

Universidad Autónoma de Baja California



Facultad de Ingeniería

“ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR BASADO EN ECUACIONES PARA CONCENTRADORES CILINDRO PARABÓLICO CON EJE NORTE-SUR O ESTE-OESTE”

Tesis para obtener el grado de:

Ingeniería en Mecatrónica

Presenta

José Daniel Gámez Avilez

Director de tesis

Dr. Saúl Islas Pereda

Codirector de tesis

D. Diego Ramón Bonilla García

Mexicali B.C Junio del 2023

1. Dedicatoria

Con el más profundo y sincero amor le dedico esta tesis a mis padres María de Jesús Avilez Valdez y Juan Daniel Gámez Hernández a quienes admiro, respeto y agradezco por darme la vida, comprenderme y apoyarme incondicionalmente en todo momento, en todos mis proyectos y crecimiento personal. A mi hermano Ángel Gabriel Gámez Avilez por ser comprensivo en momentos clave de mi desarrollo académico y ser un gran apoyo en mi vida. A mis amigos y compañeros por demostrarme su confianza y cariño durante mi largo trayecto hacia un nivel académico más.

2. Agradecimientos

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Investigador y director del centro de estudios de las energías renovables (CEENER) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, persona que me permitió trabajar y desarrollarme cerca de su multidisciplinario equipo de trabajo.

Dr. Saul Islas Pereda

Investigador del centro de estudios de las energías renovables (CEENER), apreciable maestro, director de tesis y amigo que me brindó la oportunidad de desarrollarme académicamente en un ambiente de aprendizaje continuo. Por su gran disponibilidad y paciencia durante el desarrollo del proyecto y revisión de tesis.

Dr. Ricardo Zavala López

Investigador del centro de estudios de las energías renovables (CEENER), apreciable maestro y sinodal que se dio a la tarea de revisar exhaustivamente mi trabajo y evaluar con rigor el trabajo expuesto.

Mtro. Juan Ríos Arreola

Por brindarme su tiempo y conocimiento durante mi investigación puesto que me compartió herramientas útiles tanto virtuales como físicas con las cuales puede desarrollar más a fondo el proyecto presentado.

Mtro. Armando Aguilar

Por brindarme su tiempo y conocimiento durante mi investigación ya que fue un pilar fundamental ya que en base a su trabajo yo pude edificar una investigación más profunda con la implementación de un nuevo sistema.

Mtro. Armando Corona

Gracias a él pude aprender nuevas herramientas que fueron de gran ayuda para la parte de mi simulación y obtención de datos experimentales. Por brindarme tiempo en cual me enseñó un poco más sobre temas que no eran de mi área de conocimiento

A mi compañera y amiga Naomi Akane Saguchi Pérez de Alva

Por ser una pieza clave durante todo el tiempo de investigación y trabajo ya que gracias a ella pude ver las cosas desde otra perspectiva mientras mutuamente crecíamos en el aspecto académico y personal.

Universidad Autónoma de Baja California

Por todas las facilidades brindadas en diversos aspectos durante mi formación académica y personal, ya que al trabajar en tantas áreas de la máxima casa de estudios de baja california por medio de actividades de becario pude aprender de una extensa gama de actividades tanto administrativas como académicas.

3. Resumen

Los sistemas de seguimiento solar son una pieza clave en las tecnologías de concentración solar, ya que estos aumentan significativamente la cantidad de producto obtenido según sea el tipo de concentrador, con relación a la energía de entrada del sistema y la energía eléctrica consumida por el mismo. La adaptabilidad de los sistemas de seguimiento solar mantiene un matiz atractivo para los investigadores ya que pueden obtener las mínimas pérdidas de recurso solar y maximizar así su eficiencia manteniendo un rango en el consumo eléctrico. Existen diversos factores que mantienen en el área de mejora a los sistemas de seguimiento, puesto que los sistemas actuales en el mercado llegan a ser realmente costosos y debido a que manejan entradas por imagen y que en lugares con alta radiación estos presentan averías en un lapso de tiempo muy corto. El presente documento de investigación estudia de manera teórica el diseño e implementación de un sistema de seguimiento solar basado en ecuaciones para concentradores cilindro parabólico con eje norte-sur o este-oeste instalado en Mexicali Baja California México con el propósito de maximizar la eficiencia y la temperatura producida por el sistema. Para el estudio se utilizó el software MATLAB realizando modelos que representarán el entorno de trabajo, así mismo como el sistema mecatrónico de seguimiento y absorción térmica utilizando archivos climatológicos de la región.

El desarrollo de un seguidor solar de bajo costo es posible, sin embargo, aún se requieren pruebas de operación que determinen la calidad de operación del sistema ya que este presenta un desfase focal cuando se evalúan intervalos mayores de 5 y 10 minutos por lo que se afirma es posible controlar la temperatura de salida del colector mediante el control de desenfoque por medio del seguidor solar. Para optimizar los sistemas de seguimiento solar es recomendable realizar experimentación con diversos tipos de motores, reducciones mecánicas y cambios en la estructura del colector, además de la creación un sistema de monitoreo del sistema para así obtener datos de este en tiempo real y operar los sistemas interconectados de manera remota, finalizando con realizar cambios en el código donde se haga una retroalimentación para obtener un control de la temperatura de salida mediante los valores obtenidos por los sensores de temperatura.

4. Abstract

Solar tracking systems are a key part of concentrating solar technologies, as they significantly increase the amount of product obtained depending on the type of concentrator, in relation to the input energy of the system and the electrical energy consumed by the system. The adaptability of solar tracking systems maintains an attractive nuance for researchers as they can obtain the minimum solar resource losses and maximize efficiency while maintaining a range in electricity consumption. There are several factors that keep tracking systems in the area of improvement, since the current systems on the market become really expensive and because they handle image inputs and in places with high radiation these present failures in a very short period of time. This research paper studies in a theoretical way the design and implementation of a solar tracking system based on equations for parabolic trough concentrators with north-south or east-west axis installed in Mexicali Baja California Mexico with the purpose of maximizing the efficiency and the temperature produced by the system. For the study, MATLAB software was used to create models representing the working environment, as well as the mechatronic tracking and thermal absorption system using climatological files of the region.

The development of a low-cost solar tracker is possible, however, operation tests are still required to determine the quality of operation of the system since it presents a focal lag when evaluating intervals greater than 5 and 10 minutes so it is possible to control the output temperature of the collector by means of blur control. To optimize the solar tracking systems it is advisable to experiment with different types of engines, mechanical reductions and changes in the structure of the collector, in addition to a monitoring system for the system to obtain data from this in real time and operate the interconnected systems remotely, and concluding by making changes in the code where a feedback is made to obtain a control of the output temperature through the values obtained by the temperature sensors.

