0,41\ \text{V}$. Con respecto a la resistencia ideal, en este caso es de $100,8\ \Omega$ debido a que con esta se obtiene el valor de voltaje producido por el dínamo con las pruebas por combustión, correspondiente a $0,41\ \text{V}$ (Capítulo 6, sección 6.3), registrando así un valor de potencia de salida de $0,0017\ \text{W}$.

Cálculo de resistencia solar

Para esta prueba se lleva a cabo el protocolo de experimentación determinado para la parte solar, aplicando el mismo procedimiento anterior.

Resistencia (Ω)	Voltaje producido (V)	Potencia (W)
1185	0,13	0,00001
982	0,13	0,00002
551	0,13	0,00003
100,8	0,13	0,00017
86,4	0,10	0,00012
51,2	0,07	0,0001
25,1	0,05	0,00008
5,1	0,02	0,00002
4,1	0,01	0,00013

Cuadro 16: Relación de resistencias con voltaje producido de forma solar

Del cuadro número 16 se percibe el mismo comportamiento del voltaje respecto a las resistencias de alto valor, como también el mismo valor de resistencia ideal para el caso solar, con la resistencia de $100,8 \Omega$ se registra un valor de potencia de salida de $0,00017 \text{ W}$.

6.5. Cálculo de eficiencia teórico - práctica

Uno de los objetivos más importantes del proyecto es analizar el comportamiento del motor Stirling a través de su eficiencia, la cual se evalúa de forma práctica con los datos obtenidos en la sección 3.3 - 3.4, como también la eficiencia teórica ideal de Carnot y la eficiencia teórica Stirling, las cuales se presentan en esta sección, junto con una comparativa entre cada resultado y su respectivo análisis.

Cálculo de eficiencia por combustión

Cálculo del calor de entrada por combustión de alcohol

Para este cálculo es necesario tener en cuenta el poder calorífico del alcohol de 70° correspondiente a $18,75 \text{ kJ/g}$ [27], como también el consumo de alcohol por unidad de tiempo.

Para obtener el consumo de alcohol se realiza un procedimiento que consiste en medir el valor de la masa del mechero con alcohol de 70° , posteriormente se enciende por un lapso de 1 hora, terminado ese tiempo se mide nuevamente el valor de la masa del mechero, el cual se resta con el primero, obteniendo así el valor de la masa de alcohol consumida en ese lapso.

Es importante tener en cuenta la adecuada posición de la mecha en el mechero, pues dependiendo de esto varían los valores de consumo.

Una vez realizado el procedimiento se obtuvieron los siguientes valores de masa:

Masa de mechero antes de la combustión: $194,08 \text{ g}$

Masa de mechero después de la combustión: $90,98 \text{ g}$

Ahora se calcula el diferencial de masas, el cual se divide por los 3600 segundos de combustión.

$$m = 194,08 \text{ g} - 90,98 \text{ g} = 103,10 \text{ g}$$

$$\dot{m} = \frac{103,10 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 0,029 \text{ g/s}$$

Por último, se obtiene la tasa de calor de entrada, donde:

$$18,75 \text{ kJ/g} = 18750 \text{ J/g}$$

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = 18750 \text{ J/g} \times 0,029 \text{ g/s}$$

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = 544 \text{ J/s} = \boxed{544 \text{ W}}$$

Este mismo procedimiento se repite con las siguientes pruebas realizadas, sus resultados son anexados en el cuadro número 17.

Cálculo de tasa de calor de entrada al sistema							
Fecha de Prueba	Masa mechero inicial (g)	Masa mechero final (g)	Diferencia masas (g)	Tiempo de prueba (s)	Consumo por unidad de tiempo (g/s)	Poder Calorífico (J/g)	Tasa de calor de entrada (W)
3/08/2024	194,08	90,98	103,10	3600	0,029	18750	544
5/08/2024	188,32	81,74	106,58	3600	0,030	18750	562
6/08/2024	188,38	108,24	80,14	3600	0,022	18750	412
8/08/2024	183,60	81,60	102,0	3600	0,028	18750	525
10/08/2024	176,0	99,16	76,84	3600	0,021	18750	394
Promedio							487

Cuadro 17: Tasa de calor de entrada por combustión

Es importante tener en cuenta que este cálculo representa la tasa de calor por combustión directa del mechero, no es realmente el calor de entrada en el gas de trabajo, el cual sería mucho menor al registrado. Se puede obtener una serie de pérdidas correspondientes a este tipo de combustión, los cuales no son muy representativos, por ende, se presenta el cálculo sin ellos.

Cálculo de eficiencia del motor por combustión

Para este cálculo se tiene en cuenta la fórmula de la eficiencia de un sistema, el cual tiene en cuenta la tasa de calor de entrada ($\dot{Q}_{\text{ent}}$) calculado anteriormente y la potencia de salida (P_{sal}) (sección 5.4) del mismo. La formula usada en esta sección se encuentra previamente presentada en el Capítulo 2, sección 2.4.

$$\eta_{\text{práctica}} = \frac{P_{\text{sal}}}{\dot{Q}_{\text{ent}}}$$

donde

$$P_{\text{sal}} = 1,7 \times 10^{-3} \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = 487 \text{ W}$$

Remplazando los valores se tiene:

$$\eta_{\text{práctica}} = \frac{P_{\text{sal}}}{Q_{\text{ent}}} = \frac{1,7 \times 10^{-3} \text{ W}}{487 \text{ W}} = 3,5 \times 10^{-6} = 0,00035 \%$$

Teniendo como resultado una eficiencia práctica del 0,00035 %.

Eficiencia térmica teórica por combustión

Para la eficiencia térmica teórica de un motor Stirling es necesario tener en cuenta el calor de absorción (Q_{abs}) y el trabajo realizado por el gas (W). Para ello se requiere de cálculos para obtener las variables faltantes, empezando por la presión atmosférica del lugar de pruebas por combustión.

Presión atmosférica

Las formulas usadas en esta sección se encuentran previamente presentadas en el Capítulo 2, sección 2.4.

$$p = p_0 \times \left(1 - \frac{L \times h}{T_0} \right)^{\frac{g \times M}{R \times L}}$$

donde

$$p_0 \rightarrow 101325 \text{ Pa}$$

$$L \rightarrow 0,0065 \text{ K/m}$$

$$h \rightarrow \text{altitud ciudad de Pasto } 2527 \text{ m}$$

$$T_0 \rightarrow 288,15 \text{ K}$$

$$g \rightarrow 9,80665 \text{ m/s}^2$$

$$M \rightarrow 0,0289644 \text{ kg/mol}$$

$$R \rightarrow 8,3144598 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

Remplazando los valores se tiene:

$$p = p_0 \times \left(1 - \frac{L \times h}{T_0} \right)^{\frac{g \times M}{R \times L}}$$

$$p = (101325 \text{ Pa}) \times \left(1 - \frac{(0,0065 \text{ K/m}) \times (2527 \text{ m})}{288,15 \text{ K}} \right)^{\frac{(9,80665 \text{ m/s}^2) \times (0,0289644 \text{ kg/mol})}{(8,3144598 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}) \times (0,0065 \text{ K/m})}}$$

$$p = (101325 \text{ Pa}) \times \left(1 - \frac{16,4255 \text{ K}}{288,15 \text{ K}} \right)^{5,256}$$

$$p = (101325 \text{ Pa}) \times (0,943)^{5,256}$$

$$p = (101325 \text{ Pa}) \times (0,734)$$

$$p = \boxed{74373 \text{ Pa}}$$

Con la presión atmosférica correspondiente a la altitud de la ciudad de Pasto se procede a calcular la densidad del aire en esta ubicación para obtener la masa del aire.

$$\rho_a = \frac{p_d}{R_d \times T} + \frac{p_v}{R_v \times T}$$

donde

$$R_d \rightarrow 287,05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$R_v \rightarrow 461,5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$T \rightarrow 292,15 \text{ K}$$

Presión parcial del vapor de agua (p_v)

$$p_v = \text{HR} \times p_{\text{sat}}$$

donde

$$\text{HR} \rightarrow \text{humedad relativa (53 \%)}$$

$$T_{\text{roc}} \rightarrow \text{temperatura de rocío (11,7 °C)}$$

$$p_{\text{sat}} = 6,1078 \text{ hPa} \times 10^{\frac{7,5 \times T_{\text{roc}}}{237,3 + T_{\text{roc}}}}$$

$$p_{\text{sat}} = 6,1078 \text{ hPa} \times 10^{\frac{7,5 \times (11,7 \text{ °C})}{237,3 + (11,7 \text{ °C})}}$$

$$p_{\text{sat}} = 6,1078 \text{ hPa} \times 10^{0,352}$$

$$p_{\text{sat}} = 13,74 \text{ hPa} = 1374 \text{ Pa}$$

Ahora se calcula la presión parcial del vapor de agua

$$p_v = \text{HR} \times p_{\text{sat}}$$

$$p_v = 0,53 \times 1374 \text{ Pa}$$

$$p_v = 728 \text{ Pa}$$

Presión parcial del aire seco (p_d)

$$p_d = p - p_v$$

$$p_d = 74373 \text{ Pa} - 728 \text{ Pa}$$

$$p_d = 73645 \text{ Pa}$$

Densidad del aire

$$\rho_a = \frac{p_d}{R_d \times T} + \frac{p_v}{R_v \times T}$$

$$\rho_a = \frac{73645 \text{ kg/m} \cdot \cancel{s^2}}{287,05 \cancel{\text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \cancel{\text{kg} \cdot \cancel{s^2}} \times 292,15 \cancel{K}}} + \frac{728 \text{ kg/m} \cdot \cancel{s^2}}{461,5 \cancel{\text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \cancel{\text{kg} \cdot \cancel{s^2}} \times 292,15 \cancel{K}}$$

$$\rho_a = 0,88 \text{ kg/m}^3 + 5,4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

$$\boxed{\rho_a = 0,88 \text{ kg/m}^3}$$

Junto a la densidad, es necesario conocer el volumen de aire inicial, para posteriormente encontrar la masa. Para ello se calcula el volumen del cilindro, del émbolo y calculando su diferencia, encontrando así el volumen requerido.

Volumen cilindro

$$A_{oc} = \frac{\pi \times (D_c)^2}{4}$$

$$V_c = A_{oc} \times h_c$$

donde

$A_{oc} \rightarrow$ área base cilindro foco caliente

$V_c \rightarrow$ volumen cilindro foco caliente

$D_c \rightarrow$ diámetro del cilindro del foco caliente (0,073 m)

$h_c \rightarrow$ altura del cilindro (0,104 m)

Remplazando

$$A_{oc} = \frac{\pi \times (0,073 \text{ m})^2}{4} = 4,18 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_c = (4,18 \times 10^{-3} \text{ m}^2) \times (0,104 \text{ m}) = 4,35 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Volumen embolo

$$A_{oe} = \frac{\pi \times (D_e)^2}{4}$$

$$V_e = A_{oe} \times h_e$$

donde

$A_{oe} \rightarrow$ área base embolo foco caliente

$V_e \rightarrow$ volumen embolo foco caliente

$D_e \rightarrow$ diámetro del embolo del foco caliente (0,062 m)
 $h_e \rightarrow$ altura del embolo (0,06 m)

Remplazando

$$A_{oe} = \frac{\pi \times (0,062\text{m})^2}{4} = 3,02 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_e = (3,02 \times 10^{-3} \text{ m}^2) \times (0,06 \text{ m}) = 1,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Volumen aire

$$V_a = V_c - V_e$$

$$V_a = (4,35 \times 10^{-4} \text{ m}^3) - (1,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3)$$

$$V_a = 2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Masa aire

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \rightarrow m_a = \rho_a \times V_a$$

$$m_a = (0,88 \text{ kg/m}^3) \times (2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^3)$$

$$m_a = 2,24 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Como es sabido, la ecuación de estado del gas ideal necesita el número de moles del aire, por ende, se usa la siguiente igualdad.

$$n = \frac{m_a}{M}$$

$$n = \frac{2,24 \times 10^{-4} \cancel{\text{kg}}}{0,0289644 \cancel{\text{kg}}/\text{mol}}$$

$$n = 7,73 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Por último, teniendo todos los datos que se requieren, se calcula el trabajo idealmente realizado por el aire (W) y el calor de absorción (Q_{abs}) en un solo ciclo, posteriormente se calcula la eficiencia de Stirling.

Trabajo realizado por el aire

$$W = \frac{m}{M} \times R \times (T_1 - T_2) \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = n \times R \times (T_1 - T_2) \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Donde

T_1 y T_2 son las temperaturas promedio de los focos caliente y frío respectivamente, obtenidas del Cuadro 10 (Capítulo 6, sección 6.3).

V_1 es el volumen correspondiente a la cara superior externa del émbolo con la cara superior interna del cilindro de foco caliente cuando este está completamente desplegado hacia abajo (punto muerto inferior), la distancia entre caras es de $h_{V1} = 0,035$ m.

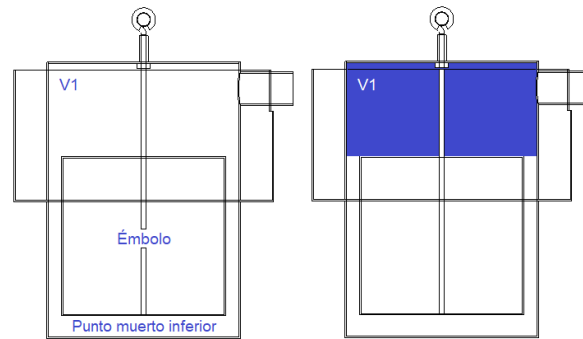


Figura 45:
Fuente: Elaboración propia.

V_2 es el volumen correspondiente a la totalidad del fluido contenido en el cilindro de foco caliente.

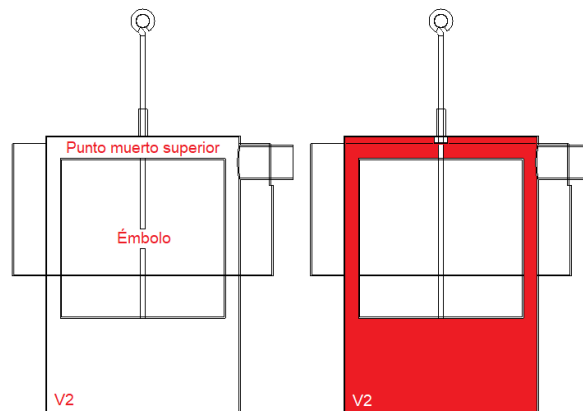


Figura 46:
Fuente: Elaboración propia.

$T_1 \rightarrow$ Temperatura foco caliente

$$T_1 = 158^\circ\text{C} + 273,15 = 431,15 \text{ K}$$

$T_2 \rightarrow$ Temperatura foco frío

$$T_2 = 21^\circ\text{C} + 273,15 = 294,15 \text{ K}$$

$V_1 \rightarrow$ Volumen inicial

$$V_1 = A_{oc} \times h_{V1} = \left(\frac{\pi \times (D_e)^2}{4}\right) \times h_{V1}$$
$$V_1 = \left(\frac{\pi \times (0,073\text{m})^2}{4}\right) \times 0,035\text{m} = 1,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$V_2 \rightarrow$ Volumen final

$$V_2 = V_a = 1,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Remplazando los valores

$$W = (7,73 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,3144598 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})) \times (431,15 \text{ K} - 294,15 \text{ K}) \times \ln\left(\frac{1,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{1,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3}\right)$$

$$W = (0,0642 \text{ J/K}) \times (137 \text{ K}) \times \ln(1,24)$$

$$W = 1,90 \text{ J}$$

Calor de absorción sin regeneración

$$Q_{abs} = (n \times R \times T_1 \times \ln(\frac{V_2}{V_1})) + (n \times C_v \times (T_1 - T_2))$$

donde

$C_v \rightarrow$ capacidad calorífica molar a volumen constante (20,8 J/mol · K)

$$Q_{abs} = (7,73 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,3144598 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})) \times (431,15 \text{ K}) \times \ln\left(\frac{1,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{1,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3}\right) +$$
$$(7,73 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (20,8 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})) \times (431,15 \text{ K} - 294,15 \text{ K})$$

$$Q_{abs} = (0,0642 \text{ J/K}) \times (431,15 \text{ K}) \times \ln(1,24) + (0,16 \text{ J/K}) \times (137 \text{ K})$$

$$Q_{abs} = 5,95 \text{ J} + 21,92 \text{ J}$$

$$Q_{abs} = 27,90 \text{ J}$$

Eficiencia térmica teórica de Stirling sin regeneración

$$\eta_{Ss} = \frac{W}{Q_{abs}}$$

$$\eta_{Ss} = \frac{1,90 \text{ J}}{27,90 \text{ J}}$$

$$\eta_{Ss} = 0,068 = 6,8 \%$$

Calor de absorción con regeneración

$$Q_{abs} = n \times R \times T_1 \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$Q_{abs} = (7,73 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,3144598 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}) \times (431,15 \text{ K}) \times \ln\left(\frac{1,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{1,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3}\right)$$

$$Q_{abs} = (0,0642 \text{ J/K}) \times (431,15 \text{ K}) \times \ln(1,24)$$

$$Q_{abs} = 5,95 \text{ J}$$

Eficiencia térmica teórica de Stirling con regeneración

$$\eta_{Sc} = \frac{W}{Q_{abs}}$$

$$\eta_{Sc} = \frac{1,90 \text{ J}}{5,95 \text{ J}}$$

$$\eta_{Sc} = 0,32 = 32 \%$$

Factor de desempeño

Factor de desempeño por combustión

Una vez calculada la eficiencia teórica y práctica del sistema se procede a calcular el factor de desempeño Stirling con y sin regeneración (FDS_c , FDS_s) respectivamente, para ello se requiere la siguiente relación.

$$FDS_c = \frac{\eta_{práctica}}{\eta_{Sc}}$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{práctica}}{\eta_{Ss}}$$

Donde

$$\eta_{práctica} = 3,5 \times 10^{-6}$$

$$\eta_{Sc} = 0,32$$

$$\eta_{Ss} = 0,068$$

Remplazando los valores se tiene:

$$FDS_c = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Sc}} = \frac{3,5 \times 10^{-6}}{0,32} = 1,1 \times 10^{-5} = 0,0011 \%$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Ss}} = \frac{3,5 \times 10^{-6}}{0,068} = 5,2 \times 10^{-5} = 0,0052 \%$$

Esto quiere decir que el motor Stirling está operando a un 0,0011 % de la eficiencia térmica teórica de Stirling con regeneración y a un 0,0052 % de la eficiencia térmica teórica de Stirling sin regeneración.