5. Contenidos

Dedicatoria	1
Agradecimientos	2
Resumen	4
Abstract	5
Contenidos	6
Lista de Figuras	9
Lista de Tablas	12
Capítulo 1. Introducción	15
1.1 Introducción	15
1.2 Problemática y justificación	16
1.3 Antecedentes	18
1.3.1 Colector cilindro parabólico	18
1.3.2 Seguidor solar	21
1.4 Hipótesis	25
1.5 Objetivo general	25
1.6 Objetivos específicos	25
1.7 Organización de la tesis	26
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	27
2.1 Energía solar	27
2.1.1 Radiación Solar	27
2.1.2 Radiación difusa	27
2.1.3 Radiación directa	28
2.1.4 Albedo	28
2.1.5 Radiación extraterrestre	28
2.2 Recurso solar en México	29
2.2.1 Disponibilidad del recurso solar en México	29
2.3 Calor y sus mecanismos de transferencia	30
2.4 Fluido caloportador	31
2.5 Intercambiadores de calor	34
2.6 Parámetros ópticos	34
2.6.1 Ley de Snell.	34
2.7 Geometría solar	35
2.7.1 Ángulo de declinación solar	37
2.7.2 Ángulo horario solar	38

2.8 Aplicaciones	45
2.8.1 Sistemas de captación solar	45
2.8.2 Sistema de seguimiento solar	46
2.9 Colector cilindro parabólico	46
2.9.1 Componentes del colector cilíndrico parabólico	47
2.9.2 Parámetros geométricos	48
2.10 Microcontroladores	49
2.10.1 Arduino MEGA	49
2.10.2 Arduino NANO	49
2.11 Protocolos de comunicación y almacenamiento de datos	50
2.11.1 Protocolo I2C	50
2.11.2 Protocolo SPI	51
2.12 Sensores	52
2.12.1 Sensores de temperatura	52
2.12.2 Sensor de caudal	53
2.13 Actuadores	53
2.13.1 Actuador lineal	53
2.13.2 Actuador Rotativo	53
Capítulo 3. Metodología	54
3.1 Propuesta del sistema	54
3.1.1 Descripción operativa del sistema	55
3.2 Modelo Matemático	56
3.2.1 Metodología de simulación	57
3.3 Análisis opto geométrico de un CCP	59
3.3.1 Pérdidas coseno	59
3.3.2 Pérdidas por los extremos	60
3.3.3 Pérdidas por desenfoque	61
3.3.4 Análisis térmico	63
Capítulo 4. Discusión de resultados	66
4.1 Equinoccio	72
4.2 Solsticio	74
4.2.1 Verano	74
4.2.2 Invierno	76
4.3 Resultados anuales	77
Capítulo 5. Trabajo de campo	81

5.1 Rehabilitación de sistema	84
5.2 Diseño y desarrollo	88
5.2.1 Esquemático	88
5.2.2 PCB	89
5.2.3 Caracterización de equipo	90
5.2.4 Caracterización de los actuadores	91
5.3 Caracterización del sistema	93
5.3.1 Indicadores y entradas del sistema de seguimiento propuesto.	95
5.4 Montaje e Instalación	96
5.5 Pruebas	97
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	99
6.1 Conclusiones	99
6.2 Recomendaciones y Trabajos futuros	99
Referencias	101
Apéndice	103
Formulario	103
Glosario	104
Código de control	108
Código del simulador	121
Anexos	130

6. Lista de Figuras

Contenido	
Dedicatoria	1
Agradecimientos	2
Resumen	4
Abstract	5
Contenidos	6
Lista de Figuras	9
Lista de Tablas	10
Capítulo 1.	15
1.1	15
1.2	16
1.3	18
1.3.1	18
1.3.2	21
1.4	25
1.5	25
1.6	25
1.7	26
Capítulo 2.	27
2.1	27
2.1.1	27
2.1.2	27
2.1.3	28
2.1.4	28
2.1.5	28
2.2	29
2.2.1	29
2.3	30
2.4	31
2.5	34
2.6	34
2.6.1	34
2.7	35
2.7.1	37

2.7.2	38	
2.8	45	
2.8.1	45	
2.8.2	46	
2.9	46	
2.9.1	47	
2.9.2	48	
2.10	49	
2.10.1	49	
2.10.2	49	
2.11	50	
2.11.1	50	
2.11.2	51	
2.12	52	
2.12.1	52	
2.12.2	53	
2.13	53	
2.13.1	53	
2.13.2	53	
Capítulo 3.		54
3.1	54	
3.1.1	55	
3.2	56	
3.2.1	57	
3.3	59	
3.3.1	59	
3.3.2	60	
3.3.3	61	
3.3.4	63	
Capítulo 4.		66
4.1	73	
4.2	75	
4.2.1	75	
4.2.2	77	
4.3	78	

Capítulo 5.	85
5.1	88
5.2	92
5.2.1	92
5.2.2	93
5.2.3	94
5.2.4	95
5.3	97
5.3.1	99
5.4	100
5.5	101
Capítulo 6.	103
6.1	103
6.2	103
2.	105
3.	107
1.	107
2.	108
3.	112
4.	125
4.	134

7. Lista de Tablas

Tabla 1. Descripción características de los fluidos caloportadores (Krishna et al., 2020).	33
Tabla 2. Descripción características de concentración y temperatura de los colectores de energía solar.	45
Tabla 3. Especificaciones CCP	65
Tabla 4. Promedios anuales de calor y consumo eléctrico	78
Tabla 5. Promedios anuales de temperatura	79
Tabla 6. Descripción de las variables de entrada del sistema de seguimiento.	90
Tabla 7. Descripción de los pines de la entrada del sistema de seguimiento.	90
Tabla 8. Descripción de los pines de la entrada del motor.	91
Tabla 9. Descripción de los componentes del sistema de seguimiento.	93

Nomenclatura

Símbolo	Definición	Unidades
<i>STS(s)</i>	<i>Sistema de seguimiento solar</i>	-
<i>ST</i>	<i>Seguidor solar</i>	-
<i>MPP</i>	<i>Punto de máxima potencia</i>	-
<i>PV</i>	<i>Fotovoltaico</i>	-
<i>MATLAB</i>	<i>Laboratorio de matrices</i>	-
<i>PLC</i>	<i>Controlador lógico programable</i>	-
<i>LDR</i>	<i>Resistencia dependiente de luz</i>	-
<i>PC</i>	<i>Computadora personal</i>	-
<i>DC</i>	<i>Corriente continua</i>	-
<i>AC</i>	<i>Corriente alterna</i>	-
<i>PID</i>	<i>Proporcional integral derivativo</i>	-
<i>PI</i>	<i>Proporcional integral</i>	-
<i>NSR</i>	<i>Radiación solar normal</i>	-
<i>DSR</i>	<i>Radiación solar difusa</i>	-
<i>BTNR</i>	<i>Seguimiento bifacial sin reflector</i>	-
<i>BTPR</i>	<i>Paneles de seguimiento bifaciales y reflector</i>	-
<i>GCR.</i>	<i>Coefficiente de cobertura de tierra</i>	-
<i>PTC</i>	<i>Colector cilindro parabólico</i>	-
<i>HTF</i>	<i>Fluidos de transferencia de calor</i>	-
<i>Rp</i>	<i>Relación de rendimiento</i>	-
<i>F</i>	<i>Factor de corrección</i>	-
<i>Ts</i>	<i>Tiempo Solar</i>	<i>Hrs</i>
<i>Tc</i>	<i>Tiempo Local/ Tiempo Civil</i>	<i>Hrs</i>
<i>Fct</i>	<i>Factor de Corrección de tiempo</i>	-
<i>EoT</i>	<i>Ecuación del tiempo</i>	-
<i>LSTM</i>	<i>Hora Estándar Local del Meridiano</i>	-
<i>Tutc</i>	<i>Diferencia Hora Local y Hora coordinada universal</i>	-
<i>Lat</i>	<i>Latitud</i>	°

<i>Long</i>	<i>Longitud</i>	<i>°</i>
<i>δ</i>	<i>Ángulo de declinación</i>	<i>°</i>
<i>ω</i>	<i>Ángulo de reloj o ángulo horario</i>	<i>minutos</i>
<i>α_s</i>	<i>Ángulo de elevación solar</i>	<i>°</i>
<i>γ_s</i>	<i>Ángulo azimutal solar</i>	<i>°</i>
<i>θ_z</i>	<i>Ángulo cenital o ángulo de inclinación</i>	<i>°</i>
<i>θ</i>	<i>Ángulo de incidencia de la radiación solar</i>	<i>°</i>
<i>β</i>	<i>Ángulo de inclinación</i>	<i>°</i>
<i>R_b</i>	<i>Coefficiente de radiación solar</i>	<i>Wm²</i>
<i>H_d</i>	<i>Radiación solar difusa</i>	<i>Wm²</i>
<i>K_y</i>	<i>Índice de claridad o nubosidad</i>	<i>Wm²</i>
<i>HT</i>	<i>Cantidad de radiación solar</i>	<i>Wm²</i>

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

El uso desmedido de los combustibles fósiles en las últimas décadas ha generado un daño ambiental y a la naturaleza casi irreparable, por lo que la población mundial ha incrementado su preocupación por la preservación del medio ambiente, lo cual inició una carrera por la búsqueda de energías alternativas que ayuden a combatir el daño ocasionado.

La utilización de recursos energéticos poco amigables con el medio ambiente y la velocidad con la que nos reproducimos dificulta nuestra permanencia en este planeta, es por eso que debemos encontrar fuentes energéticas alternativas adecuadas para satisfacer nuestras necesidades y permitir que las próximas generaciones puedan tener un lugar apto donde desarrollarse y coexistir en armonía con la naturaleza.

La evidencia científica internacional señala que, desde 1750, el planeta está experimentando un calentamiento neto y que, durante el presente siglo, continuará calentándose a consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por la acción humana, en particular, la procedente del consumo de petróleo, gas natural y carbón. Este es, sin duda, el problema más grave en el campo ambiental y, según muchas autoridades, la mayor amenaza global para el desarrollo (Rodríguez Becerra et al., 2015).

Como ya es conocido existe un panorama energético muy amplio del cual abordaremos la que es considerada la fuente primaria de las energías renovables, la radiación solar. Esta ha sido una alternativa energética que cada vez cobra mayor relevancia en el mundo, su aprovechamiento ha generado que un número considerable de personas propongan dispositivos, métodos, materiales y sistemas que permita el mejor aprovechamiento del recurso solar (Reyes-Caballero et al., 2016).

En este trabajo de tesis se propone el estudio, diseño e implementación de un sistema de seguimiento solar basado en ecuaciones procesadas con electrónica de bajo costo implementado en colectores cilíndricos parabólicos con configuraciones de seguimiento nortesur o este-oeste y desarrollo un plan de mantenimiento para el propio sistema de colectores cilindro parabólico .

1.2 Problemática y justificación

La humanidad siempre ha enfrentado diversos retos a lo largo de su historia, por ello siempre buscamos como podemos llegar a optimizar todos aquellos recursos de los que dependemos para poder sobrevivir, dada esta razón estamos en una constante búsqueda para optimizar estos recursos necesarios para la realización de actividades esenciales.

Para poder llevar a cabo la mayoría de nuestras actividades dependemos firmemente de alguna fuente de energía, que generalmente proviene de combustibles fósiles, los cuales, por su uso desmedido han provocado un cambio climático, el cual es considerado un factor clave para el calentamiento global que enfrentamos hoy en día.

Por ello en la búsqueda de fuentes de energías alternativas eficientes podemos encontrar variadas opciones, entre todas ellas y que destaca por ser considerada infinita y abundante es la energía solar, esta es una energía limpia y renovable que no emite gases de efecto invernadero y que en México es muy poco aprovechada. La irradiación global media diaria en el territorio nacional es de alrededor de $5.5kWh/m^2$

Estudios realizados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) respecto al potencial de aprovechamiento de la energía solar térmica de concentración ha estimado un potencial medio aprovechable en las zonas norte y noroeste del país de 1,653 MW, mientras que el potencial para calentamiento solar de agua se ubica en más de dos millones de metros cuadrados de calentadores solares de agua al año (Valle Pereña & Ortega Navarro, 2012).

En Mexicali, Baja California las condiciones de temperatura se consideran extremas ya que se puede llegar a alcanzar un valor de 50 grados Celsius con base en datos meteorológicos de la dirección técnica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020). Dicha situación vuelve necesaria el uso de sistemas de aire acondicionado o refrigeración los cuales tienden a generar un gran consumo energético provocando elevadas tarifas eléctricas y contribución al daño ambiental ya que los sistemas de refrigeración convencionales son activados por energía eléctrica en su totalidad y en ocasiones suelen estar sobredimensionados (Magaña Almaguer & Pérez Tello, 2012).

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali, cuenta en su azotea con diversos colectores solares para el aprovechamiento de este recurso. Debido al futuro que tiene el aprovechamiento del recurso solar, creció un gran entusiasmo y se dio paso a la fabricación de una cantidad de proyectos que requieren de seguimiento solar, por ello se requiere el desarrollo de un sistema de seguimiento solar que sea adaptable a estos proyectos. Entre estos colectores podemos encontrar el Colector Cilíndrico Parabólico (CCP) el cual es una tecnología para la captación del recurso solar ya que implementándolo bajo un análisis conciso este puede llegar a generar hasta 200kW (Brooks et al., 2006).

Es por eso que se pone en marcha el presente proyecto como parte del plan de rehabilitación de sistemas de aprovechamiento de recurso solar del Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) ya que basándonos en los estudios sobre la evaluación del uso de energías alternativas (Luna León, 2008) y el uso de energía solar para activación de sistemas (Lara Chávez, 2013) se observó que Baja California cuenta con una gran cantidad de recurso solar y no se está sacando el máximo partido de este.

Dentro del marco de las tecnologías para el uso de las energías renovables podemos encontrar los denominados sistemas de enfriamiento por absorción los cuales pueden ser utilizados para producir enfriamiento. Esta energía captada por los concentradores solares puede llegar a satisfacer la demanda de consumo energético promedio. En el Centro de Estudio de las Energías Renovables (CEENER) se cuenta con campos de colectores solares, entre ellos el tipo cilindro parabólico, el cual es una tecnología que requiere estar en movimiento constantemente para mantener un nivel de eficiencia alto, es por esta razón que el ángulo en el que se encuentra es un factor clave para su funcionamiento y por ello surge la necesidad de un sistema de control para brindar al campo de colectores un seguimiento solar de automática y precisa dados los requerimientos del colector con respecto a los rayos del sol.

Algunas de las ventajas que podemos encontrar en este tipo de sistemas es que se pueden colocar de forma asimétrica en relación a radiación y el área de apertura y un así este producirá energía térmica y esto puede variar especialmente por las dimensiones del mismo.

1.3 Antecedentes

El uso de la energía solar se remonta a hace varios siglos cuando ya se utilizaba esta energía para diferentes fines como lo hizo el imperio romano usando cristales en un invernadero proveyendo así luz solar a las plantas. Sin embargo, con el advenimiento de la revolución industrial surgió la necesidad de tener varias fuentes de energía diferentes de los combustibles que no afectaran el medio ambiente y utilizarlos para diversos fines. En China y la antigua Grecia, la gente usaba rayos de un panel solar construido con espejos o vidrios para hacer fuego, así mismo durante las guerras, esta misma técnica se utilizó para prender fuego a los barcos enemigos. A principios del siglo XX se comenzaron a crear máquinas simples que funcionaban bajo el principio de la concentración del calor solar.

1.3.1 Colector cilindro parabólico

Dentro del marco de la revolución industrial el uso de combustibles fósiles tuvo un incremento exponencial dado que las primeras máquinas a vapor eran utilizadas con este tipo de combustible, pero así como el ser humano avanzó de manera acelerada con este primer golpe tecnológico, al medio ambiente también se le estaba dando un golpe ya que uno de los principales problemas causados por el uso de combustible son la producción de gases de efecto invernadero y sus consecuencias son parte del cambio climático. Además, se producen diversas formas de contaminación en el medio ambiente (aire, agua, subsuelo).

Por hechos como los ocurridos en China y la antigua Grecia fue que comenzaron los estudios para el uso de sistemas alimentados por energía solar. Dentro del marco de los primeros registros sobre los sistemas alimentados con energía solar se encuentran en el año 1878 un acontecimiento en donde el gobierno francés encargó a Mouchot la realización de un proyecto, el cual fue la construcción de una turbina térmica, con el fin de presentarse en la exposición internacional de París (Skouras, 2018).