Cálculo de eficiencia solar

Cálculo de calor de entrada suministrado por sistema de seguimiento solar

Para obtener la potencia solar capturada es necesario tener en cuenta la potencia solar por unidad de área, como también el área de apertura efectiva del concentrador y la eficiencia del material.

Potencia solar por unidad de rea

Esta variable depende del lugar y la fecha de ejecución de las pruebas del dispositivo. El valor es proporcionado por la plataforma de la Universidad de Nariño “GeoAlternar”, la cual proporciona mapas energéticos detallados correspondientes a fuentes de energía solar, eólica, biomasa e hídrica.

De la información promedio mensual obtenida del Figura 47, se toma el valor correspondiente a septiembre, mes en el cual se llevaron a cabo las pruebas solares. El valor de la potencia solar por unidad de área es $I_{solar} = 242,3 \text{ W/m}^2$.

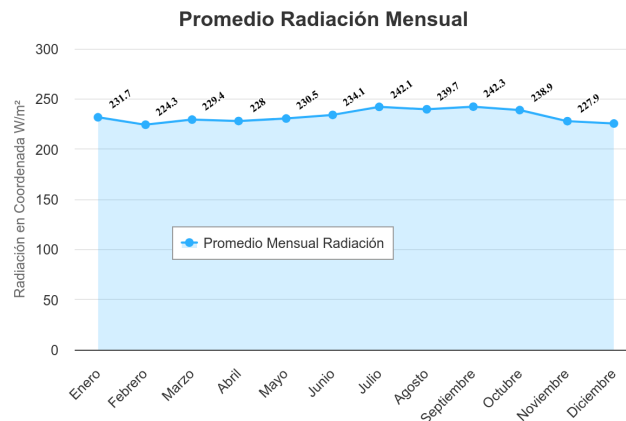


Figura 47: Datos de irradiancia mensual en el municipio de Buesaco. Fuente: [28]

Área de apertura efectiva del concentrador

El concentrador de trabajo tiene un diámetro de apertura de 0,48m, pero presenta modificaciones debido al montaje general del dispositivo.

El área de las modificaciones se calcula con el valor de sus lados.

$$A_{\text{mod1}} = 8,40 \text{ cm} \times 2,70 \text{ cm} = 22,70 \text{ cm}^2 = 0,00227 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{mod2}} = 9,20 \text{ cm} \times 3,90 \text{ cm} = 35,90 \text{ cm}^2 = 0,00359 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{modT}} = 0,00227 \text{ m}^2 + 0,00359 \text{ m}^2 = 0,00586 \text{ m}^2$$

Debido a la ubicación del motor Stirling en la parte superior, se forma una sombra sobre el concentrador, generando pérdidas en el área efectiva, por ende, se replicó la geometría de la sombra en el programa asistido por computadora SolidWorks, permitiendo así obtener el valor de la sombra generada por el motor. A pesar de que la posición del sol afecta el valor del área de la sombra, las pruebas se realizaron en el mismo horario, permitiendo que la variación de la misma no sea considerable y se pueda aplicar a todas las pruebas realizadas.

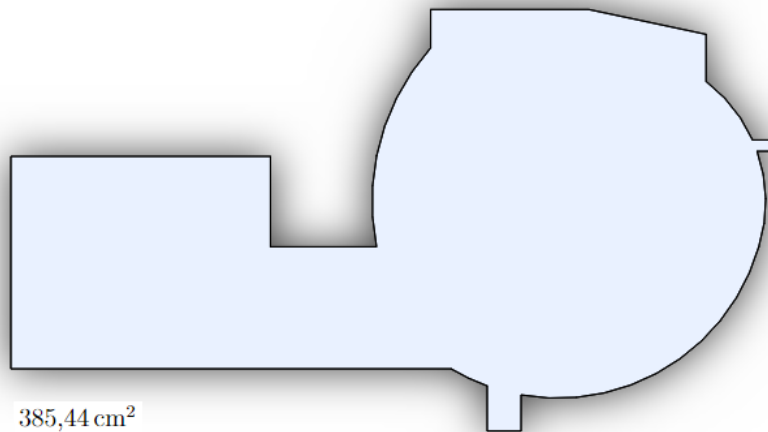


Figura 48: Sombra generada por motor Stirling sobre el concentrador.
Fuente: Elaboración propia.

$$A_{\text{sombre}} = 385,44 \text{ cm}^2 = 0,03854 \text{ m}^2$$

Por último, se calcula el área de apertura efectiva del concentrador y se resta el área total de las modificaciones y el área de la sombra.

$$A_{\text{concentrador}} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times (0,48 \text{ m})^2}{4}$$

$$A_{\text{concentrador}} = 0,18069 \text{ m}^2$$

Área de apertura efectiva

$$A_{\text{Efec}} = 0,18069 \text{ m}^2 - 0,03854 \text{ m}^2 - 0,00586 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Efec}} = 0,13629 \text{ m}^2 \approx 0,136 \text{ m}^2$$

Potencia solar

Con los datos recolectados se procede a calcular la tasa de calor de entrada solar. Las formulas usadas en esta sección se encuentran previamente presentadas en el Capítulo 2, sección 2.4.

$$P_{\text{solar}} = A_{\text{Efec}} \times I_{\text{solar}} \times \eta$$

donde

$P_{\text{solar}} \rightarrow$ potencia solar capturada (W)

$A_{\text{Efec}} \rightarrow$ área de apertura efectiva del concentrador (m^2)

$I_{\text{solar}} \rightarrow$ irradiancia solar (W/m^2)

$\eta \rightarrow$ reflectividad (estimación experimental, sección 4.1)

Remplazando se tiene:

$$P_{\text{solar}} = (0,136 \text{ m}^2) \times (242,3 \text{ W}/\text{m}^2) \times (0,61)$$

$$P_{\text{solar}} = 20 \text{ W}$$

Este mismo procedimiento se repite con las siguientes pruebas realizadas, sus resultados son anexados en el cuadro número 11.

Cálculo de potencia solar							
Fecha de Prueba	Potencia solar por unidad de área (W/m^2)	Área total modificaciones (m^2)	Área sombra (m^2)	Área concentrador (m^2)	Área Efectiva (m^2)	Reflectividad	Potencia solar (W)
9/09/2024	242,3	0,00586	0,03854	0,18069	0,13629	0,61	20
10/09/2024	242,3	0,00586	0,03854	0,18069	0,13629	0,61	20
11/09/2024	242,3	0,00586	0,03854	0,18069	0,13629	0,61	20
Promedio							20

Cuadro 18: Potencia solar

Cálculo de la eficiencia del motor por combustión

Para este cálculo se tiene en cuenta la fórmula de la eficiencia de un sistema, el cual tiene en cuenta la potencia solar de entrada (P_{sol}) calculado anteriormente y la potencia de salida (P_{sal}) (Capítulo 6, sección 6.5) del mismo.

$$\eta_{\text{práctica}} = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{sol}}}$$

donde

$$P_{\text{sal}} = 1,7 \times 10^{-4} \text{ W}$$

$$P_{\text{sol}} = 20 \text{ W}$$

Remplazando los valores se tiene:

$$\eta_{\text{práctica}} = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{sol}}} = \frac{1,7 \times 10^{-4} \cancel{\text{W}}}{20 \cancel{\text{W}}} = 8,5 \times 10^{-6} = 0,00085 \%$$

Eficiencia térmica teórica solar

Para este cálculo se replica el procedimiento realizado en combustión, cambiando los datos respectivos a la ubicación de las pruebas.

Presión atmosférica

h es la altitud a nivel del mar del municipio de Buesaco (1840 m), una vez remplazados los datos se obtiene como resultado:

$$P = 80857 \text{ Pa}$$

Con la presión atmosférica correspondiente a la altitud del lugar de las pruebas se procede a calcular la densidad del aire, con la cual se obtiene la masa del mismo.

Densidad del aire en el municipio de Buesaco

donde

T → temperatura ambiente en Kelvin (296,15 K)

HR → humedad relativa (80 %)

T_{dew} → temperatura de rocío (19 °C)

$$\rho_a = 0,94 \text{ kg/m}^3$$

Debido a que ya se conoce el volumen del aire ($V_a = 2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^3$), se obtiene el valor de la masa y el número de moles.

$$m_a = 2,38 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$n = 8,22 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Por último, se calcula el trabajo idealmente realizado por el aire (W) y el calor de absorción (Q_{abs}) en ambos casos.

Trabajo realizado por el aire

$T_1 \rightarrow$ temperatura foco caliente

$$T_1 = 120^\circ\text{C} + 273,15 = 393,15 \text{ K}$$

$T_2 \rightarrow$ temperatura foco frío

$$T_2 = 35^\circ\text{C} + 273,15 = 308,15 \text{ K}$$

Teniendo como resultado:

$$W = 1,25 \text{ J}$$

Calor de absorción y eficiencia térmica teórica de Stirling sin regeneración.

$$Q_{\text{abs}} = 20,23 \text{ J}$$

$$\eta_{\text{ss}} = 0,062 = 6,2 \%$$

Calor de absorción y eficiencia térmica teórica de Stirling con regeneración.

$$Q_{\text{abs}} = 5,78 \text{ J}$$

$$\eta_{\text{sc}} = 0,22 = 22 \%$$

Factor de desempeño

Factor de desempeño por radiación solar

Una vez calculada la eficiencia teórica y práctica del sistema se procede a calcular

el factor de desempeño Stirling con y sin regeneración (FDS_c , FDS_s) respectivamente, para ello se requiere la siguiente relación.

$$FDS_c = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Sc}}$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Ss}}$$

donde

$$\eta_{pr\acute{a}ctica} = 8,5 \times 10^{-6}$$

$$\eta_{Sc} = 0,22$$

$$\eta_{Ss} = 0,062$$

Remplazando los valores se tiene:

$$FDS_c = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Sc}} = \frac{8,5 \times 10^{-6}}{0,22} = 3,9 \times 10^{-5} = 0,0039 \%$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{pr\acute{a}ctica}}{\eta_{Ss}} = \frac{8,5 \times 10^{-6}}{0,062} = 1,4 \times 10^{-4} = 0,014 \%$$

Esto quiere decir que el motor Stirling está operando a un 0,0039 % de la eficiencia térmica teórica de Stirling con regeneración y a un 0,014 % de la eficiencia térmica teórica de Stirling sin regeneración.

6.6. Análisis de resultados

El propósito de esta sección es analizar los resultados obtenidos del dispositivo. Este análisis va enfocado a la relación de los ciclos termodinámicos, al calor de absorción por ciclo y a las eficiencias teórico – prácticas.

Análisis de ciclos termodinámicos

Es muy importante comprender la diferencia entre el estudio de los ciclos teóricos y ciclos reales. Para ello se plantean dos casos que ponen en contexto estas diferencias.

Máquinas térmicas teóricas

En la Figura 1 del documento se presenta un esquema fundamental de una máquina térmica, donde se tiene en cuenta el calor de entrada y salida, como también el trabajo proporcionado por esta. A nivel de eficiencias los ciclos de Carnot y Stirling con regeneración contemplan únicamente las temperaturas de los focos de calor y frío.

Máquinas térmicas reales

En la Figura 49 se presenta la configuración real del comportamiento del motor Stirling sin regeneración, donde se ven involucradas todas las transformaciones de energía. La energía de entrada es proporcionada por el foco caliente (Q_{ent}), la cual se transforma en energía interna (térmica) del gas de trabajo, esta energía se da en las cámaras de expansión y potencia, la cual se convierte, por un lado en calor de salida hacia el foco frío (Q_{sal}), y por otro, en energía mecánica, gracias al sistema de inercia y conducción (volante de inercia, bielas – manivelas, émbolo y membrana) obteniendo así un trabajo de salida (W_{sal}), que posteriormente se convierte en energía eléctrica obtenida por el generador.

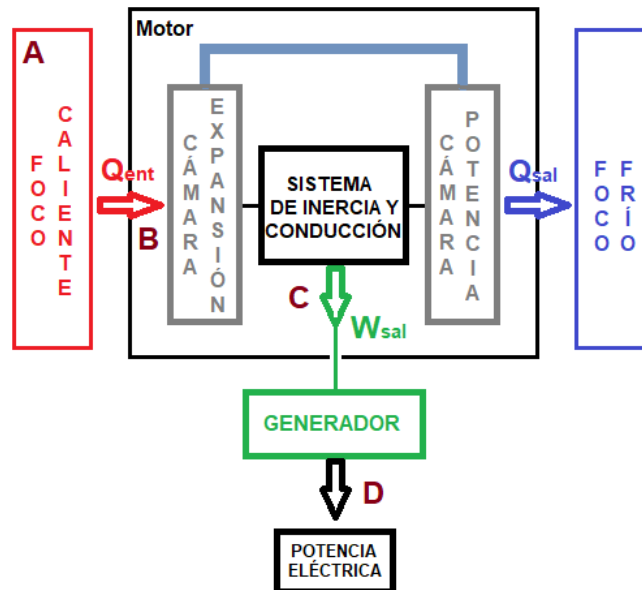


Figura 49: Esquema de un Ciclo Stirling real.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificadas las transformaciones de energía, se procede a exponer las pérdidas que presentan cada una de ellas.

- Fuente de calor por combustión (Foco Caliente): pérdidas por radiación de la llama, evaporación del combustible, convección.
- Fuente de calor por radiación solar (Foco Caliente): presenta pérdidas por

radiación, convección, ópticas, aberraciones e imperfecciones en la superficie del concentrador.

- Energía interna (térmica): presenta pérdidas por las propiedades térmicas del aire, viscosidad, fugas y transferencia de calor irreversible.
- Energía mecánica: presenta pérdidas por fricción, desgaste y calentamiento.
- Energía eléctrica: presenta pérdidas internas por resistencia eléctrica, magnéticas, mecánicas y por corrientes de excitación.

Por último, en las máquinas reales, a nivel de eficiencia, se contempla la presión atmosférica de la ubicación de las pruebas, la densidad del fluido, la masa, el número de moles, la capacidad calorífica molar, el trabajo realizado por el gas y el calor de absorción del mismo, así como también el volumen de trabajo, tal como se vio en los cálculos presentados.

Interpretación:

En los ciclos termodinámicos de las máquinas teóricas y reales se contemplan la transferencia de calor de un foco a otro, teniendo como resultado una eficiencia ideal por parte de las máquinas térmicas teóricas, pero a medida que se involucran otro tipo de transformaciones de energía, la eficiencia disminuye, como es el caso de las máquinas térmicas reales.

Es interesante notar que en el cálculo de eficiencia de ciclo ideal se está calculando la razón entre la energía del punto C y B del diagrama de la Figura 49, mientras que, para el cálculo del ciclo real o práctico, la razón es entre los puntos D y A. Por lo tanto, en esta última siempre se tendrá un resultado menor porque hay muchas conversiones de energía en el medio, con sus correspondientes pérdidas.

Como se puede observar en Figura 49, si se evaluará la eficiencia práctica con la potencia proporcionada directamente por el sistema de inercia y conducción del motor (punto C), se obtendría una eficiencia mayor a la obtenida con la potencia medida después del dínamo (punto D), debido a que esa transformación de energía extra genera muchas más pérdidas a las registradas hasta ese momento. Cabe recalcar que la evaluación de la eficiencia proporcionada directamente por el sistema de inercia no sería igual al de las máquinas térmicas teóricas, pero si se acercaría más a la eficiencia térmica teórica de Stirling sin regeneración, lo cual

favorecería los factores de desempeño.