En la **Figura 1** se muestran los paneles utilizados por Mouchot y cómo es que están colocados de tal forma que crean un gran receptor parabólico cubierto de espejos que concentran la radiación del sol en un punto y es así que el calor regenerativo impulsa una máquina de vapor.

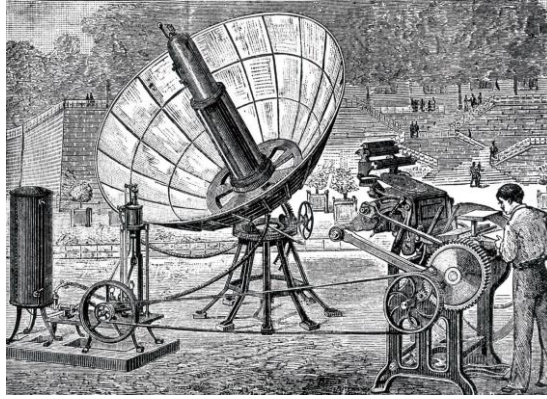


Figura 1. Turbina de Mouchot alimentada por energía solar.

No fue hasta en 1907, en donde se presentaba el primer diseño sobre colectores parabólicos patentados en Alemania por el Dr. Wilhelm Maier y Adolf Remhardt (Günther et al., 2011). Algunas de las muestras de las patentes emitidas por Maier y Remshard se presentan en la **Figura 2**.

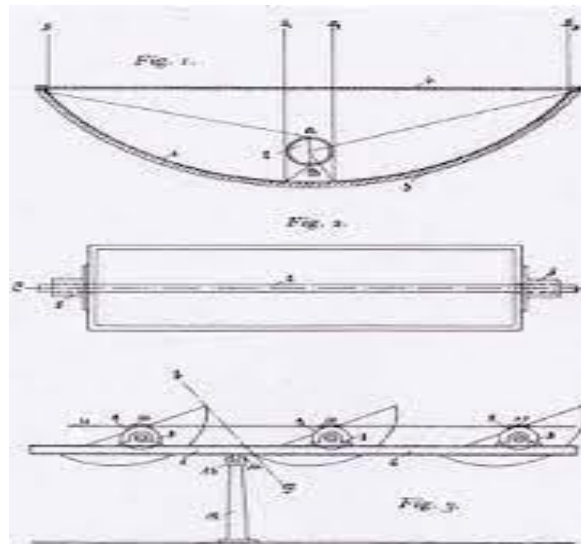


Figura 2. Primera patente de colector solar parabólico.

Consecuentemente este hecho hizo que más adelante, Frank Shuman desarrollara la primera estación termo solar de bombeo en Meadi, Egipto en 1913 (Guillermo & Escobar, 2007), el norteamericano construyó esta estación mediante 5 grandes colectores solares con reflector parabólico de 62 metros de largo cada uno mostrado en la **Figura 3**. Cada reflector enfocaba la luz del sol en la misma dirección del tubo receptor y calentó el agua que se depositaba en ellos. El vapor generado alimentaba el motor conectado a la bomba de este sistema, el cual regulaba 6000 galones de agua por minuto extraídos del Nilo hacia un lugar cercano del mismo.

Tiempo después, en el año 1984, se registra la primera construcción de una instalación nombrada SEGS-1 en California (**Figura 4**). Este tipo de sistemas funcionan con un conjunto de colectores cilindro parabólicos. Un SEGS consiste en un campo a manera de una matriz solar en donde se colocaron paralelamente colectores cilindros parabólicos conectados en serie para convertir la energía solar en energía térmica de modo que permita calentar el aceite que circula a través de los tubos de absorción. El aceite a alta temperatura es enviado a un intercambiador de calor donde se produce vapor necesario para impulsar un generador de turbina con el cual se puede producir electricidad (Martín Rodríguez Madrid & Muñoz Antón, 2016).

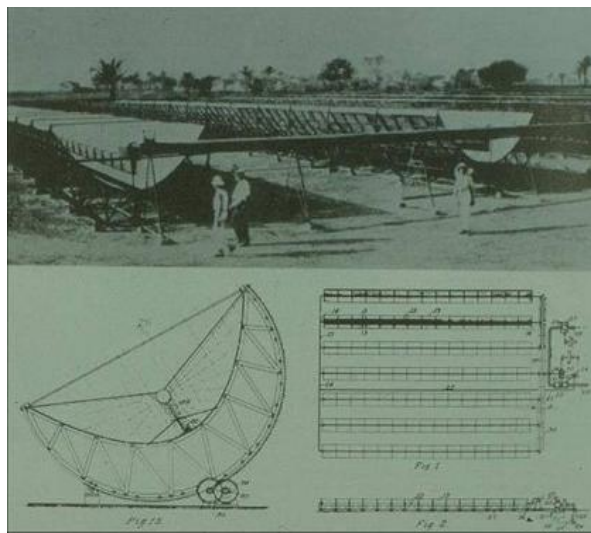


Figura 3. Primera estación solar de canal parabólico.



Figura 4. Planta SEGS-1 en California.

1.3.2 Seguidor solar

El seguidor solar es un dispositivo que orienta una carga útil hacia el sol, el uso de estos sistemas puede aumentar la producción de electricidad en torno a un 30%, y algunos afirman que hasta un 40% en algunas regiones, en comparación con los módulos situados en un ángulo fijo. El sistema ajusta los módulos continuamente al ángulo óptimo a medida que el sol atraviesa el cielo. Una mayor eficiencia significa un mayor rendimiento, el uso de seguidores puede marcar la diferencia en los ingresos de una planta de generación (Banerjee, 2014).

1.3.2.1 Seguidor solar pasivo

Los sistemas pasivos de seguimiento solar pueden apuntar el receptor en la dirección del sol, este sensor debe ajustar según la dirección de la radiación sin actuadores mecánicos. La mayoría de estas unidades de control consisten en un par de actuadores los cuales pueden ser de gas expansivo o célula con memoria de forma. En lo que a este sistema se refiere, se basa en el concepto de dilatación térmica, que es la diferencia de presión entre dos puntos situados en los extremos del seguidor (Sarla et al., 2022).

El primer seguidor solar pasivo fue un sistema mecánico inventado por Curt Finster Hochne en 1962, diseñando un sistema mecánico para un helióstato, realizó una mejora significativa en el rendimiento gracias a años de pruebas e investigación. A raíz de esto se crean diferentes técnicas y aplicaciones de monitoreo (Mpodì et al., 2019).

Dentro de los primeros seguidores solares pasivos se encuentran el sistema comercial introducido por Zomeworks en 1969 en donde el montaje por medio de rieles les permitía el seguimiento a módulos fotovoltaicos, un sistema el cual aumentó de manera considerable la producción de energía eléctrica en un 25% en comparación con un sistema fotovoltaico fijo (Hafez et al., 2018).

Zomeworks Corporation fue considerado un líder en la generación de energía solar por medio de sistemas de seguimiento de manera pasiva desde 1969, se menciona que se han creado más de 17,000 sistemas de seguimiento desde 1980 hasta la actualidad. Estos sistemas están instalados en diferentes zonas climáticas en casi todos los continentes del mundo.

1.3.2.2 Seguidor solar activo

Consecuentemente en 1975 McFee logró introducir uno de los primeros sistemas automáticos de seguimiento solar desarrollado bajo un algoritmo que calculaba la potencia total recibida y la distribución de densidad del flujo magnético. Dicho sistema fotovoltaico del tipo receptor central (**Figura 5**) dividía un espejo en 484 elementos y agregaba sensores a su construcción, gracias a esto, se pudo determinar que la tolerancia de la posición del seguidor con respecto a la del sol tenía un error desde 0.5° a 1° (Hafez et al., 2018).