Análisis de eficiencias

Para este análisis se tiene en cuenta los factores de desempeño calculados en Capítulo 6, sección 6.5., correspondiente a las fuentes de calor por combustión y radiación solar.

Factor de desempeño por combustión

$$FDS_c = \frac{\eta_{práctica}}{\eta_{Sc}} = \frac{3,5 \times 10^{-6}}{0,32} = 1,1 \times 10^{-5} = 0,0011 \%$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{práctica}}{\eta_{Ss}} = \frac{3,5 \times 10^{-6}}{0,068} = 5,2 \times 10^{-5} = 0,0052 \%$$

Factor de desempeño por radiación solar

$$FDS_c = \frac{\eta_{práctica}}{\eta_{Sc}} = \frac{8,5 \times 10^{-6}}{0,22} = 3,9 \times 10^{-5} = 0,0039 \%$$

$$FDS_s = \frac{\eta_{práctica}}{\eta_{Ss}} = \frac{8,5 \times 10^{-6}}{0,062} = 1,4 \times 10^{-4} = 0,014 \%$$

Con los factores de desempeño correspondientes, se procede a calcular el índice de rendimiento relativo, el cual relaciona el comportamiento del motor respecto a las fuentes de calor.

Índice de rendimiento relativo de las fuentes de calor

Con el análisis de eficiencia del motor con ambas fuentes de calor, es importante comparar el desempeño que tienen entre sí. La formula usada en esta sección se encuentra previamente presentada en el Capítulo 2, sección 2.4.

Eficiencias térmicas teóricas de Stirling con regeneración

$$\eta_{combustión} = 0,32$$

$$\eta_{solar} = 0,22$$

Con estos valores se calcula el índice de rendimiento relativo (IRR), donde se mide el comportamiento del motor con fuentes de calor por radiación solar en relación con fuentes de calor por combustión, respecto a los ciclos Stirling con regeneración.

$$IRR = \frac{\eta_{solar}}{\eta_{combustión}} = \frac{0,22}{0,32} = 0,7$$

Eficiencias térmicas teóricas de Stirling sin regeneración

$$\eta_{\text{combustión}} = 0,068$$

$$\eta_{\text{solar}} = 0,062$$

Con estos valores se calcula el índice de rendimiento relativo (IRR), donde se mide el comportamiento del motor con fuentes de calor por radiación solar en relación con fuentes de calor por combustión, respecto a los ciclos Stirling sin regeneración.

$$\text{IRR} = \frac{\eta_{\text{solar}}}{\eta_{\text{combustión}}} = \frac{0,062}{0,068} = 0,9$$

Eficiencias prácticas

$$\eta_{\text{combustión}} = 3,5 \times 10^{-6}$$

$$\eta_{\text{solar}} = 8,5 \times 10^{-6}$$

Con estos valores se calcula el índice de rendimiento relativo (IRR), donde se mide el comportamiento del motor con fuentes de calor por radiación solar en relación con fuentes de calor por combustión, respecto a las prácticas realizadas con ambas fuentes.

$$\text{IRR} = \frac{\eta_{\text{solar}}}{\eta_{\text{combustión}}} = \frac{8,5 \times 10^{-6}}{3,5 \times 10^{-6}} = 2,4$$

Interpretación:

Con los factores de desempeño y los índices de rendimiento relativo calculados con los datos obtenidos de la sección 3.5. Se puede decir que la eficiencia práctica del motor Stirling, a pesar de tener valores muy pequeños, está más cercana a alcanzar las eficiencias máximas posibles por medio de las fuentes de calor por radiación solar.

El motor Stirling es aproximadamente 2,4 veces más eficiente cuando se utiliza energía solar en comparación con la combustión, es decir, que convierte la energía de entrada en trabajo útil de manera más eficiente. A pesar de que la entrada de calor sea mucho mayor en comparación a la energía solar y que tanto los índices de rendimiento relativo con y sin regeneración dan registros favorables a la fuente de calor por combustión, su proceso es ineficiente, esto se puede deber a pérdidas de energía no existentes en el caso solar, como la radiación de la llama, la eva-

poración del combustible, pérdidas por convección, entre otras [29]. Esto además de las pérdidas que hay en común en ambos casos, como factores mecánicos y limitaciones en el generador del dispositivo, siendo este incapaz de convertir toda la energía mecánica de entrada (sistema de inercia y conducción) en potencia eléctrica de salida.

Debido a estos resultados, se ve la necesidad de analizar cómo se está aprovechando la energía suministrada por la fuente, lo cual puede ayudar a entender la diferencia en los resultados del índice de rendimiento relativo entre los casos teóricos y el caso práctico.

Análisis de calor de absorción por ciclo

En este análisis se relaciona la tasa de calor y potencia solar proporcionadas por las fuentes de combustión y solar, respectivamente, con el calor requerido por ciclo del motor Stirling. Para ello es necesario tener en cuenta los ciclos por minuto que tiene el motor, cuando está expuesto a las fuentes de calor.

En el cuadro 19 se observan 3 pruebas realizadas por cada fuente, estas mediciones se realizaron por minuto en diferentes etapas del funcionamiento del motor, con el fin de obtener un valor más certero. Este valor se divide entre 60 y se registra en segundos en el cuadro.

Nº Pruebas	Ciclos por segundo (Combustión)	Ciclos por segundo (Solar)
1	1,5	0,83
2	1,3	0,78
3	1,2	0,95
Promedio	1,33	0,85

Cuadro 19: Ciclos por segundo del motor Stirling

Con los promedios de los ciclos por segundo y los cálculos de calor de absorción de cada fuente, con y sin regeneración se procede a realizar el análisis.

Tasa de calor de entrada requerida

En este caso la tasa de calor de entrada suministrada por combustión es de $\dot{Q}_{CS} =$

487 W (ver sección 6.5) y la tasa de calor de entrada requerida se calcula a continuación. Las formulas usadas en esta sección se encuentran previamente presentadas en el Capítulo 2, sección 2.4.

$$\dot{Q}_{\text{Crs}} = Q_{\text{abs-s}} \times \text{CPS}$$

donde

$\dot{Q}_{\text{Crs}} \rightarrow$ tasa de calor de entrada requerida, sin regeneración.

$Q_{\text{abs-s}} \rightarrow$ calor de absorción sin regeneración por ciclo (27,90 J, ver sección 6.5)

CPS $\rightarrow$ ciclos por segundo

Remplazando se tiene

$$\dot{Q}_{\text{Crs}} = 27,90 \text{ J} \times 1,33\text{s}^{-1}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{\text{Crs}} = 37,1 \text{ W}}$$

Este mismo procedimiento se lleva a cabo con ciclos con regeneración:

$$\dot{Q}_{\text{Crc}} = Q_{\text{abs-s}} \times \text{CPS}$$

donde

$\dot{Q}_{\text{Crc}} \rightarrow$ tasa de calor de entrada requerida, con regeneración.

$Q_{\text{abs-c}} \rightarrow$ calor de absorción con regeneración por ciclo (5,95 J, ver sección 6.5)

Remplazando se tiene

$$\dot{Q}_{\text{Crc}} = 5,95 \text{ J} \times 1,33\text{s}^{-1}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{\text{Crc}} = 7,9 \text{ W}}$$

Potencia solar requerida

En este caso la potencia suministrada por la fuente de radiación solar es de $P_{\text{Ss}} = 20 \text{ W}$ (ver sección 6.5) y la potencia solar requerida se calcula a continuación:

$$P_{\text{Srs}} = Q_{\text{abs-s}} \times \text{CPS}$$

donde

$P_{\text{Srs}} \rightarrow$ potencia solar requerida, sin regeneración.

$Q_{\text{abs-s}} \rightarrow$ calor de absorción sin regeneración por ciclo (27,90 J, ver sección 6.5)

CPS $\rightarrow$ ciclos por segundo

Remplazando se tiene

$$P_{\text{Srs}} = 20,23 \text{ J} \times 0,85\text{s}^{-1}$$

$$P_{\text{Srs}} = 17,2 \text{ W}$$

Este mismo procedimiento se lleva a cabo con ciclos con regeneración:

$$P_{\text{Src}} = Q_{\text{abs-s}} \times \text{CPS}$$

donde

$P_{\text{Src}} \rightarrow$ potencia solar requerida, con regeneración.

$Q_{\text{abs-c}} \rightarrow$ calor de absorción con regeneración por ciclo (5,78 J, ver sección 6.5)

Remplazando se tiene

$$P_{\text{Src}} = 5,78 \text{ J} \times 0,85\text{s}^{-1}$$

$$P_{\text{Src}} = 4,9 \text{ W}$$

Índice de aprovechamiento energético

Este índice muestra qué tan bien se está aprovechando la potencia suministrada desde la fuente de calor, frente a la demanda teórica del fluido de trabajo en el motor. Permite identificar si la energía suministrada es suficiente para realizar los procesos esperados y cuánto de ese calor realmente se está usando.

Si el resultado de este índice es mayor a 1, significa que se está suministrando más calor del requerido, lo cual es coherente. Sin embargo, si el número es muy grande, quiere decir que se está desperdiciando mucha energía de la fuente. Un resultado igual a 1 es un caso perfecto en el que se está suministrando de manera exacta el calor requerido. Finalmente un resultado menor a 1 representaría una inconsistencia, o que el motor no podría funcionar porque no se alcanza a suministrarle el calor requerido.

Las formulas usadas en esta sección se encuentran previamente presentadas en el Capítulo 2, sección 2.4.

Índice de aprovechamiento energético por combustión

Teniendo la tasa de calor de entrada requerida y suministrada, de los ciclos Stirling con y sin regeneración se calcula el índice de aprovechamiento de cada una de ellas (IA_c , IA_s). Para ello se requiere de la siguiente relación.

$$IA_c = \frac{\dot{Q}_{Cs}}{\dot{Q}_{Crs}}$$

$$IA_s = \frac{\dot{Q}_{Cs}}{\dot{Q}_{Crc}}$$

donde

$$\dot{Q}_{Cs} = 487 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Crs} = 37,1 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Crc} = 7,9 \text{ W}$$

Remplazando los valores se tiene:

$$IA_c = \frac{\dot{Q}_{Cs}}{\dot{Q}_{Crs}} = \frac{487 \text{ W}}{37,1 \text{ W}} = 13$$

$$IA_s = \frac{\dot{Q}_{Cs}}{\dot{Q}_{Crc}} = \frac{487 \text{ W}}{7,9 \text{ W}} = 61$$

Índice de aprovechamiento por radiación solar

Teniendo la potencia solar requerida y suministrada, de los ciclos Stirling con y sin regeneración se calcula el índice de aprovechamiento de cada una de ellas (IA_c , IA_s). Para ello se requiere de la siguiente relación.

$$IA_c = \frac{P_{Ss}}{P_{Srs}}$$

$$IA_s = \frac{P_{Ss}}{P_{Src}}$$

donde

$$P_{Ss} = 20 \text{ W}$$

$$P_{Srs} = 17,2 \text{ W}$$

$$P_{Src} = 4,9 \text{ W}$$

Remplazando los valores se tiene:

$$IA_c = \frac{P_{Ss}}{P_{Srs}} = \frac{20 \text{ W}}{17,2 \text{ W}} = 1,2$$

$$IA_s = \frac{P_{Ss}}{P_{Src}} = \frac{20 \text{ W}}{4,9 \text{ W}} = 4$$

Interpretación:

Con los índices de aprovechamiento de combustión y radiación solar, se puede determinar que el calor suministrado por las fuentes de calor es superior al requerido, lo cual indica que, a pesar de haber pérdidas, en el caso de radiación solar son bastante moderadas, teniendo una potencia solar requerida muy cercana al valor proporcionado por el concentrador solar.

7. Conclusiones

En este capítulo se presenta un recuento de los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación, destacando los principales aportes y logros alcanzados, gracias a la metodología implementada. Adicional a ello se presenta una evaluación del cumplimiento de los objetivos establecidos en el proyecto, como también una serie de recomendaciones prácticas para futuras investigaciones o desarrollos relacionados.

7.1. Aportes del proyecto

Es importante resaltar los aportes que se presentan con el desarrollo de la investigación, entre los cuales se tienen:

- Un motor Stirling funcional, obtenido después de un proceso completo de diseño ingenieril, con el cual se puede comprender de forma práctica los ciclos termodinámicos involucrados, con su respectivo diseño 3D y el uso del programa asistido por computadora SolidWorks.
- Un sistema de seguimiento solar funcional, programado para trabajar de acuerdo a las horas de salida y puesta del sol en el lugar donde se realicen las pruebas. El sistema se puede adaptar a cualquier tipo de motor Stirling.
- Protocolos de experimentación del dispositivo, enfocados a diferentes fuentes de calor, con los cuales se puede llevar a cabo el correcto funcionamiento y la obtención de resultados.
- Diseño y programación en Python y C++ (usando la librería de Arduino) de un sistema de control y adquisición de datos, por medio del cual, se puede manejar el sistema de seguimiento y obtener los datos correspondientes al voltaje producido y las temperaturas de los focos.
- Datos experimentales originales en el departamento de Nariño, municipio de Buesaco, donde se llevó a cabo las pruebas con fuentes de calor por radiación solar. A nivel local, no existen investigaciones relacionadas anteriores a este proyecto.
- Recopilación de cálculos, enfocados al análisis de eficiencias teóricas y prácticas, de los ciclos termodinámicos Stirling con y sin regeneración, con su respectivo estudio.

- Puesta a punto de la impresora 3D del departamento de Física, de la Universidad de Nariño, donde se puso en marcha el equipo y se identificó el proceso paso a paso para su correcto funcionamiento. Adicional a ello se instaló el programa Cura para el control de la impresora y el programa asistido por computadora SolidWorks para el diseño 3D.
- Un proyecto de investigación original en el que, desde su propuesta hasta su finalización, se aplicaron los conocimientos adoptados en el transcurso de la maestría, con énfasis en las electivas relacionadas con la didáctica de la física y la física aplicada a las energías alternativas y renovables.

7.2. Resultados principales

Es importante resaltar los resultados obtenidos en esta investigación, teniendo en cuenta el comportamiento de las temperaturas frente a la producción de voltaje, el análisis de los ciclos termodinámicos, los índices de rendimiento relativo, como también los índices de aprovechamiento energético.

- Se pudo observar con los datos obtenidos con ambas fuentes de calor, que entre mayor sea la diferencia de temperaturas, se obtiene mayor producción de voltaje.
- De los ciclos termodinámicos se puede observar la gran diferencia que se presenta en los casos teóricos y prácticos. La importancia de considerar todos los procesos que se requieren a nivel práctico para poder evaluar las mismas variables con los casos teóricos, quedando en desventaja uno frente al otro.
- Con el índice de rendimiento relativo se puede observar que, a pesar que a nivel teórico la fuente de calor por combustión es más eficiente, las pérdidas que presenta esta, a nivel práctico, favorece a las fuentes de calor por radiación solar.
- Con el índice de aprovechamiento energético se puede observar que en las dos fuentes de calor se está suministrando la potencia requerida para su funcionamiento a nivel teórico y práctico. En los casos de combustión se suministra mucho más de lo requerido, por lo que es posible concluir que gracias al diseño del concentrador esférico se logra un muy buen aprovechamiento de la fuente de energía solar.

7.3. Cumplimiento de objetivos

Con el desarrollo de la investigación culminada, es importante identificar si el objetivo general y los específicos se cumplieron en su totalidad, para ello se hace una recopilación de cada uno de ellos.

Objetivo General

El objetivo general contempla “Estudiar el comportamiento de un prototipo de motor Stirling impulsado por energía solar”. El cual fue alcanzado mediante el desarrollo de la investigación, con el diseño y construcción de cada uno de los componentes del dispositivo, los cuales fueron puestos a prueba en diferentes contextos, permitiendo así analizar el prototipo.

Objetivos específicos

Identificar los modelos de motor Stirling desarrollados actualmente, impulsados por combustión y energía solar.

- Se cumplió a través de la búsqueda de proyectos e investigaciones enfocadas a este tema, a nivel internacional, nacional y local. Este desarrollo se encuentra registrado en el Capítulo 2, sección 2.3.

Diseñar mediante un programa asistido por computadora un modelo de motor Stirling impulsado por energía solar.

- Se cumplió a través del diseño de cada uno de los componentes, no solo del motor Stirling, sino de un sistema de seguimiento solar. Todo esto necesario para llevar a cabo el análisis de su comportamiento cuando es sometido a este tipo de fuentes de calor por radiación. El proceso de diseño se desarrolló en el Capítulo 4. Los planos de cada uno de ellos se encuentran en el Apéndice C.

Elaborar el prototipo de motor Stirling funcional.

- Se cumplió a través de la construcción de cada uno de los componentes anteriormente diseñados, para ello se usó la impresora 3D del departamento de física, las máquinas y herramientas del multitaller, como también del taller particular Inemco. Una vez se tuvo el prototipo, este fue sometido a

una serie de pruebas con distintas fuentes de calor y fueron exitosas, permitiendo recopilar los datos más importantes de su operación. Estos datos con distintas fuentes de calor se registran en el Capítulo 6, sección 6.3.

Analizar los ciclos de Carnot con una fuente de calor de energía térmica solar, mediante la eficiencia del prototipo.

- Se cumplió a través de los cálculos de eficiencia de los ciclos Stirling con y sin regeneración, con los cálculos de factor de desempeño de cada uno de ellos y con la comparación del comportamiento del prototipo con diferentes fuentes de calor incluyendo la combustión y la radiación solar. Estos cálculos se pueden encontrar en el Capítulo 6, sección 6.5.

7.4. Recomendaciones

Después del desarrollo de la investigación se determinó que puede haber posibles cambios, con los cuales se podría obtener mejores resultados. Estos cambios se exponen a continuación:

- Realizar pruebas del dispositivo en otros lugares, donde se perciba mayor irradiancia solar.
- Realizar pruebas con otros tipos de motor Stirling, incluyendo otros tipos de motor alfa, con el mismo sistema de seguimiento solar.
- Realizar pruebas con concentradores solares más grandes y con materiales con mayor reflectividad.
- Cambiar el dínamo (generador), por uno más eficiente.
- Analizar la posibilidad de obtener la potencia de salida directamente del sistema de inercia y conducción, y replicar las pruebas y cálculos realizados, para su posterior comparativa.

A. Apéndice: Códigos Python

A.1. Cálculos Python

```
1  hs = 6
2  ms = 3
3  ss = 58
4  hp = 6
5  mp = 11
6  sp = 59
7  hora_trabajo_inicio = 11
8  minuto_trabajo_inicio = 55
9  segundo_trabajo_inicio = 0
10 hora_trabajo_final = 12
11 minuto_trabajo_final = 5
12 segundo_trabajo_final = 0
13
14 # Calcular la duración del recorrido solar
15 hsr = 11 - float(hs)
16 msr = 59 - float(ms)
17 ssr = 60 - float(ss)
18 horas = float(hsr) + float(hp)
19 minutos = float(msr) + float(mp)
20 segundos = float(ssr) + float(sp)
21
22 # Ajustar los valores de minutos y segundos si exceden 60
23 contadorms = 0
24 while True:
25     if minutos < 60:
26         break
27     else:
28         minutos = minutos - 60
29         contadorms = contadorms + 1
30 contadorss = 0
31 while True:
32     if segundos < 60:
33         break
34     else:
35         segundos = segundos - 60
36         contadorss = contadorss + 1
37
38 # Ajustar las horas finales
39 horas_contadorms = horas + contadorms
40 minutos_contadorss = minutos + contadorss
```

```

41
42 contadorhd = 0
43 if minutos_contadorss >= 60:
44     contadorhd = contadorhd + 1
45     minutos_contadorss = minutos_contadorss - 60
46
47 contadormd = 0
48 if segundos >= 60:
49     contadormd = contadormd + 1
50     segundos = segundos - 60
51
52 hrs = horas_contadorms + contadorhd
53
54 # Calcular tiempos de recorrido y ángulos
55 mt = minutos_contadorss / 60
56 st = segundos / 3600
57 tiempo_recorrido = hrs + mt + st
58 tm = tiempo_recorrido / 2
59 hss = hs + (ms / 60) + (ss / 3600)
60 hms = hss + tm
61
62 tu = tiempo_recorrido / 180
63 tua = round(tu, 3)
64 hat = hora_trabajo_inicio - hs
65 mat = (minuto_trabajo_inicio - ms) / 60
66 sat = (segundo_trabajo_inicio - ss) / 3600
67 tiempo_recorrido_angulo = hat + mat + sat
68 at = round((tiempo_recorrido_angulo / tu), 1)
69
70 horati = hora_trabajo_inicio + (minuto_trabajo_inicio / 60) + (
    segundo_trabajo_inicio / 3600)
71
72 # Calcular la posición solar inicial y grados de reubicación
73 if horati < hms:
74     pt = 90 - at
75     pti = pt
76     re = round((13.0 * pti), 1)
77     rec = 0
78 elif horati > hms:
79     pt = at - 90
80     pti = round(pt, 1)
81     re = 0
82     rec = round((13.0 * pti), 1)
83 else:
84     pti = 0

```

```

85     re = 0
86     atu = at
87
88     # Calcular la posición solar inicial y grados de reubicación
89     hrt = hora_trabajo_final - hora_trabajo_inicio
90     mrt = (minuto_trabajo_final - minuto_trabajo_inicio) / 60
91     srt = (segundo_trabajo_final - segundo_trabajo_inicio) / 3600
92
93     tiempo_recorrido_trabajo = hrt + mrt + srt
94
95     trt = round((tiempo_recorrido_trabajo / tu), 1)
96
97     tt = round((3.6e6 * tu), 0)
98     tar = trt + at
99     taru = tar
100
101     # Calcular grados de reubicación final
102     rs = tar - 90
103
104     if rs < 0:
105         rs = rs * (-1)
106
107     rsr = round(rs, 1)
108     va = (round(rs, 1) * 13.0)
109
110     # Ajustar grados y tiempos adicionales
111     ttd = round((tt / 60), 0)
112     contadorat = 0
113     while True:
114         if 0 < at < 1:
115             break
116         else:
117             contadorat = contadorat + 1
118             at = at - 1
119     atr = round(at, 1)
120
121     contadoratr = 0
122     atrm = round((1 - atr), 1)
123     vr = atrm
124     u = atrm
125     while True:
126         if -10 < atrm < 0.1:
127             break
128         else:
129             contadoratr = contadoratr + 1

```

```

130         atrm = atrm - 0.1
131
132     td = contadoratr * ttd
133     co = contadoratr * (13.0/10)
134     coo = contadoratr / 10
135     coa = atu + coo
136     tdc = round(td, 0)
137
138     cor = round(co, 1)
139     if cor == 0:
140         dt = 0
141     else:
142         dt = round((vr * 60), 0)
143
144     ptar = taru
145     while True:
146         if 0 <= ptar < 1:
147             break
148         else:
149             ptar = ptar - 1
150
151     tco = (1 - ptar) + taru
152     tre = round((tco - coa), 0)
153     tren = round(((tiempo_recorrido_trabajo -
154                     tiempo_recorrido_angulo) / tu), 0) + 1
154     x = (tre * 60) + dt
155
156     hop = hora_trabajo_final + (minuto_trabajo_final / 60) + (
157         segundo_trabajo_final / 3600)
157     if hop > hms:
158         trem = round(((tco - 90) * 13.0), 0)
159         v = 1
160     else:
161         trem = round(((90 - tco) * 13.0), 0)
162         v = 0

```

A.2. Código general

Interfaz

```
1 import tkinter as tk
2 import serial
3 import time
4
5 # Definir las variables globales para almacenar los valores
6 hora_trabajo_inicio = 0
7 minuto_trabajo_inicio = 0
8 segundo_trabajo_inicio = 0
9
10 # Declarar las variables globales para otros valores
11 re = 0
12 tdc = 0
13 cor = 0
14 tt = 0
15 ttd = 0
16 tre = 0
17 trem = 0
18 x = 0
19 dt = 0
20 v = 0
21
22 def leer_valores():
23     # Leer los valores desde el archivo 'valores.txt'
24     with open('valores.txt', 'r') as f:
25         line = f.readline()
26         valores = line.split(',')
27
28     # Convertir los valores leídos a enteros o flotantes según
    corresponda
29     hora_trabajo_inicio = int(valores[0])
30     minuto_trabajo_inicio = int(valores[1])
31     segundo_trabajo_inicio = int(valores[2])
32     re = float(valores[3])
33     cor = float(valores[4])
34     tt = float(valores[5])
35     tre = float(valores[6])
36     trem = float(valores[7])
37     ttd = float(valores[8])
38     x = float(valores[9])
39     dt = float(valores[10])
40     v = float(valores[11])
41
```

```

42
43     # Retornar los valores leídos y convertidos
44     return hora_trabajo_inicio, minuto_trabajo_inicio,
45            segundo_trabajo_inicio, re, cor, tt, tre, trem, ttd, x, dt, v
46
47 def crear_interfaz_seguimiento():
48     def calcular():
49         # Obtener los valores ingresados en la interfaz
50         hs = int(entry_hs.get())
51         ms = int(entry_ms.get())
52         ss = int(entry_ss.get())
53         hp = int(entry_hp.get())
54         mp = int(entry_mp.get())
55         sp = int(entry_sp.get())
56         hora_trabajo_inicio = int(entry_hti.get())
57         minuto_trabajo_inicio = int(entry_mti.get())
58         segundo_trabajo_inicio = int(entry_sti.get())
59         hora_trabajo_final = int(entry_htf.get())
60         minuto_trabajo_final = int(entry_mtf.get())
61         segundo_trabajo_final = int(entry_stf.get())
62
63         # Calcular la duración del recorrido solar
64         hsr = 11 - float(hs)
65         msr = 59 - float(ms)
66         ssr = 60 - float(ss)
67         horas = float(hsr) + float(hp)
68         minutos = float(msr) + float(mp)
69         segundos = float(ssr) + float(sp)
70
71         # Ajustar los valores de minutos y segundos si exceden
60
72         contadorms = 0
73         while True:
74             if minutos < 60:
75                 break
76             else:
77                 minutos = minutos - 60
78                 contadorms = contadorms + 1
79         contadorss = 0
80         while True:
81             if segundos < 60:
82                 break
83             else:
84                 segundos = segundos - 60

```

```

85         contadorss = contadorss + 1
86
87     # Ajustar las horas finales
88     horas_contadorms = horas + contadorms
89     minutos_contadorss = minutos + contadorss
90
91     contadorhd = 0
92     if minutos_contadorss >= 60:
93         contadorhd = contadorhd + 1
94         minutos_contadorss = minutos_contadorss - 60
95
96     contadormd = 0
97     if segundos >= 60:
98         contadormd = contadormd + 1
99         segundos = segundos - 60
100
101     hrs = horas_contadorms + contadorhd
102     resultado_text.delete("1.0", tk.END)
103     resultado_text.insert(tk.END, 'Duración de recorrido
solar: {} horas {} minutos {} segundos\n'.format(int(hrs),
int(minutos_contadorss + contadormd), int(segundos)))
104
105     # Calcular tiempos de recorrido y ángulos
106     mt = minutos_contadorss / 60
107     st = segundos / 3600
108     tiempo_recorrido = hrs + mt + st
109     tm = tiempo_recorrido / 2
110     hss = hs + (ms / 60) + (ss / 3600)
111     hms = hss + tm
112
113     tu = tiempo_recorrido / 180
114     tua = round(tu, 3)
115     hat = hora_trabajo_inicio - hs
116     mat = (minuto_trabajo_inicio - ms) / 60
117     sat = (segundo_trabajo_inicio - ss) / 3600
118     tiempo_recorrido_angulo = hat + mat + sat
119     at = round((tiempo_recorrido_angulo / tu), 1)
120
121     horati = hora_trabajo_inicio + (minuto_trabajo_inicio /
60) + (segundo_trabajo_inicio / 3600)
122
123     # Calcular la posición solar inicial y grados de
reubicación
124     if horati < hms:
125         pt = 90 - at

```

```

126         pti = pt
127         re = round((13.0 * pti),1)
128         rec = 0
129     elif horati > hms:
130         pt = at - 90
131         pti = round(pt, 1)
132         re = 0
133         rec = round((13.0 * pti),1)
134     else:
135         pti = 0
136         re = 0
137     atu = at
138
139     if at == 90.0:
140         resultado_text.insert(tk.END, 'No hay reubicación
141         inicial\n')
142     elif at > 90.0:
143         resultado_text.insert(tk.END, 'Posición solar
144         inicial de trabajo: {}°\nGrados de reubicación p.m.: {}°\n'.
145         format(at, pti))
146     else:
147         resultado_text.insert(tk.END, 'Posición solar
148         inicial de trabajo: {}°\nGrados de reubicación a.m.: {}°\n'.
149         format(at, pti))
150
151     # Calcular la posición solar inicial y grados de
152     reubicación
153     hrt = hora_trabajo_final - hora_trabajo_inicio
154     mrt = (minuto_trabajo_final - minuto_trabajo_inicio) /
155     60
156     srt = (segundo_trabajo_final - segundo_trabajo_inicio) /
157     3600
158
159     tiempo_recorrido_trabajo = hrt + mrt + srt
160
161     trt = round((tiempo_recorrido_trabajo / tu), 1)
162
163     tt = round((3.6e6 * tu), 0)
164     tar = trt + at
165     taru = tar
166     resultado_text.insert(tk.END, 'Posición solar final de
167     trabajo: {}°\nGrados de rotación: {}°\n'.format(round(tar,1),
168     trt))
169
170     # Calcular grados de reubicación final

```

```

161         rs = tar - 90
162
163         if rs < 0:
164             rs = rs * (-1)
165
166         rsr = round(rs, 1)
167         va = (round(rs, 1) * 13.0)
168         resultado_text.insert(tk.END, 'Grados de reubicación
final: {}°\n'.format(rsr))
169
170         # Ajustar grados y tiempos adicionales
171         ttd = round((tt / 60), 0)
172         contadorat = 0
173         while True:
174             if 0 < at < 1:
175                 break
176             else:
177                 contadorat = contadorat + 1
178                 at = at - 1
179         atr = round(at, 1)
180
181         contadoratr = 0
182         atrm = round((1 - atr), 1)
183         vr = atrm
184         u = atrm
185         while True:
186             if -10 < atrm < 0.1:
187                 break
188             else:
189                 contadoratr = contadoratr + 1
190                 atrm = atrm - 0.1
191
192         td = contadoratr * ttd
193         co = contadoratr * (13.0/10)
194         coo = contadoratr / 10
195         coa = atu + coo
196         tdc = round(td, 0)
197
198         cor = round(co, 1)
199         if cor == 0:
200             dt = 0
201         else:
202             dt = round((vr * 60), 0)
203
204         ptar = taru

```

```

205         while True:
206             if 0 <= ptar < 1:
207                 break
208             else:
209                 ptar = ptar - 1
210
211             tco = (1 - ptar) + taru
212             tre = round((tco - coa), 0)
213             tren = round(((tiempo_recorrido_trabajo -
214 tiempo_recorrido_angulo) / tu), 0) + 1
215             x = (tre * 60) + dt
216
217             hop = hora_trabajo_final + (minuto_trabajo_final / 60) +
218 (segundo_trabajo_final / 3600)
219             if hop > hms:
220                 trem = round(((tco - 90) * 13.0), 0)
221                 v = 1
222             else:
223                 trem = round(((90 - tco) * 13.0), 0)
224                 v = 0
225
226             # Mostrar resultados y guardar en archivo
227             resultado_text.insert(tk.END, 'V1={} V2={} V3={} V4={}
228 V5={} V6={}\n'.format(re, tdc, cor, tt, tre, trem))
229
230             with open('valores.txt', 'w') as f:
231                 f.write(f"{hora_trabajo_inicio},{
232 minuto_trabajo_inicio},{segundo_trabajo_inicio},{re},{cor},{
233 tt},{tre},{trem},{ttd},{x},{dt},{v}")
234
235             entry_hti.delete(0, tk.END)
236             entry_mti.delete(0, tk.END)
237             entry_sti.delete(0, tk.END)
238             entry_hrf.delete(0, tk.END)
239             entry_mrf.delete(0, tk.END)
240             entry_stf.delete(0, tk.END)
241
242             try:
243                 arduino = serial.Serial('COM4', 9600) # Intentar
244 establecer la conexión con Arduino en el puerto COM4
245                 time.sleep(2) # Esperar un momento para que la
246 conexión se establezca
247
248                 valores = ','.join(map(str, [re, rec, 0, 0, 0, 0, 0,
249 0, 0])) # Convertir los valores a una cadena separada por

```

```

242         comas
                arduino.write(valores.encode()) # Enviar la cadena
de valores al Arduino
243
244         arduino.close() # Cerrar la conexión con Arduino
245
246         except serial.SerialException:
247             print("No hay conexión con Arduino.") # Mostrar
mensaje si no se puede conectar con Arduino
248
249
250     root = tk.Tk()
251     root.title("Sistema de Seguimiento")
252
253     # Crear etiquetas y entradas para los valores
254     label_hs = tk.Label(root, text="Hs:")
255     label_hs.grid(row=0, column=0)
256     entry_hs = tk.Entry(root)
257     entry_hs.grid(row=0, column=1)
258
259     label_ms = tk.Label(root, text="Ms:")
260     label_ms.grid(row=0, column=2)
261     entry_ms = tk.Entry(root)
262     entry_ms.grid(row=0, column=3)
263
264     label_ss = tk.Label(root, text="Ss:")
265     label_ss.grid(row=0, column=4)
266     entry_ss = tk.Entry(root)
267     entry_ss.grid(row=0, column=5)
268
269     label_hp = tk.Label(root, text="Hp:")
270     label_hp.grid(row=1, column=0)
271     entry_hp = tk.Entry(root)
272     entry_hp.grid(row=1, column=1)
273
274     label_mp = tk.Label(root, text="Mp:")
275     label_mp.grid(row=1, column=2)
276     entry_mp = tk.Entry(root)
277     entry_mp.grid(row=1, column=3)
278
279     label_sp = tk.Label(root, text="Sp:")
280     label_sp.grid(row=1, column=4)
281     entry_sp = tk.Entry(root)
282     entry_sp.grid(row=1, column=5)
283