Figura 5. Seguidor solar de foco fijo.

En 1980, se tuvo el primer acontecimiento de gran importancia denominado “industrialización de los seguidores solares”, esto debido a que gracias al trabajo realizado por Mark E. Dorian y David H. Nelson, dieron pie con sus diseños sobre arreglos de seguidores solares automáticos los cuales fueron capaces de dirigir los colectores hacia la posición del sol a lo largo del día mediante la implementación de un mecanismo eléctrico de control el cual funcionaba bajo la premisa de que se detectaba cuando el colector no estaba alineado respecto a la posición del sol.

Años después Senmma e Imamura, lograron desarrollar un seguidor solar utilizando un microprocesador simple como se muestra en la **Figura 6** para realizar ajustes adaptativos en la orientación y posición del concentrador solar en todo momento, además de desarrollar una teoría matemática de la distribución del error del seguimiento solar, mejorando así los algoritmos para detectar la posición del sol (Rhif, 2012).

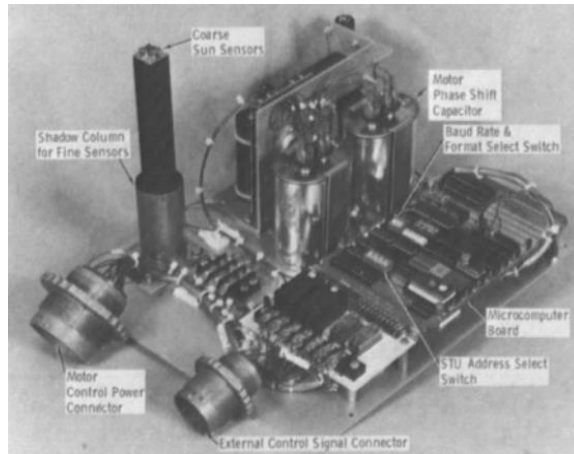


Figura 6. Prototipo de Senmma e Imamura sin cubierta.

En 1983, Jaime Maldonado del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica Federico Santa María, continuó con el trabajo realizado por Finster y Saavedra, logrando así la creación de un diseño y construcción de un sistema de control automático para el posicionamiento de un pirheliómetro con un programa que funcionaba mediante la lectura de un servo que calculaba el posicionamiento del sistema en días con clima despejado y nublado.

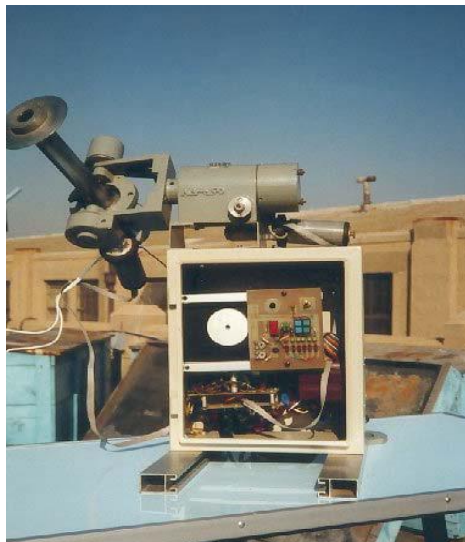


Figura 7. Prototipo Seguidor solar sin cubierta

Posteriormente, V. Badescu en 1985 nos menciona las técnicas de seguimiento y como es que estas han avanzado. La **Figura 7** muestra cómo es que su tecnología implementa sistemas electrónicos y mecánicos logrando el seguimiento solar, además de que su trabajo no difiere tanto de las tecnologías de seguimiento solar que actualmente se encuentran en los mercados. La obra de Badescu menciona con detalle cada uno de estos parámetros (Shufat et al., 2019).

Dentro de las clasificaciones de los seguidores solares podemos encontrar la llamada *sistema de bucle cerrado*, los cuales trabajan bajo el principio de control de retroalimentación. En 1986, Akhmedyarov et al. aumentaron por primera vez la potencia de salida de una estación solar fotovoltaico en Kazajistán de 357 W a 500 W integrando la estación con un sistema de seguimiento solar automático.

Después de 4 años, Maish desarrolló un sistema de control llamado SolarTrack para proporcionar funciones de seguimiento solar, almacenamiento nocturno y de emergencia, comunicación y control de accionamiento manual para seguidores solares de uno y dos ejes en un paquete de bajo costo y fácil de usar (Lee et al., 2009).

El algoritmo de control utilizó una rutina de auto alineación y motor autoajutable para mejorar tanto la precisión de apuntamiento como la fiabilidad del sistema. Los resultados experimentales mostraron que el sistema de control permitía alcanzar una precisión de apuntamiento durante todo el día superior a $\pm 0,1^\circ$ (Agarwal & Building, 1992).

Brown y Stone en el año 1993 desarrollaron un sistema de seguimiento para concentradores solares en el que se aplicó una red neuronal a un modelo para compensar los errores de seguimiento. Los datos de las pruebas mostraron que el sistema resultante era capaz de reducir el error de seguimiento a un valor inferior a $0,01^\circ$. Kalogirou presentó un sistema de seguimiento solar de un eje utilizando tres resistencias dependientes de la luz (LDR). La primera LDR detectaba el estado de enfoque del colector, mientras que la segunda y tercera LDR estaban diseñadas para establecer la presencia (o ausencia) de nubosidad y para discriminar entre día y noche, respectivamente. Las señales de salida de las tres LDR se enviaban a un sistema de control electrónico que accionaba un motor de corriente continua de 12 V de baja velocidad para hacer girar el colector de forma que permaneciera orientado hacia el sol (Ya'u Muhammad et al., 2017).

En 1997, Stone y Sutherland presentaron un sistema de medición de seguimiento múltiple que incluía más de 100 helióstatos para seguir la posición del sol cada hora desde primera hora de la mañana hasta última hora de la tarde. Hua y Shen en el año 1998 compararon las eficiencias de seguimiento solar de varios algoritmos MPPT e implementaron un método de control simple que combinaba un esquema de control de tiempo discreto y un controlador proporcional-integral (PI) para seguir los puntos de máxima potencia (MPP) de un conjunto solar (Lee et al., 2009).

Dentro de los trabajos más recientes y de alta relevancia podemos encontrar a Rustemli et al. quienes desarrollaron la idea de los seguidores solares usando microprocesadores en 2010. Esta nueva generación de tecnología solar se basa en controles ópticos que toman como base los estudios que realizó Lazaroiu (Ya'u Muhammad et al., 2017) Después de esto, se publicaron muchos estudios sobre rentabilidad y optimización, donde encontraron que los seguidores solares eran viables si sus materiales estaban adecuadamente optimizados.

1.4 Hipótesis

Es posible optimizar la eficiencia del sistema de colectores cilindro parabólicos mediante el diseño de un sistema de seguimiento solar reduciendo el consumo de los motores y minimizando las pérdidas opto geométricas del concentrador.

1.5 Objetivo general

Investigar, diseñar y desarrollar un simulador numérico y sistema de seguimiento solar norte-sur y este-oeste basado en ecuaciones para analizar sus parámetros térmicos y ópticos con el fin comparar la eficiencia del sistema en un colector cilindro parabólico.

1.6 Objetivos específicos

1. Realizar una investigación sobre el recurso solar, así como su uso y aplicaciones.
2. Investigar los tipos de colectores solares que existen, así como sus características.
3. Diseñar un simulador del sistema de seguimiento solar.
4. Desarrollar un sistema de seguimiento solar basado en ecuaciones, Implementarlo y Realizar una evaluación de operación del sistema.
5. Realizar un estudio teórico por medio del simulador.
6. Realizar estudio experimental del sistema de seguimiento Solar.
7. Contrastar y documentar los datos obtenidos.