```

```

284     label_hti = tk.Label(root, text="Hi:")
285     label_hti.grid(row=2, column=0)
286     entry_hti = tk.Entry(root)
287     entry_hti.grid(row=2, column=1)
288
289     label_mti = tk.Label(root, text="Mi:")
290     label_mti.grid(row=2, column=2)
291     entry_mti = tk.Entry(root)
292     entry_mti.grid(row=2, column=3)
293
294     label_sti = tk.Label(root, text="Si:")
295     label_sti.grid(row=2, column=4)
296     entry_sti = tk.Entry(root)
297     entry_sti.grid(row=2, column=5)
298
299     label_htf = tk.Label(root, text="Hf:")
300     label_htf.grid(row=3, column=0)
301     entry_htf = tk.Entry(root)
302     entry_htf.grid(row=3, column=1)
303
304     label_mtf = tk.Label(root, text="Mf:")
305     label_mtf.grid(row=3, column=2)
306     entry_mtf = tk.Entry(root)
307     entry_mtf.grid(row=3, column=3)
308
309     label_stf = tk.Label(root, text="Sf:")
310     label_stf.grid(row=3, column=4)
311     entry_stf = tk.Entry(root)
312     entry_stf.grid(row=3, column=5)
313
314     # Crear área de texto para mostrar resultados
315     resultado_text = tk.Text(root, height=7, width=60)
316     resultado_text.grid(row=4, column=0, columnspan=6, padx=10,
317                          pady=10)
318
319     # Botón para iniciar el cálculo
320     calcular_button = tk.Button(root, text="Calcular", command=
321                                calcular)
322     calcular_button.grid(row=12, columnspan=6)
323
324     root.mainloop()

```

Gráficas

```
1 import serial
2 import collections
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import matplotlib.animation as animation
5 import csv
6 import time as tm
7 from matplotlib.lines import Line2D
8 from datetime import datetime, time
9 from Interfaz_Comentarios import crear_interfaz_seguimiento,
    leer_valores
10
11 # Crear la interfaz de seguimiento
12 crear_interfaz_seguimiento()
13 # Leer los valores necesarios desde la interfaz
14 hora_trabajo_inicio, minuto_trabajo_inicio,
    segundo_trabajo_inicio, re, cor, tt, tre, trem, ttd, x, dt, v
    = leer_valores()
15 print(re, cor, dt, tt, tre, x, ttd, v, trem)
16
17 # Establecer la hora de inicio para el código
18 hora_inicial = time(hora_trabajo_inicio, minuto_trabajo_inicio,
    segundo_trabajo_inicio)
19
20 def getSerialData(frame, Samples, numData, serialConnection,
    lines, ax1, ax2, data_list):
21     # Obtener los datos actuales del puerto serial y
    actualizarlos en las gráficas
22     current_data = [datetime.now()] # Agregar la hora actual al
    principio de la lista
23     for i in range(numData):
24         value = float(serialConnection.readline().strip())
25         current_data.append(value)
26         data[i].append(value)
27         lines[i].set_data(range(Samples), data[i])
28
29     data_list.append(current_data)
30
31 # Configurar la conexión serial
32 serialPort = 'COM4'
33 baudRate = 9600
34
35 try:
36     serialConnection = serial.Serial(serialPort, baudRate)
37 except:
```

```

38     print('No hay conexión con Arduino.')
39
40 # Esperar hasta que sea la hora deseada para iniciar la
    comunicación con el Arduino
41 while datetime.now().time() < hora_inicial:
42     pass
43
44 # Enviar valores iniciales al Arduino
45 valor_a_enviar = 1
46 valores = ','.join(map(str, [1, cor, dt, tt, tre, x, ttd, v,
    trem]))
47 serialConnection.write(valores.encode()) # Convertir la cadena
    a bytes y enviarla
48 tm.sleep(1)
49
50 # Configuración de parámetros para la animación y las gráficas
51 Samples = int(x)
52 sampleTime = 200
53 numData = 3
54
55 # Configurar los límites de las gráficas
56 xmin = 0
57 xmax = Samples
58 ymin = [0, 0, 0]
59 ymax = [1, 250, 250]
60 lines = []
61 data = []
62 data_list = []
63
64 # Colores y etiquetas para las líneas de las gráficas
65 line_colors = ['green', 'red', 'blue']
66 line_labels = ['Voltaje', 'Temperatura caliente', 'Temperatura
    fría']
67
68 # Inicializar las estructuras de datos para las gráficas
69 for i in range(numData):
70     data.append(collections.deque([0] * Samples, maxlen=Samples)
    )
71     lines.append(Line2D([], [], color=line_colors[i], label=
    line_labels[i]))
72
73 # Crear la figura y los ejes para las gráficas
74 fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(15, 5))
75
76 # Configurar los ejes de la primera gráfica (Voltaje)

```

```

77 ax1.set_xlim(xmin, xmax)
78 ax1.set_ylim(ymin[0], ymax[0])
79 ax1.set_title('Voltaje')
80 ax1.set_xlabel("Muestras")
81 ax1.set_ylabel("Voltios")
82 ax1.add_line(lines[0])
83
84 # Configurar los ejes de la segunda gráfica (Temperaturas)
85 ax2.set_xlim(xmin, xmax)
86 ax2.set_ylim(ymin[1], ymax[2])
87 ax2.set_title('Temperaturas')
88 ax2.set_xlabel("Muestras")
89 ax2.set_ylabel("Temperatura °C")
90 ax2.add_line(lines[1])
91 ax2.add_line(lines[2])
92
93 # Añadir leyendas a las gráficas
94 ax1.legend()
95 ax2.legend()
96
97 # Configurar la animación de las gráficas
98 anim = animation.FuncAnimation(fig, getSerialData, fargs=(
    Samples, numData, serialConnection, lines, ax1, ax2,
    data_list),
99                               interval=sampleTime,
    cache_frame_data=False)
100
101 # Mostrar las gráficas animadas
102 plt.show()
103
104 # Guardar los datos recolectados en un archivo CSV
105 csv_filename = 'Datos recolectados.csv'
106 csv_columns = ['Hora', 'Voltaje', 'Temperatura caliente', '
    Temperatura fría']
107
108 with open(csv_filename, 'w', newline='') as csvfile:
109     csv_writer = csv.writer(csvfile)
110     csv_writer.writerow(csv_columns)
111     csv_writer.writerows(data_list)
112
113 # Guardar las gráficas en un archivo de imagen
114 fig.savefig('grafica_voltaje_temperaturas.png')
115
116 # Cerrar la conexión serial
117 serialConnection.close()

```

```
118 print("Graficas y datos guardados.")
119 exit()
```

A.3. Código para Calibración

```
1 import tkinter as tk
2 import serial
3 import time
4
5 def calcular():
6     hs = int(entry_hs.get())
7     ms = int(entry_ms.get())
8     ss = int(entry_ss.get())
9     hp = int(entry_hp.get())
10    mp = int(entry_mp.get())
11    sp = int(entry_sp.get())
12    hora_trabajo_inicio = int(entry_hti.get())
13    minuto_trabajo_inicio = int(entry_mti.get())
14    segundo_trabajo_inicio = int(entry_sti.get())
15
16    hsr = 11 - float(hs)
17    msr = 59 - float(ms)
18    ssr = 60 - float(ss)
19    horas = float(hsr) + float(hp)
20    minutos = float(msr) + float(mp)
21    segundos = float(ssr) + float(sp)
22
23    contadorms = 0
24    while True:
25        if minutos < 60:
26            break
27        else:
28            minutos = minutos - 60
29            contadorms = contadorms + 1
30    contadorss = 0
31    while True:
32        if segundos < 60:
33            break
34        else:
35            segundos = segundos - 60
36            contadorss = contadorss + 1
```

```

37
38 horas_contadorms = horas + contadorms
39 minutos_contadorss = minutos + contadorss
40
41 contadorhd = 0
42 if minutos_contadorss >= 60:
43     contadorhd = contadorhd + 1
44     minutos_contadorss = minutos_contadorss - 60
45
46 contadormd = 0
47 if segundos >= 60:
48     contadormd = contadormd + 1
49     segundos = segundos - 60
50
51 hrs = horas_contadorms + contadorhd
52 resultado_text.delete("1.0", tk.END)
53 resultado_text.insert(tk.END, 'Duración de recorrido solar:
{} horas {} minutos {} segundos\n'.format(int(hrs), int(
minutos_contadorss + contadormd), int(segundos)))
54
55 mt = minutos_contadorss / 60
56 st = segundos / 3600
57 tiempo_recorrido = hrs + mt + st
58 tm = tiempo_recorrido / 2
59 hss = hs + (ms / 60) + (ss / 3600)
60 hms = hss + tm
61
62 tu = tiempo_recorrido / 180
63 tua = round(tu, 3)
64 hat = hora_trabajo_inicio - hs
65 mat = (minuto_trabajo_inicio - ms) / 60
66 sat = (segundo_trabajo_inicio - ss) / 3600
67 tiempo_recorrido_angulo = hat + mat + sat
68 at = round((tiempo_recorrido_angulo / tu), 1)
69
70 horati = hora_trabajo_inicio + (minuto_trabajo_inicio / 60)
+ (segundo_trabajo_inicio / 3600)
71
72 if horati < hms:
73     pt = 90 - at
74     pti = round(pt, 1)
75     re = 13.0 * pti
76 else:
77     pt = at - 90
78     pti = round(pt, 1)

```

```

79         re = 13.0 * pti
80
81     if at == 90.0:
82         resultado_text.insert(tk.END, 'No hay reubicación
inicial\n')
83     elif at < 90:
84         resultado_text.insert(tk.END, 'Posición solar inicial de
trabajo: {}°\nGrados de reubicación a.m.: {}°\nValor de
arduino: {}'\n'.format(at, pti, re))
85     else:
86         resultado_text.insert(tk.END, 'Posición solar inicial de
trabajo: {}°\nGrados de reubicación p.m.: {}°\nValor de
arduino: {}'\n'.format(at, pti, re))
87
88     tt = round((3.6e6 * tu), 0)
89
90     ttd = tt / 10
91     contadorat = 0
92     while True:
93         if 0 < at < 1:
94             break
95         else:
96             contadorat = contadorat + 1
97             at = at - 1
98     atr = round(at, 1)
99
100    contadoratr = 0
101    atrm = round((1 - atr), 1)
102    while True:
103        if -10 < atrm < 0.1:
104            break
105        else:
106            contadoratr = contadoratr + 1
107            atrm = atrm - 0.1
108
109    td = contadoratr * ttd
110
111    tes = td / 1000
112
113    contadoraj = 0
114    while True:
115        if tes > 60:
116            tes = tes - 60
117            contadoraj = contadoraj + 1
118        else:

```

```

119         break
120
121     tdc = round(tes, 0)
122     resultado_text.insert(tk.END, 'Hora limite de evaluación: {}
    horas {} minutos {} segundos\n'.format(int(
    hora_trabajo_inicio), int(minuto_trabajo_inicio + contadoraj)
    , int(segundo_trabajo_inicio + tdc)))
123
124
125     # Obtener el valor ingresado por el usuario desde la
    entrada de texto
126     valor1 = re
127
128     # Establecer conexión serie con Arduino
129     arduino = serial.Serial('COM4', 9600) # Reemplaza 'COMX'
    con el puerto serie de tu Arduino
130     time.sleep(2) # Esperar un momento para la conexión
131
132     # Enviar el valor ingresado como cadena
133     arduino.write(str(valor1).encode())
134
135     # Cerrar conexión
136     arduino.close()
137
138 def enviar_reajuste():
139     # Obtener el valor ingresado por el usuario desde la entrada
    de texto
140     valor = entry_reu.get()
141
142     # Eliminar el contenido del cuadro de entrada después de
    obtener el valor
143     entry_reu.delete(0, tk.END)
144
145     # Establecer conexión serie con Arduino
146     arduino = serial.Serial('COM4', 9600) # Reemplaza 'COMX'
    con el puerto serie de tu Arduino
147     time.sleep(2) # Esperar un momento para la conexión
148
149     # Enviar el valor ingresado como cadena
150     arduino.write(valor.encode())
151
152     # Cerrar conexión
153     arduino.close()
154
155 root = tk.Tk()

```

```

156 root.title("Calibración")
157
158 label_hs = tk.Label(root, text="Hs:")
159 label_hs.grid(row=0, column=0)
160 entry_hs = tk.Entry(root)
161 entry_hs.grid(row=0, column=1)
162
163 label_ms = tk.Label(root, text="Ms:")
164 label_ms.grid(row=0, column=2)
165 entry_ms = tk.Entry(root)
166 entry_ms.grid(row=0, column=3)
167
168 label_ss = tk.Label(root, text="Ss:")
169 label_ss.grid(row=0, column=4)
170 entry_ss = tk.Entry(root)
171 entry_ss.grid(row=0, column=5)
172
173 label_hp = tk.Label(root, text="Hp:")
174 label_hp.grid(row=1, column=0)
175 entry_hp = tk.Entry(root)
176 entry_hp.grid(row=1, column=1)
177
178 label_mp = tk.Label(root, text="Mp:")
179 label_mp.grid(row=1, column=2)
180 entry_mp = tk.Entry(root)
181 entry_mp.grid(row=1, column=3)
182
183 label_sp = tk.Label(root, text="Sp:")
184 label_sp.grid(row=1, column=4)
185 entry_sp = tk.Entry(root)
186 entry_sp.grid(row=1, column=5)
187
188 label_hti = tk.Label(root, text="Hi:")
189 label_hti.grid(row=2, column=0)
190 entry_hti = tk.Entry(root)
191 entry_hti.grid(row=2, column=1)
192
193 label_mti = tk.Label(root, text="Mi:")
194 label_mti.grid(row=2, column=2)
195 entry_mti = tk.Entry(root)
196 entry_mti.grid(row=2, column=3)
197
198 label_sti = tk.Label(root, text="Si:")
199 label_sti.grid(row=2, column=4)
200 entry_sti = tk.Entry(root)

```

```

201 entry_sti.grid(row=2, column=5)
202
203 label_reu = tk.Label(root, text="Reubicación:")
204 label_reu.grid(row=14, column=1)
205 entry_reu = tk.Entry(root)
206 entry_reu.grid(row=14, column=3)
207
208 resultado_text = tk.Text(root, height=5, width=60)
209 resultado_text.grid(row=4, column=0, columnspan=6, padx=10, pady
    =10)
210
211 calcular_button = tk.Button(root, text="Calcular y enviar",
    command=calcular)
212 calcular_button.grid(row=3, column=3)
213
214 mostrar_button = tk.Button(root, text="Enviar", command=
    enviar_reajuste)
215 mostrar_button.grid(row=14, column=5)
216
217 root.mainloop()

```

B. Apéndice: Códigos Arduino

B.1. Sistema de seguimiento solar

```
1 int dirPin = 6;
2 int stepPin = 7;
3 int steps = 13.0;
4 int retorno = 1;
5 int tiempo = 2000;
6 void setup() {
7     Serial.begin(9600); // Iniciar comunicación serie a
8                           9600 baudios
9     pinMode(dirPin, OUTPUT);
10    pinMode(stepPin, OUTPUT); // Configurar el LED
11                                integrado como salida
12 }
13 void loop() {
14     if (Serial.available() > 0) {
15         String valores = Serial.readStringUntil('\n');
16         float valor1, valor2, valor3, valor4, valor5,
17             valor6;
18
19         char *ptr = strtok(const_cast<char*>(valores.c_str
20             ()), ",");
21
22         valor1 = atof(ptr);
23         ptr = strtok(NULL, ",");
24         valor2 = atof(ptr);
25         ptr = strtok(NULL, ",");
26         valor3 = atof(ptr);
27         ptr = strtok(NULL, ",");
28         valor4 = atof(ptr);
29         ptr = strtok(NULL, ",");
30         valor5 = atof(ptr);
31         ptr = strtok(NULL, ",");
32         valor6 = atof(ptr);
```

```

30
31
32     motorPasoAPasoI(retorno, valor1, valor2);
33     motorPasoAPasoF(retorno, valor3, valor4);
34     motorPasoAPasoF(valor5, steps, valor4);
35     motorPasoAPasoI(retorno, valor6, tiempo);
36 }
37 }
38
39 // Función para encender el LED intermitentemente según
    el número de ciclos
40 void motorPasoAPasoI(float ciclos1, float pasos1,
    float espera1) {
41     int contador1 = 0; // Variable para contabilizar
        los ciclos
42     while (contador1 < ciclos1) {
43         digitalWrite(dirPin, HIGH);
44         for (int i = 0; i < pasos1; i++) {
45             digitalWrite(stepPin, HIGH);
46             delay(10);
47             digitalWrite(stepPin, LOW);
48             delay(10);
49         }
50         contador1++; // Incrementa el contador en cada
            ciclo
51         delay(espera1);
52     }
53 }
54
55 // Función para encender el LED intermitentemente según
    el número de ciclos
56 void motorPasoAPasoF(float ciclos2, float pasos2,
    float espera2) {
57     int contador2 = 0; // Variable para contabilizar
        los ciclos
58     while (contador2 < ciclos2) {
59         digitalWrite(dirPin, LOW);
60         for (int i = 0; i < pasos2; i++) {

```

```

61     digitalWrite(stepPin, HIGH);
62     delay(10);
63     digitalWrite(stepPin, LOW);
64     delay(10);
65 }
66 contador2++; // Incrementa el contador en cada
        ciclo
67 delay(espera2);
68 }
69 }

```

B.2. Medidor de voltaje

```

1 // Declaración de las resistencias para el divisor de
  voltaje
2 float r1 = 1000000; // Resistencia 1 en ohmios
3 float r2 = 100000;  // Resistencia 2 en ohmios
4
5 void setup() {
6     Serial.begin(9600); // Iniciar comunicación serie a
        9600 baudios
7 }
8
9 void loop() {
10    // Leer el valor analógico del pin A0 y convertirlo
        a voltios
11    float v = (analogRead(0) * 5) / 1023.0;
12
13    // Calcular el voltaje de entrada usando el divisor
        de voltaje
14    float resultado = (v / (r2 / (r1 + r2)));
15
16    // Enviar el resultado al puerto serie
17    Serial.println(resultado);
18
19    // Esperar 5 segundos antes de repetir la lectura
20    delay(5000);

```

21 }

B.3. Medidor de temperatura

```
1 // Incluyendo la librería para el sensor de
  temperatura MAX6675
2 #include <max6675.h>
3
4 // Configuración de pines para los sensores de
  temperatura MAX6675
5 int CSKC = 10;
6 int CSKF = 11;
7 int CSC = 9;
8 int CSF = 12;
9 int SOC = 8;
10 int SOF = 13;
11
12 // Inicialización de los objetos termopar
13 MAX6675 termoparC(CSKC, CSC, SOC);
14 MAX6675 termoparF(CSKF, CSF, SOF);
15
16 void setup() {
17   Serial.begin(9600); // Iniciar comunicación serie a
    9600 baudios
18 }
19
20 void loop() {
21   int temperaturaC;
22   int temperaturaF;
23
24   // Leer la temperatura del primer termopar en grados
    Celsius
25   temperaturaC = termoparC.readCelsius();
26   Serial.print(temperaturaC);
27   Serial.println("C");
28
```

```
29 // Leer la temperatura del segundo termopar en
    grados Celsius
30 temperaturaF = termoparF.readCelsius();
31 Serial.print(temperaturaF);
32 Serial.println("C");
33
34 // Esperar 5 segundos antes de repetir la lectura
35 delay(5000);
36 }
```

B.4. Código general

```
1 // Declaración de pines para el control del motor paso
  a paso
2 int dirPin = 6;
3 int stepPin = 7;
4
5 // Configuración de pasos y otras variables para el
  control del motor
6 float steps = 13.0;
7 int pausa = 10;
8 int retorno = 1;
9 int j = 0;
10 int l = 0;
11 int k = 0;
12 int tv = 0;
13 int x = 60;
14 int tiempo = 2000;
15
16 // Variables para los termistores
17 float r1 = 1000000;
18 float r2 = 100000;
19
20 // Incluyendo la librería para el sensor de
  temperatura MAX6675
21 #include <max6675.h>
22
23 // Configuración de pines para los sensores de
  temperatura MAX6675
24 int CSKC = 10;
25 int CSKF = 11;
26 int CSC = 9;
27 int CSF = 12;
28 int SOC = 8;
29 int SOF = 13;
30
31 // Variables voltaje temperatura
32 float v = 0;
```

```

33 float Voltaje1 = 0;
34 int temperatura1 = 0;
35 int temperatura2 = 0;
36
37 // Inicialización de los objetos termopar
38 MAX6675 termopar1(CSKC, CSC, SOC);
39 MAX6675 termopar2(CSKF, CSF, SOF);
40
41 // Variable para almacenar el valor recibido del
    puerto serie
42 int valor_recibido = 0;
43
44 void setup() {
45     Serial.begin(9600); // Inicializar la comunicación
        serial
46     pinMode(dirPin, OUTPUT); // Configurar pin de
        dirección como salida
47     pinMode(stepPin, OUTPUT); // Configurar pin de
        pasos como salida
48 }
49
50 void loop() {
51     if (Serial.available() > 0) {
52         String valores = Serial.readStringUntil('\n');
53         float valor1, valor2, valor3, valor4, valor5,
            valor6, valor7, valor8, valor9;
54
55         // Parsear la cadena recibida por el puerto serie
56         char *ptr = strtok(const_cast<char*>(valores.c_str
            ()), ",");
57
58         valor1 = atof(ptr);
59         ptr = strtok(NULL, ",");
60         valor2 = atof(ptr);
61         ptr = strtok(NULL, ",");
62         valor3 = atof(ptr);
63         ptr = strtok(NULL, ",");
64         valor4 = atof(ptr);

```

```

65 ptr = strtok(NULL, ",");
66 valor5 = atof(ptr);
67 ptr = strtok(NULL, ",");
68 valor6 = atof(ptr);
69 ptr = strtok(NULL, ",");
70 valor7 = atof(ptr);
71 ptr = strtok(NULL, ",");
72 valor8 = atof(ptr);
73 ptr = strtok(NULL, ",");
74 valor9 = atof(ptr);
75
76 if (valor1 >= 1.3) {
77     motorPasoAPasoI(retorno, valor1, pausa); //
        Llamada a función para mover el motor hacia
        adelante
78 }
79 else if (valor1 == 0) {
80     motorPasoAPasoF(retorno, valor2, pausa); //
        Llamada a función para mover el motor hacia
        atrás o hacer algo diferente
81 }
82
83
84 if (valor1 == 1.0) {
85     while (k < valor3) {
86         // Lectura de voltaje y temperatura
87         v = (analogRead(0) * 5.0) / 1023.0;
88         Voltaje1 = (v / (r2 / (r1 + r2)));
89         temperatur1 = termopar1.readCelsius();
90         temperatura2 = termopar2.readCelsius();
91
92         // Envío de valores al puerto serie
93         Serial.println(Voltaje1);
94         Serial.println(temperatur1);
95         Serial.println(temperatura2);
96
97         delay(valor7); // Espera entre lecturas
98         k = k + 1;

```

```

99     }
100    // Esperar el tiempo indicado por valor2
101    motorPasoAPasoF(retorno, valor2, pausa); //
        Llamada a función para mover el motor hacia
        atrás
102
103    while (valor1 == 1.0) {
104        while (l < valor5) {
105            while (x < valor6) {
106                while (tv < valor6) {
107                    // Lectura de voltaje y temperatura
108                    v = (analogRead(0) * 5.0) / 1023.0;
109                    Voltaje1 = (v / (r2 / (r1 + r2)));
110                    temperatur1 = termopar1.readCelsius();
111                    temperatura2 = termopar2.readCelsius();
112
113                    // Envío de valores al puerto serie
114                    Serial.println(Voltaje1);
115                    Serial.println(temperatur1);
116                    Serial.println(temperatura2);
117
118                    delay(valor7); // Espera entre lecturas
119                    tv = tv + 1;
120
121                    if (tv == x) {
122                        digitalWrite(dirPin, LOW);
123                        for (int i = 0; i < steps; i++) {
124                            digitalWrite(stepPin, HIGH);
125                            delay(pausa);
126                            digitalWrite(stepPin, LOW);
127                            delay(pausa);
128                        }
129                        x = x + 60;
130                        l = l + 1;
131                        delay(pausa);
132                        if (l == valor5) {
133                            delay(valor7);
134                            if (valor8 == 1) {

```

```

135         motorPasoAPasoI(retorno, valor9,
136                             pausa); // Llamada a función
137                                     para mover el motor hacia
138                                     adelante
139     }
140 }
141 }
142 }
143 }
144 }
145 }
146 }
147 }
148 }
149
150
151
152
153 // Función para mover el motor paso a paso en la
154 // dirección inicial
155 void motorPasoAPasoI(float ciclos1, float pasos1,
156                     float esperal) {
157     int contador1 = 0;
158     while (contador1 < ciclos1) {
159         digitalWrite(dirPin, HIGH);
160         for (int i = 0; i < pasos1; i++) {
161             digitalWrite(stepPin, HIGH);
162             delay(10);
163             digitalWrite(stepPin, LOW);
164             delay(10);
165         }
166         contador1++;

```

```
165     delay(espera1);
166 }
167 }
168
169 // Función para mover el motor paso a paso en la
    dirección contraria
170 void motorPasoAPasoF(float ciclos2, float pasos2,
    float espera2) {
171     int contador2 = 0;
172     while (contador2 < ciclos2) {
173         digitalWrite(dirPin, LOW);
174         for (int i = 0; i < pasos2; i++) {
175             digitalWrite(stepPin, HIGH);
176             delay(10);
177             digitalWrite(stepPin, LOW);
178             delay(10);
179         }
180         contador2++;
181         delay(espera2);
182     }
183 }
```

B.5. Código para Calibración

```
1 // Declaración de pines para el control del motor paso
  a paso
2 int dirPin = 6;
3 int stepPin = 7;
4
5 // Configuración de la pausa y otras variables para el
  control del motor
6 int pausa = 10;
7 int m = 0;
8 int retorno = 1;
9 int re = 13.0;
10
11 void setup() {
12     Serial.begin(9600); // Iniciar comunicación serie a
        9600 baudios
13     pinMode(dirPin, OUTPUT); // Configurar pin de
        dirección como salida
14     pinMode(stepPin, OUTPUT); // Configurar pin de
        pasos como salida
15 }
16
17 void loop() {
18     if (Serial.available() > 0) { // Si hay datos
        disponibles para leer
19         float valor = Serial.parseInt(); // Leer el valor
        enviado desde Python
20
21         if (valor == 1.0) { // Si se recibe el valor 1
        // Inicia la ejecución del código
22             while (m < retorno) {
23                 digitalWrite(dirPin, LOW); // Establece la
        dirección del motor
24                 for (int i = 0; i < re; i++) {
25                     digitalWrite(stepPin, HIGH);
26                     delay(pausa);
27                     digitalWrite(stepPin, LOW);
28 }
```

```

29         delay(pausa);
30     }
31     m = m + 1;
32     delay(2000); // Espera 2 segundos antes de
                 continuar
33 }
34 } else if (valor == 2.0) { // Si se recibe el
    valor 2
35 // Mueve el motor en la dirección opuesta
36 while (m < retorno) {
37     digitalWrite(dirPin, HIGH); // Cambia la
        dirección del motor
38     for (int i = 0; i < re; i++) {
39         digitalWrite(stepPin, HIGH);
40         delay(pausa);
41         digitalWrite(stepPin, LOW);
42         delay(pausa);
43     }
44     m = m + 1;
45     delay(2000); // Espera 2 segundos antes de
        continuar
46 }
47 } else if (valor > 2.0) { // Si se recibe un
    valor mayor que 2
48 // Mueve el motor en la dirección opuesta con un
        número de pasos definido por 'valor'
49 while (m < retorno) {
50     digitalWrite(dirPin, HIGH); // Cambia la
        dirección del motor
51     for (int i = 0; i < valor; i++) {
52         digitalWrite(stepPin, HIGH);
53         delay(pausa);
54         digitalWrite(stepPin, LOW);
55         delay(pausa);
56     }
57     m = m + 1;
58     delay(2000); // Espera 2 segundos antes de
        continuar

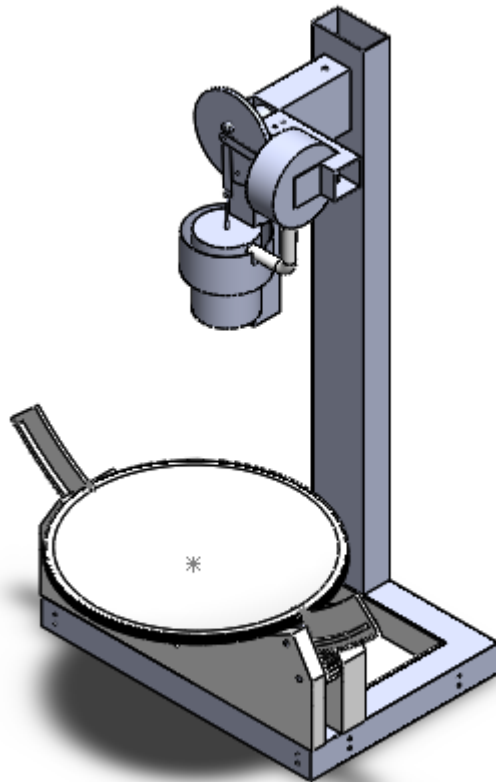
```

```
59|      }  
60|    }  
61|  }  
62|}
```

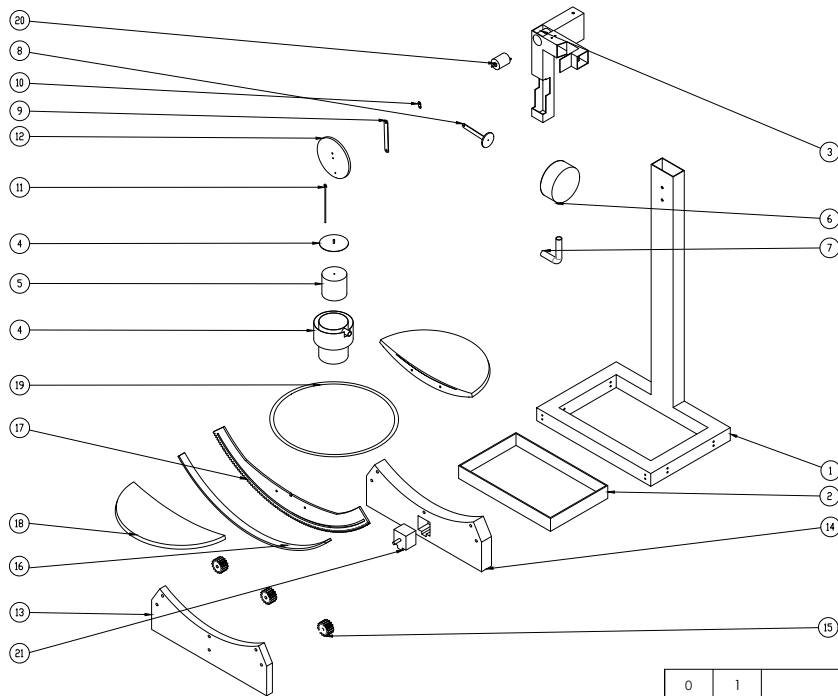


C. Apéndice: Planos del Dispositivo

MOTOR STIRLING IMPULSADO POR FUENTES DE CALOR SOLAR



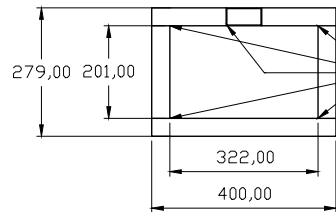
A1



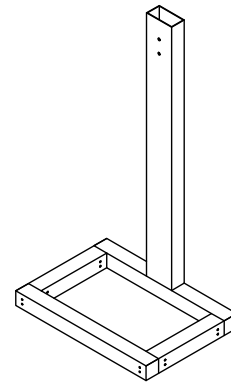
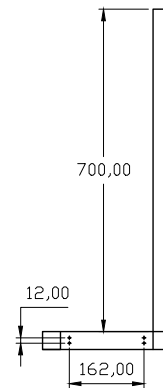
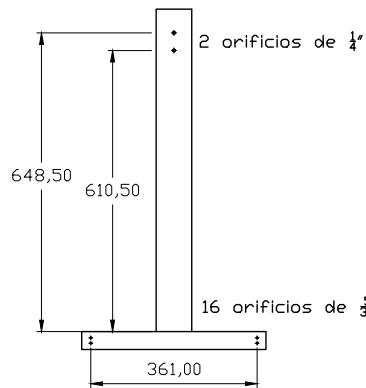
Nº DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	CANTIDAD
1	Base Dispositivo	1
2	Base Circuito	1
3	Base M. Stirling	1
4	Cilindro F. Caliente	1
5	Émbolo F. Caliente	1
6	Cilindro F. Frío	1
7	Conexión Focos	1
8	Biela F. Caliente	1
9	Biela F. Frío	1
10	Cigüeñal	1
11	Guía F. Caliente	1
12	Volante Inercia	1
13	Base sin Motor	1
14	Base con Motor	1
15	Engranaje Motriz	3
16	Guía Cremallera	1
17	Cremallera	1
18	So. Concentrador	2
19	Concentrador	1
20	Dinamo	1
21	Motor Paso-Paso	1

0	1	Dispositivo	N.A	N.A
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.
		DIBUJÓ:	Juan Felipe Insuasti Paz	Dispositivo Explosionado
		REVISÓ:	Luis Portilla - David Mora	
		ESC. 1 : 5	2024.02.21.	Plano Nº: 0/19

A4



Esta sección se compone de 5 piezas unidas por remaches.