1.7 Organización de la tesis

El presente documento se presentará un análisis comparativo de datos obtenidos mediante el simulador desarrollado por medio de ecuaciones y los datos obtenidos experimentalmente del sistema de seguimiento solar instalado en el colector cilindro parabólico.

La organización de la información que se presenta a continuación está descrita de la siguiente manera a partir del capítulo 2.

Capítulo 2. Se mencionan todos aquellos fundamentos teóricos que ayudarán en el análisis termodinámico de la energía solar, su geometría, leyes ópticas entre otros parámetros que intervienen en el funcionamiento de un Colector Cilindro Parabólico. Así como los elementos matemáticos y electrónicos requeridos en el desarrollo de un seguidor solar.

Capítulo 3. Se presenta el proceso que se siguió para el diseño del simulador numérico además del diseño y desarrollo del seguimiento solar con el cual se obtendrán datos para el posterior análisis comparativo.

Capítulo 4. Se presentan los datos que se obtuvieron teóricamente mediante el uso del simulador numérico y los datos experimentales recopilados del sistema de seguimiento solar instalado en el colector cilindro parabólico para realizar el estudio comparativo del sistema propuesto bajo diferentes condiciones.

Capítulo 5. Se presenta el diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo inteligente para captadores solares mediante el uso de microcontroladores.

Capítulo 6. Se presentan las conclusiones del trabajo realizado mediante la simulación numérica del seguimiento solar y la implementación del sistema al colector, Además se presentan los trabajos futuros que derivan de esta tesis además de comentar ciertas observaciones realizados en el estudio a manera de recomendación.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

2.1 Energía solar

El sol es considerado como una fuente de energía natural, libre e inagotable el cual se compone en su masa establece 71% de Hidrógeno, 27% Helio, y un 2% de otros elementos más pesados. Este astro es una esfera de gases intensos el cual tiene un diámetro aproximado de 1.39×10^9 m. Este es considerado como el “astro rey” el cual cuenta una temperatura cercana a los 5762 K (Juan Carlos Casas Raygoza, 2021).

En base a estudios realizados se pudo conocer que existe un valor de radiación emitida, la constante solar, la cual alcanza un valor promedio de 1367.7 W/m^2 . Este valor cambia según la ubicación geográfica de la tierra y adquiere un valor menor debido a diversos factores. En teoría esta fuente de energía tiene la capacidad para satisfacer la demanda de energía mundial mientras se cuente con los sistemas de captación solar correspondientes (Juaristi & Vitoria-Gasteiz, 1996).

2.1.1 Radiación Solar

La irradiación hace referencia a aquella cantidad de energía solar que es recibida durante un determinado periodo de tiempo. Este término tiene como unidad de medida watts por metro cuadrado (W/m^2).

La irradiación puede descomponerse en tres factores principales los cuales tienen un comportamiento distinto propio, estas componentes son la radiación directa, difusa y reflejada

2.1.2 Radiación difusa

La radiación difusa es la radiación que proviene de la atmósfera, esta se produce al dispersar parte de la radiación solar. En los días más soleados sin nubes, este tipo de radiación puede representar alrededor del 15% total, pero en los días nublados cuando se reduce la cantidad de radiación directa, este tipo de radiación aumenta dramáticamente.

2.1.3 Radiación directa

La luz solar que incide directamente sobre la superficie terrestre se denomina radiación directa, a diferencia de la radiación difusa, la luz cae al suelo sin obstrucciones como las nubes. Por lo tanto, la radiación directa puede definirse como la radiación que golpea un objeto a través del camino más corto. En sistemas de captación solar se absorbe gran parte de esta energía y la convierte en energía eléctrica o solar térmica. Sin embargo, la mayor parte se refleja y dispersa como radiación difusa.

2.1.4 Albedo

El albedo se puede definir como aquella fracción de energía solar que el suelo terrestre regresa al espacio estelar sin ser utilizada, este término fue introducido por Lambert en 1760 en el campo de la Fotometría (Pelkowski, 2007). También se le conoce como propiedad de un objeto que refleja la radiación incidente, cuanto más brillante es la superficie de un objeto, mayor es su capacidad para reflejar la luz incidente.

2.1.5 Radiación extraterrestre

La **Figura 8** muestra la radiación solar extraterrestre la cual es la radiación solar diaria recibida en la superficie horizontal ubicada en el límite superior de la atmósfera. El valor se determina a partir del valor de la constante solar. Para calcular la irradiancia solar más allá de la Tierra, la constante solar debe corregirse considerando que la distancia Sol a la Tierra, esta distancia varía a lo largo del año (Heriberto Ruelas Puente & Isaías Rosas Almeida, 2010).

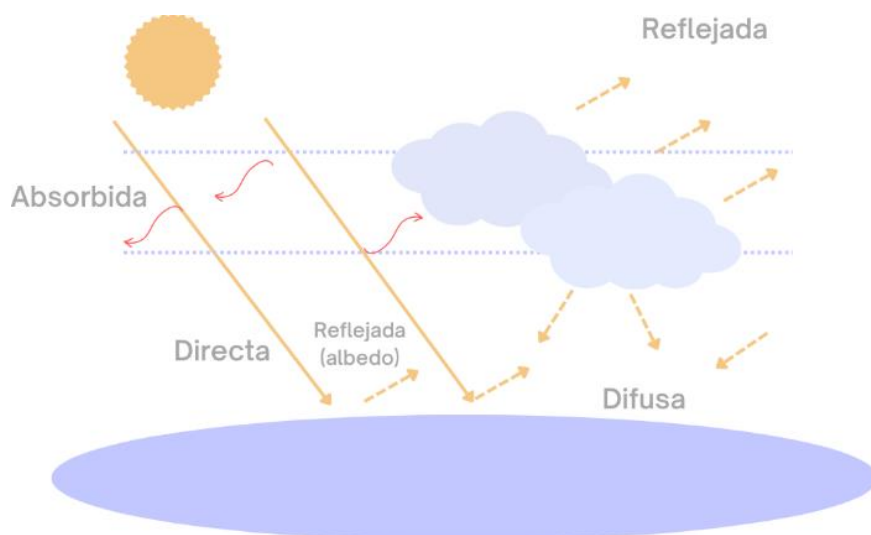


Figura 8. Tipos de radiación contemplados.

2.2 Recurso solar en México

Como se muestra en la **Figura 9**, México tiene un alto potencial para la energía solar térmica debido a la alta irradiancia solar del país. La región Noroeste, específicamente Baja California, Sonora, Sinaloa, Durango y parte de Coahuila y Chihuahua, tiene hasta $6.3kWh/m^2$ por día de potencial, como lo demuestra Solar gris encargada de la recolección de datos climáticos en el mundo (Solar Gris, 2011).

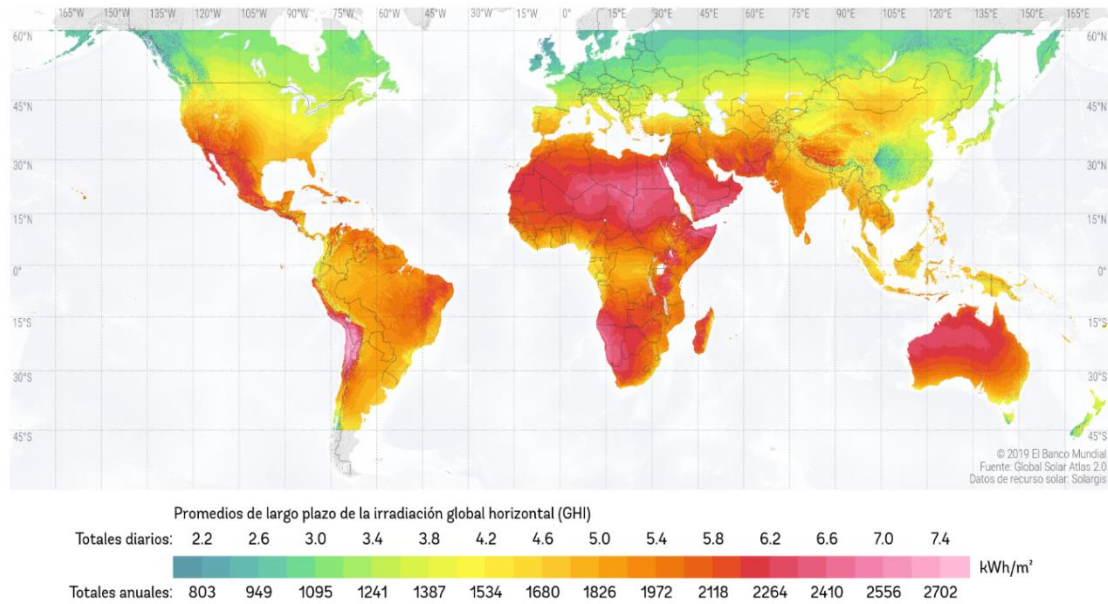


Figura 9. Radiación Solar global en el mundo. Solar Gris (2021).

2.2.1 Disponibilidad del recurso solar en México

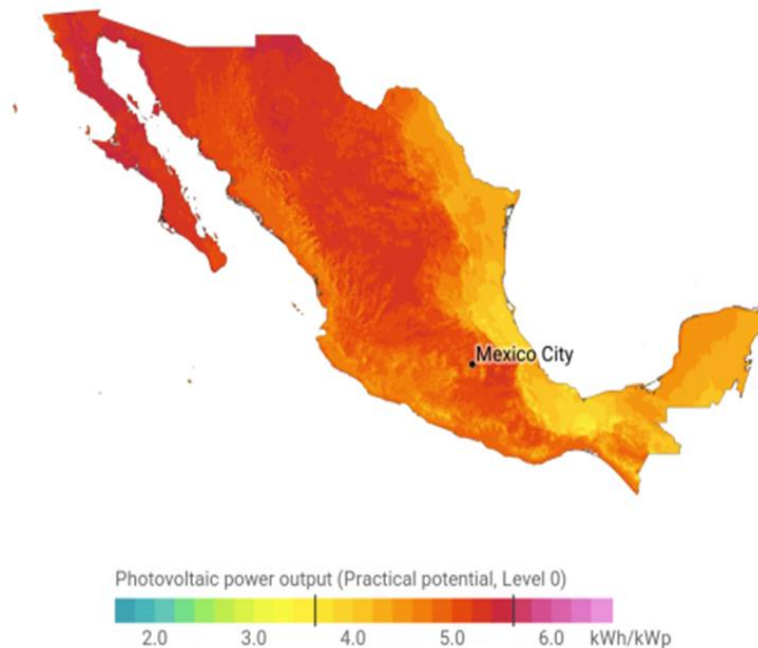


Figura 10. Radiación solar en México. Solar Gris (2021).

En la **Figura 10** muestra la ciudad de Mexicali está ubicada en Baja California, al noroeste del país, y cuenta con excelentes niveles de radiación solar. La irradiancia media mensual en mayo y junio supera los $225kWh/m^2$ con base en los datos de la secretaria de energía, lo que constituye un lugar con gran potencial para aplicaciones de generación de energía solar.

2.3 Calor y sus mecanismos de transferencia

El calor se puede definir como el total de la energía cinética que se encuentra en cada uno de los átomos o moléculas de una sustancia, es por ello que el calor lo relacionamos con un flujo constante y que este siempre tiene la particularidad de moverse de la zona más caliente a la más fría esto debido a un diferencial de temperaturas con la condición de que el volumen de dicha sustancia se mantenga constante. El calor se puede transferir de maneras distintas, siendo estas la conducción, la convección y la radiación.

Este calor o transferencia de calor puede medirse mediante su velocidad de transferencia bajo la fórmula y dada esta relación y la idea anterior del flujo de energía podemos decir que el flujo de calor está dado por:

- La conducción es la transferencia de energía de las partículas de alta energía en la materia a las partículas adyacentes de baja energía y es el resultado de su interacción. La convección es el método de transferencia de calor entre la superficie sólida y el líquido o gas en movimiento adyacente, incluido el efecto combinado de conducción y movimiento de fluidos. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) y es el resultado de cambios estructurales. Componentes electrónicos atómicos o moleculares.
- La convección es el modo de transferencia de calor entre la superficie sólida y el líquido o gas adyacente en movimiento, incluido el efecto combinado de conducción y movimiento del fluido. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), que es el resultado de cambios de configuración. Componentes electrónicos de átomos o moléculas
- La radiación térmica es una energía que es emitida por un material que se encuentra a una temperatura y esta se produce de adentro del material hacia afuera en todas direcciones. Esta energía es producida principalmente por los cambios en las

configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas constitutivas y transportada electromagnéticamente.

2.4 Fluido caloportador

El fluido caloportador pasa a través del absorbedor y transfiere la energía al sistema de utilización de calor (acumulador, acumulador mutuo o intercambiador) estos pueden ser variados y algunos están categorizados como se muestra en la **Figura 11** además de que cada uno de estos cuenta con características y propiedades definidas como se muestra en la **Tabla 1**.

- Agua : Cuando el agua sanitaria pasa directamente por el colector, se puede utilizar en circuito abierto o en circuito cerrado (circuito no relacionado con el consumo). En el primer caso, el circuito sólo podrá construirse con materiales permitidos para conducir agua potable. En algunos países, este sistema no está permitido. Hay que tener en cuenta las propiedades del agua, especialmente su dureza (contenido en calcio y magnesio), que al calentarse puede crear una costra dura o sarro. Esta incrustación acelera la corrosión, restringe el flujo y reduce la transferencia de calor. Los problemas comienzan con estos valores a 60 mg/l. El agua muy blanda también puede causar problemas debido a sus propiedades corrosivas (Krishna et al., 2020).
- Agua con anticongelante: Para evitar el inconveniente de congelar y hervir el fluido caloportador, lo más común es el uso de anticongelante denominado “glicol”. Mezclados en proporciones con agua, evitan la congelación hasta límites de temperatura por debajo de 0°C, según su concentración. Por otro lado, el punto de ebullición elevado da como resultado que el portador de calor esté protegido de temperaturas excesivamente altas. La elección de la concentración dependerá de la temperatura histórica de la zona en la que se vaya a instalar la instalación y de las características facilitadas por el fabricante.

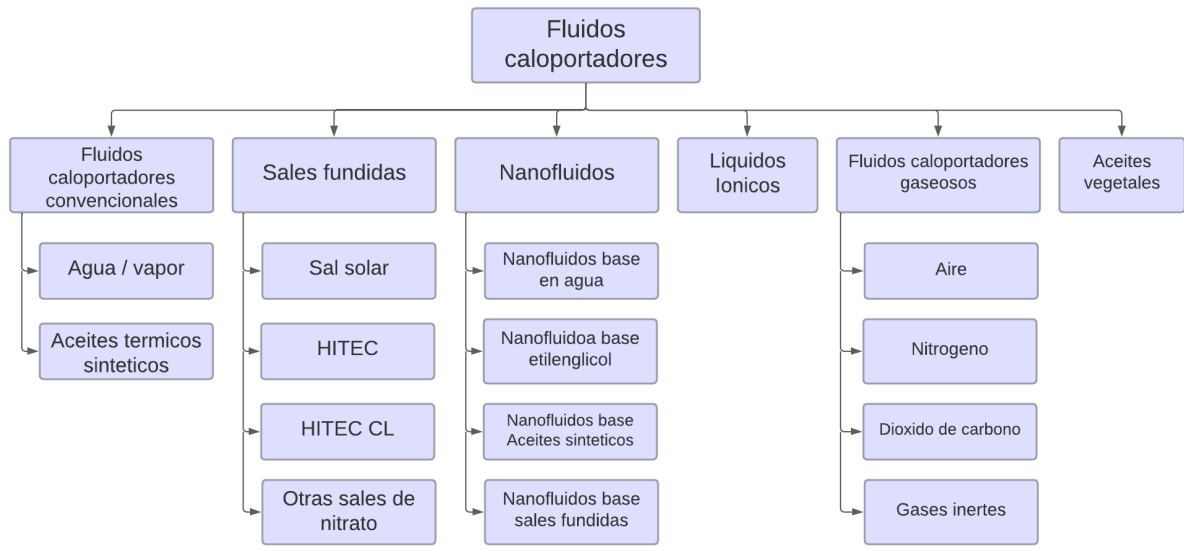


Figura 11. Tipos de fluidos caloportadores. Traducción (Krishna et al., 2020).