Medidas en mm.

1	1	Base	Aluminio	Tubo 1.5" x 1.5" y Tubo 1.5" x 3"
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES



Universidad de Nariño

DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz

REVISÓ: Luis Portilla - David Mora

Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.

Base Dispositivo

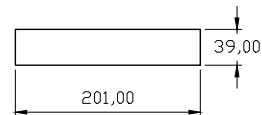
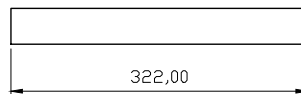
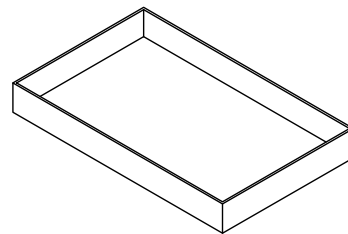
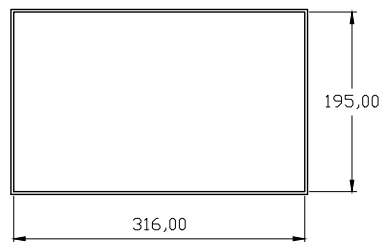


ESC. 1 : 10

2024.02.21.

Plano N°: 1/19

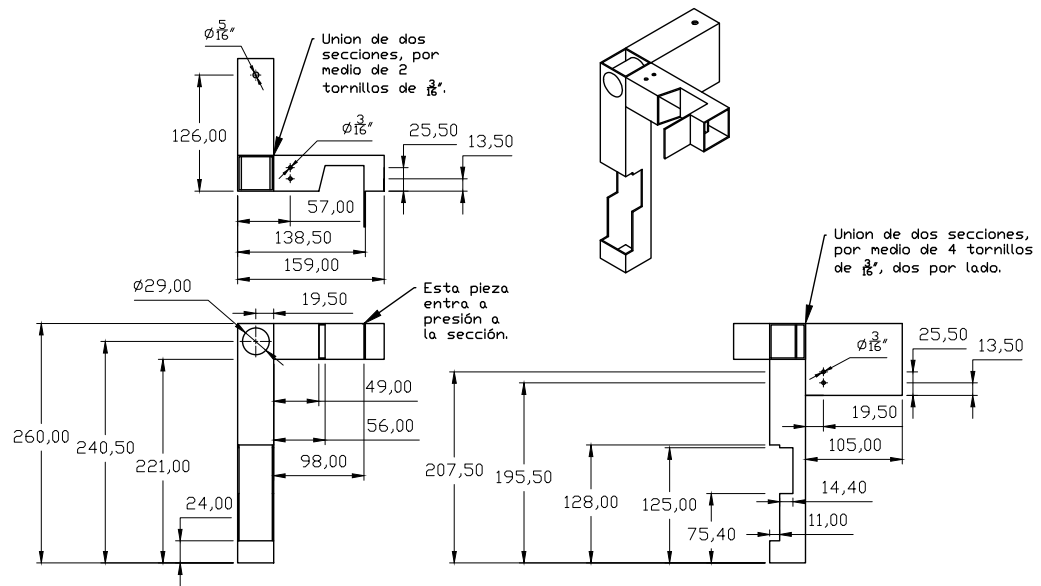
A4



Medidas en mm.

2	1	Base		PLA	Impresión 3D
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
				Base Circuito	
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz			
		REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
		ESC. 1 : 5	2024.02.21.	Plano N°: 2/19	

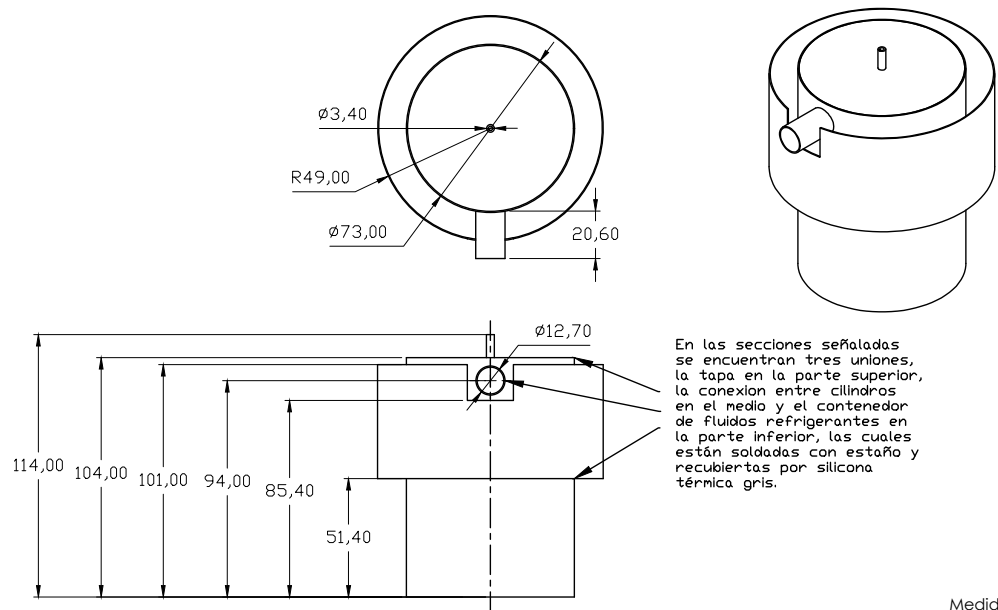
A4



Medidas en mm.

3	1	Base	Aluminio	Tubo 1.5" x 1.5" y Tubo 1.5" x 3"
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Base Motor Stirling	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 5	2024.02.21.	Plano Nº: 3/19	

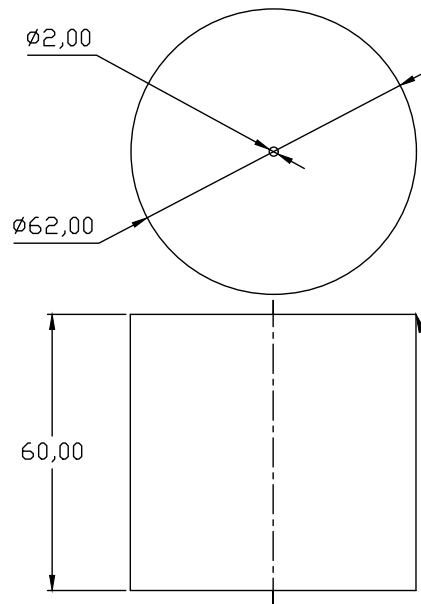
A4



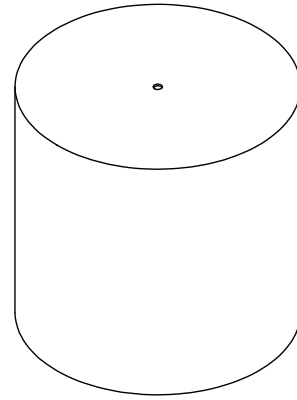
Medidas en mm.

4	1	Cilindro	Acero	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Cilindro Foco Caliente	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 2	2024.02.21.	Plano N°: 4/19	

A4



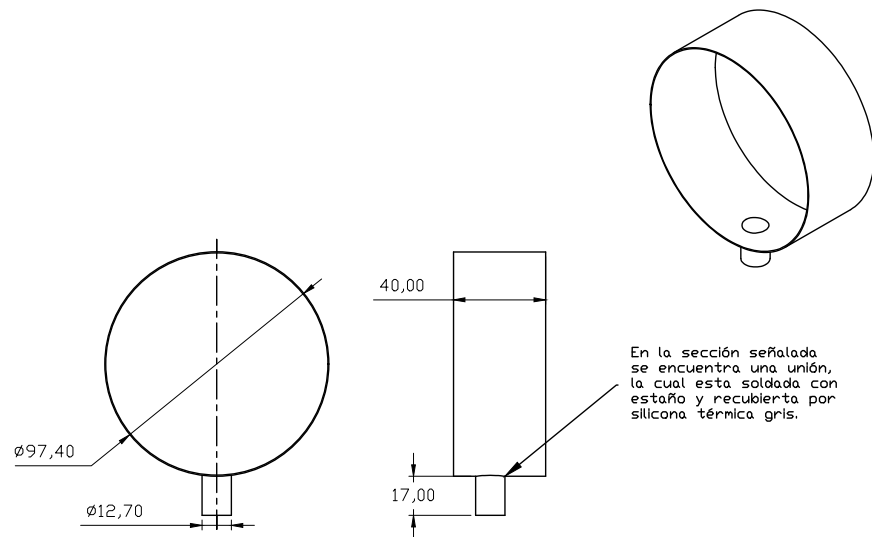
En la sección señalada se encuentra una unión, la cual esta soldada con estaño y recubierta por silicona térmica gris.



Medidas en mm.

5	1	Émbolo		Acero	Es un cilindro hueco.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Émbolo Cilindro Foco Caliente	
REVISÓ: Luis Portilla - David Mora					
		ESC. 1 : 1	2024.02.21.	Plano N°: 5/19	

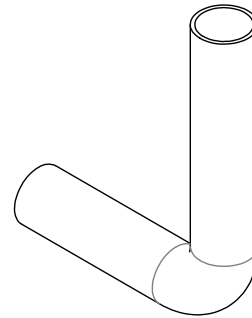
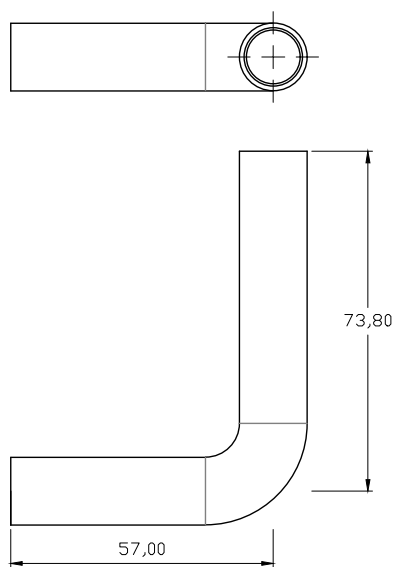
A4



Medidas en mm.

6	1	Cilindro		Acero	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Cilindro Foco Frío	
REVISÓ: Luis Portilla - David Mora					
	ESC. 1 : 2	2024.02.21.	Plano N°: 6/19		

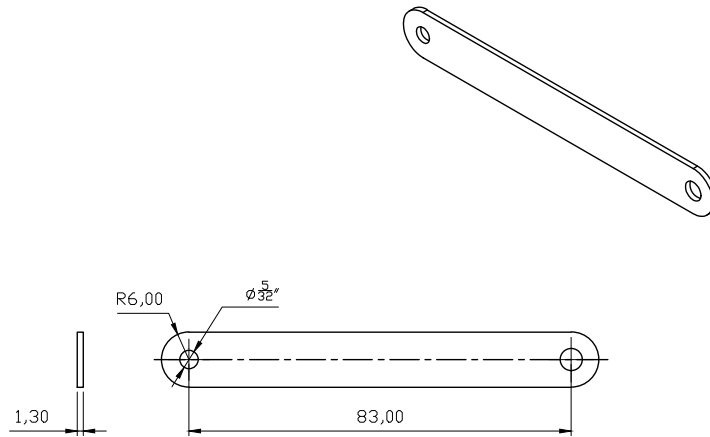
A4



Medidas en mm.

7	1	Conexión		PVC	Manguera de $\frac{1}{2}$ "
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
				Conexión Focos	
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz			
		REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
		ESC. 1 : 1	2024.02.21.	Plano N°: 7/19	

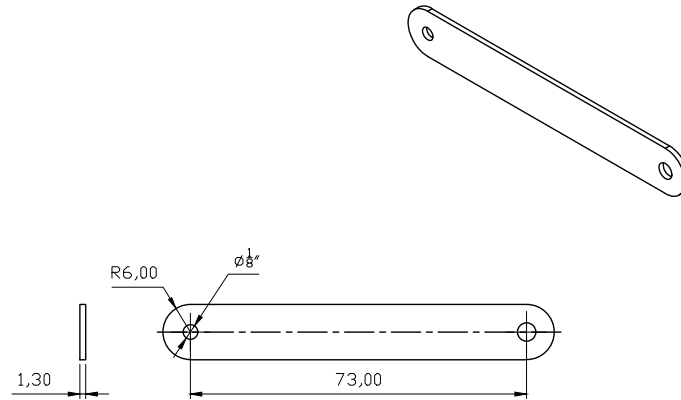
A4



Medidas en mm.

8	1	Biela	Aluminio	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Biela Cilindro Foco Caliente	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 1	2024.02.21.	Plano N°: 8/19	

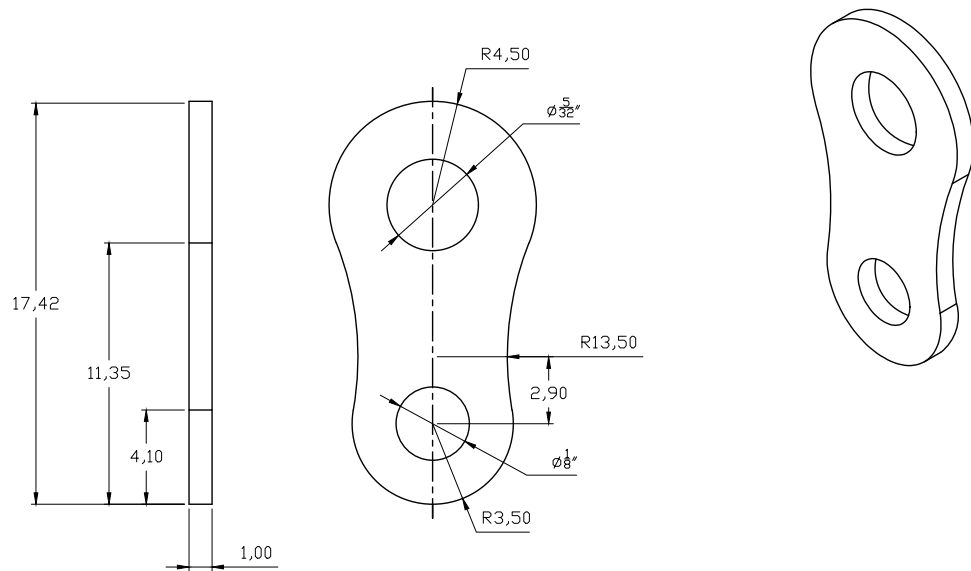
A4



Medidas en mm.

9	1	Biela	Aluminio	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Biela Cilindro Foco Frío
		REVISÓ: Luis Portilla - David Mora		
		ESC. 1 : 1	2024.02.21.	Plano N°: 9/19

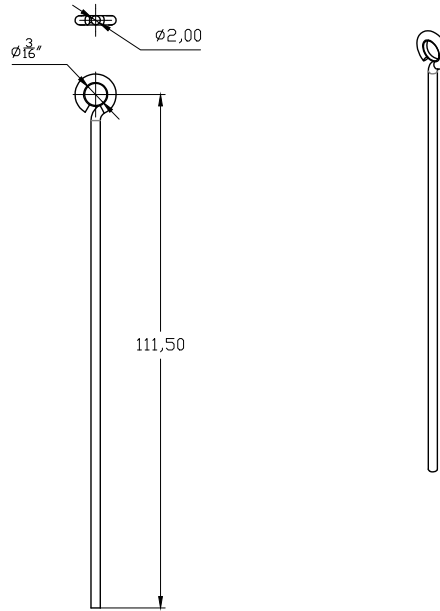
A4



Medidas en mm.

10	1	Cigüeñal		Acero	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño			Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz			Cigüeñal	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora				
	ESC. 5 : 1	2024.02.21.		Plano Nº: 10/19	

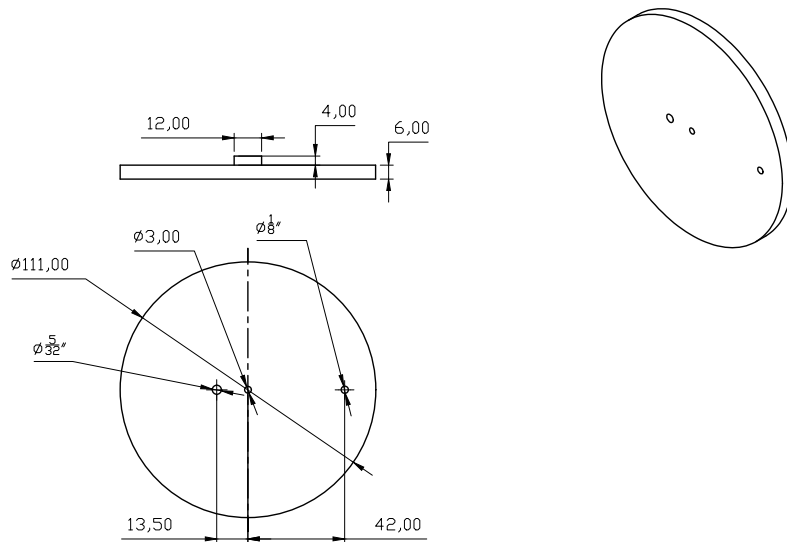
A4



Medidas en mm.

11	1	Guía	Acero Galvanizado	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Guía Cilindro Foco Caliente	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 1	2024.02.21.	Plano Nº: 11/19	

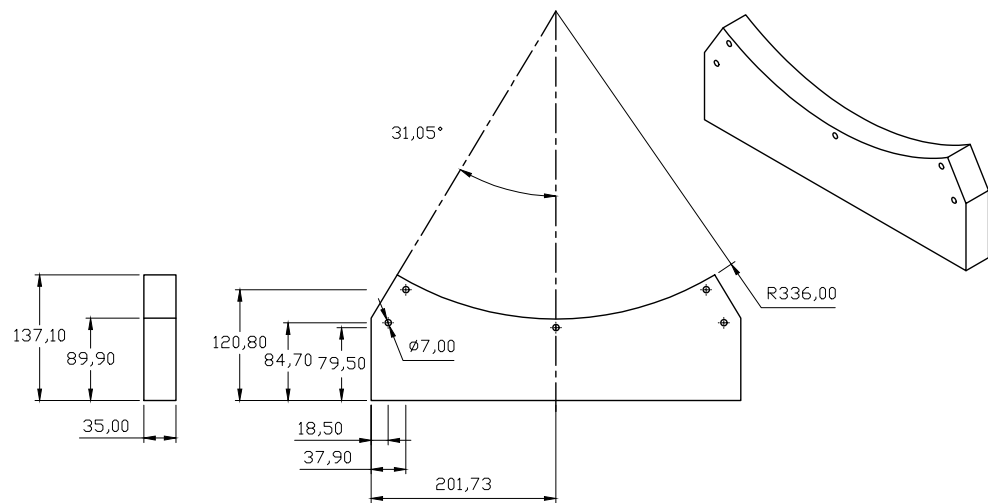
A4



Medidas en mm.

12	1	Volante de Inercia	Acero	N.A.
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ:	Juan Felipe Insuasti Paz	Volante de Inercia Motor Stirling	
	REVISÓ:	Luis Portilla - David Mora		
	ESC. 1 : 2	2024.02.21.	Plano Nº: 12/19	

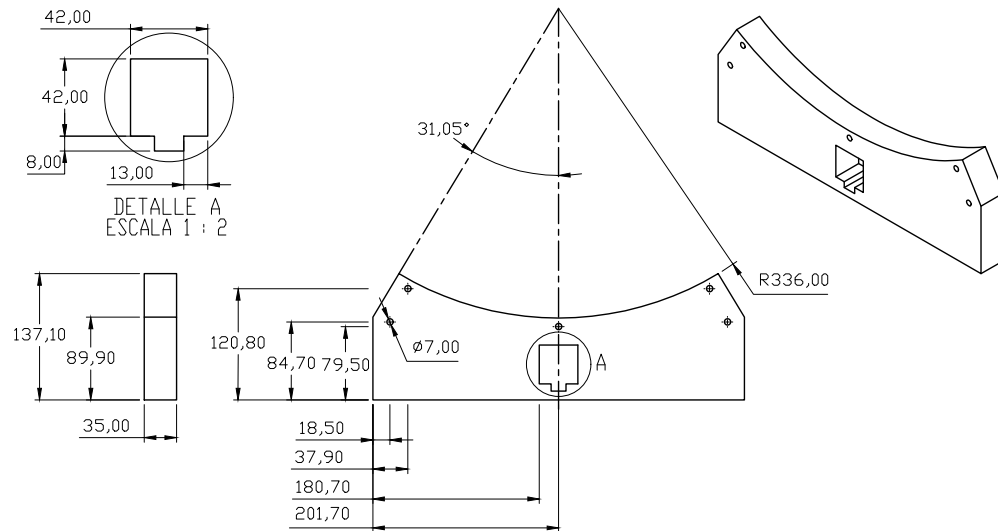
A4



Medidas en mm.

13	1	Base		PLA	Impresión 3D
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño			Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
				Base sin motor paso a paso sistema de seguimiento	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz				
REVISÓ: Luis Portilla - David Mora					
	ESC. 1 : 5	2024.02.21.		Plano N°: 13/19	

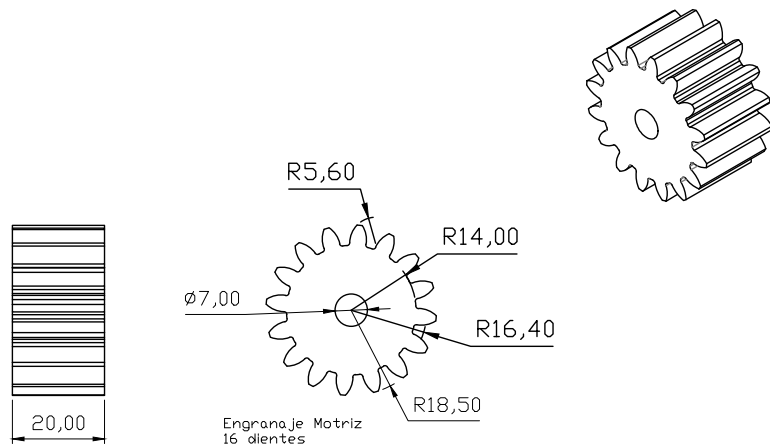
A4



Medidas en mm.

14	1	Base	PLA	Impresión 3D
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Base con motor paso a paso sistema de seguimiento	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 5	2024.02.21.	Plano N°: 14/19	

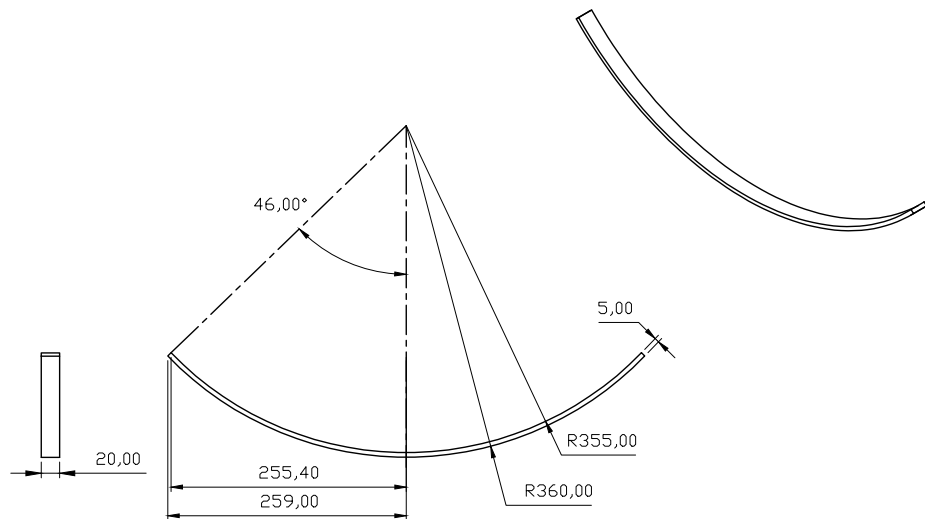
A4



Medidas en mm.

15	3	Engranaje		PLA	Modulo 74/360
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
				Engranaje Motriz	
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz			
		REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
		ESC. 1 : 1	2024.02.21.	Plano N°: 15/19	

A4



Medidas en mm.

16	1	Guía	PLA	Impresión 3D
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Guía Cremallera	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 5	2024.02.21.	Plano Nº: 16/19	

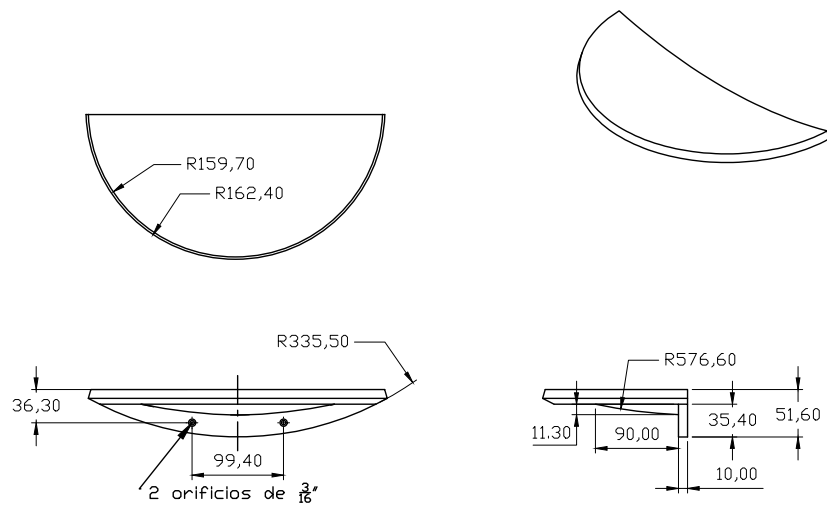
A4



Medidas en mm.

17	1	Cremallera	PLA	Modulo 74/360
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz		Cremallera Sistema de seguimiento	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 5	2024.02.21.	Plano N°: 17/19	

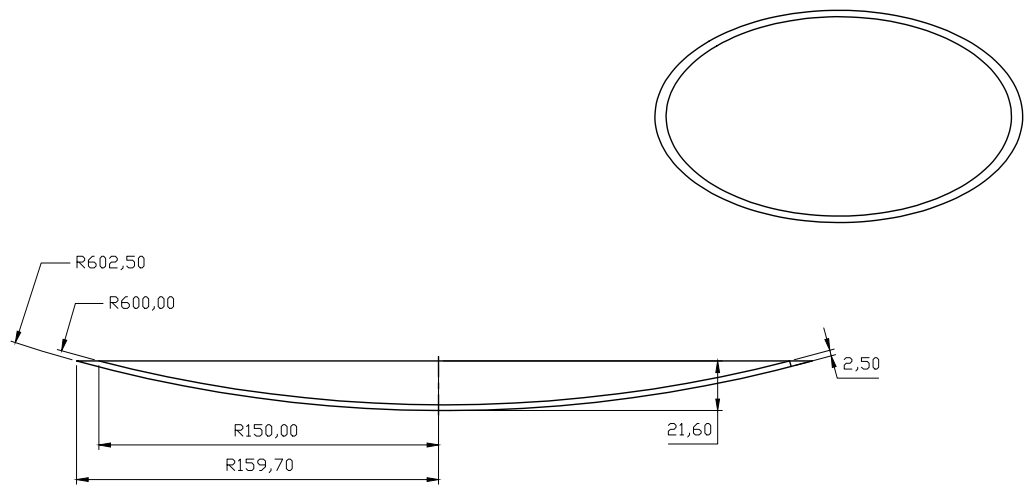
A4



Medidas en mm.

18	2	Soporte		PLA	Impresión 3D
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
	Universidad de Nariño			Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
	DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz			Soporte Concentrador	
	REVISÓ: Luis Portilla - David Mora				
	ESC. 1 : 5		2024.02.21.	Plano Nº: 18/19	

A4



Medidas en mm.

19	1	Concentrador		PLA	Impresión 3D
Nº de Pieza	Nº de Piezas	NOMBRE DEL ELEMENTO		MATERIAL	OBSERVACIONES
		Universidad de Nariño		Motor Stirling impulsado por fuentes de calor solar.	
				Espejo cóncavo esférico	
		DIBUJÓ: Juan Felipe Insuasti Paz			
		REVISÓ: Luis Portilla - David Mora			
	ESC. 1 : 2		2024.02.21.		Plano N°: 19/19

Referencias

- [1] Bahrami, M.: Stirling Cycle, 2014. <https://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Notes/Stirling%20Cycle.pdf>.
- [2] Iglesias Forns, Carlos Francisco: Diseño y fabricación de un motor Stirling de bajo diferencial de temperatura para la generación de energía eléctrica, mediante energía solar térmica. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [3] Carpio Oviedo, Elvert Ivan y Percy Raphael Chiclla Quispe: Diseño y construcción de un motor Stirling, con energía solar como fuente de poder. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2018.
- [4] Cifuentes, Miguel Ángel Aria, Erika Viviana Moreno Rodríguez y Maicol Cárdenas Hernández: Prototipo de sistema termosolar para la generación de energía eléctrica a través del motor Stirling. En Memorias de Congresos UTP, páginas 79–86, 2019.
- [5] Valencia, Carlos Andrés Cárdenas y Ramón Pali Casanova: Análisis de la eficiencia de un colector solar de disco con motor Stirling en la ciudad de Armenia, Colombia. Revista Boletín Redipe, 11(3):339–351, 2022.
- [6] Casillas, A.L.: Máquinas: Cálculos de Taller. Máquinas, España, 1980, ISBN 9788440072160.
- [7] Ultimate Electronics Book: Voltage Dividers, 2024. <https://www.ultimteelectronicsbook.com/voltage-dividers>.
- [8] Unicrom: Ley de Ohm y Potencia Eléctrica, 2024. <https://unicrom.com/ley-de-ohm-potencia-electrica/>.
- [9] Edenred: Eficiencia, eficacia y efectividad: diferencias y cálculo. <https://www.edenred.es/blog/eficiencia-eficacia-y-efectividad-diferencias-y-calculo/>, 2018.

- [10] Engineering Toolbox: Atmospheric Pressure vs. Altitude, 2024. https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html.
- [11] Çengel, Yunus A. y Michael A. Boles: Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill Education, New York, NY, 4th edición, 2001, ISBN 978-0072383324.
- [12] Tsonis, Anastasios: An Introduction to Atmospheric Thermodynamics. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd edición, 2001, ISBN 978-0521796767.
- [13] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ET0), 2012. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Clculo%20ET0dic12_tcm30-82979.pdf.
- [14] Concepto.de: ¿Cómo se calcula el mol?, 2024. <https://concepto.de/mol/#:~:text=adems:%20Calor%20especfico-,Cmo%20se%20calcula%20el%20mol?,atmica%20o%20molecular%20de%20X>.
- [15] Universidad del País Vasco: El motor Stirling, 2024. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/calor/stirling/stirling.html>.
- [16] Tipos de motor Stirling, 2016. https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/tipos-de-motor-stirling/.
- [17] Panaroni, Dario Martorelli, Luis y Ana Castro: Determinación de la eficiencia óptica de un colector disco parabólico prototipo, 2021. <https://www.redalyc.org/journal/3291/329170751001/html/>.
- [18] Refracción, 2023. https://es.vecteezy.com/artes-vectorial/593979_refraccion_la_lupa_sirve_al_sol_causando_calor_en_las_hojas_secas.
- [19] Gejo, Javier: Elementos y mecanismos de máquinas industriales, 2010. https://cursodeinstalador.com/uf0620_elementos_y_mecanismos_de_maquinas_industriales/.

- [20] Sensor de Radiación Solar, 2020. <https://nazaries.atlassian.net/wiki/spaces/IOT/pages/4556030/Sensor+Radiaci+n+Solar>.
- [21] Generador De Corriente Continua, 2019. https://www.hsiangneng.com/es/product/micro-dc-motors_HN330.html.
- [22] Thilagar: NEMA 17 Stepper Motor Datasheet, Wiring, Specs & Alternatives, 2022. <https://components.monofindia.com/nema-17-stepper-motor-pinout-diagram/>.
- [23] Mecanismo de escape, el alma del reloj, 2009. <https://frikingenieria.wordpress.com/2009/02/16/mecanismo-de-escape-el-alma-del-reloj/>.
- [24] Horas de salida y puesta de sol de Pasto, Nariño, Colombia, 2023. https://sunrise.maplogs.com/es/pasto_narino_colombia.412386.html.
- [25] DRV8825 Controlador de motor a pasos para Arduino. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/controlador-de-motor-pasos-drv8825-con-arduino/>.
- [26] Termocupla tipo K Con Modulo Max6675, 2020. <https://novatronicec.com/index.php/product/termopar-k-con-modulo-max6675/>.
- [27] Cadascu: Poder calorífico de las sustancias más comunes, 2011. <https://cadascu.wordpress.com/2011/05/25/poder-calorifico-de-las-sustancias-mas-comunes/>.
- [28] Mapa Radiación, 2024. <http://geoalternar.udenar.edu.co:8080/GEOAlternar/faces/Energia.xhtml>.
- [29] Wikipedia contributors: Heat transfer — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2024. https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer, [Online; accessed 28-October-2024].