Tabla 1. Descripción características de los fluidos caloportadores (Krishna et al., 2020).

Tin (K)	Property	Pressurized water	Liquid sodium	Air	CO ₂	He
300	Thermal Conductivity k(W/mK)	0.628	-	0.036	0.031	0.16
	Density ρ (kg/m ³)	994	-	0.769	1.098	0.146
	Specific Heat c_p (J/kgK)	4164	-	1021	1004	5193
400	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	5.9×10^{-4}	-	2.5×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.1×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	0.674	86.9	0.043	0.037	0.191
	Density ρ (kg/m ³)	926	918	0.632	0.939	0.112
500	Specific Heat c_p (J/kgK)	4277	1370	1040	1057	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	1.9×10^{-4}	5.9×10^{-4}	2.9×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.5×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	0.622	79.8	0.049	0.044	0.221
600	Density ρ (kg/m ³)	813	896	0.537	0.813	0.091
	Specific Heat c_p (J/kgK)	4741	1332	1062	1104	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	1.1×10^{-4}	4.1×10^{-4}	3.2×10^{-5}	3.0×10^{-5}	2.9×10^{-5}
700	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	73.4	0.054	0.051	0.251
	Density ρ (kg/m ³)	-	873	0.467	0.713	0.076
	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	1300	1086	1145	5193
800	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	3.2×10^{-4}	3.5×10^{-5}	3.3×10^{-5}	3.3×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	67.8	0.059	0.057	0.281
	Density ρ (kg/m ³)	-	851	0.413	0.633	0.066
900	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	1276	1108	1180	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	2.6×10^{-4}	3.8×10^{-5}	3.6×10^{-5}	3.7×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	62.7	0.064	0.064	0.31
1000	Density ρ (kg/m ³)	-	827	0.371	0.568	0.058
	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	1260	1129	1211	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	2.3×10^{-4}	4.0×10^{-5}	3.9×10^{-5}	4.0×10^{-5}
1100	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	58.1	0.069	0.07	0.338
	Density ρ (kg/m ³)	-	804	0.336	0.515	0.052
	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	1252	1148	1238	5193
1200	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	2.0×10^{-4}	4.3×10^{-5}	4.2×10^{-5}	4.4×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	54.1	0.073	0.076	0.366
	Density ρ (kg/m ³)	-	780	0.307	0.471	0.047
1300	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	1252	1164	1262	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	1.8×10^{-4}	4.5×10^{-5}	4.5×10^{-5}	4.7×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	50.4	0.077	0.082	0.394
1400	Density ρ (kg/m ³)	-	755	0.283	0.433	0.043
	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	1262	1179	1282	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	1.7×10^{-4}	4.7×10^{-5}	4.8×10^{-5}	5.1×10^{-5}
1500	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	-	0.081	0.087	0.421
	Density ρ (kg/m ³)	-	-	0.262	0.401	0.039
	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	-	1192	1300	5193
1600	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	-	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	5.4×10^{-5}
	Thermal Conductivity k(W/mK)	-	-	0.085	0.092	0.448
	Density ρ (kg/m ³)	-	-	1203	1316	0.036
1700	Specific Heat c_p (J/kgK)	-	-	5.2×10^{-5}	5.3×10^{-5}	5193
	Dynamic Viscosity μ (Pa s)	-	-	-	-	5.7×10^{-5}

2.5 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se utilizan para transferir calor de un medio a otro. Estos medios pueden ser gases, líquidos o una combinación de ambos. Los medios pueden estar separados por paredes sólidas para evitar que se mezclen, o pueden estar en contacto directo. Los intercambiadores de calor pueden mejorar la eficiencia energética de un sistema mediante la transferencia de calor de sistemas innecesarios a otros sistemas que se pueden usar de manera eficiente.

2.6 Parámetros ópticos

2.6.1 Ley de Snell.

8. Ley de la propagación rectilínea: en un medio homogéneo, los rayos de luz se propagan en línea recta.
9. Ley de la reflexión: una onda que incide sobre la superficie de separación entre dos medios se refleja (parcialmente), es decir, se generan nuevas ondas que se alejan de dicha superficie. El rayo incidente y la normal a la superficie determinan el plano de incidencia. Ambas líneas forman el denominado ángulo de incidencia. El rayo reflejado está también contenido en ese plano y forma con la normal el mismo ángulo que el rayo incidente:

$$\textit{ángulo de incidencia} = \textit{ángulo de reflexión}$$

10. Ley de la refracción: cuando una onda incide sobre la superficie de separación entre dos medios, parte de la energía se refleja y parte entra en el segundo medio. El rayo transmitido está contenido en el plano de incidencia, pero cambia de dirección (rayo refractado) como se muestra en la **Figura 12** formando un ángulo con la normal a la superficie, dado por la Ley de Snell:

$$n_1 \text{Sen} \theta_1 = n_2 \text{Sen} \theta_2 \quad (1)$$

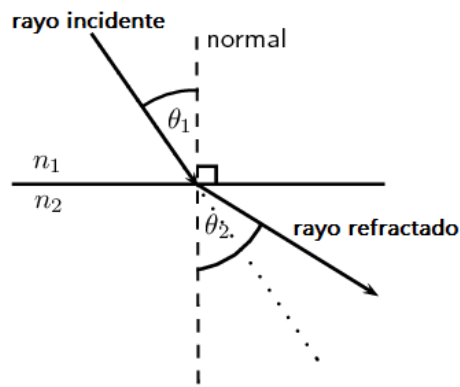


Figura 12. Diagrama explicativo de la ley de Snell.

2.7 Geometría solar

La geometría solar trata de los recorridos aparentes del Sol en el cielo y de su localización en distintas fechas y horas para, de ese modo, predecir su interacción con planos y volúmenes en el espacio. Dentro de estos movimientos y recorridos, están los movimientos de rotación y traslación de la tierra mostrados en la **Figura 13** .

El movimiento de rotación es aquel que se desarrolla en un lapso de tiempo de 24 horas, durante este proceso la Tierra ejecuta una vuelta completa alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos. La tierra hace un giro en dirección oeste-este en sentido antihorario. Este movimiento es el responsable de la alternancia del día y la noche, donde se ilumina la mitad de la Tierra, mitad día y mitad noche.

La traslación de la Tierra es el movimiento del planeta alrededor del sol, el viaje de la tierra a su alrededor tarda unos 365 días y 6 horas en hacer el recorrido completo. Este movimiento llamado traslación corresponde al denominado año solar. El hecho de que la órbita de la Tierra sea elíptica hace que la distancia entre la Tierra y el Sol sea variable. La **Figura 14** muestra sobre la posición de los movimientos terrestres, se conocen como los equinoccios y solsticios.

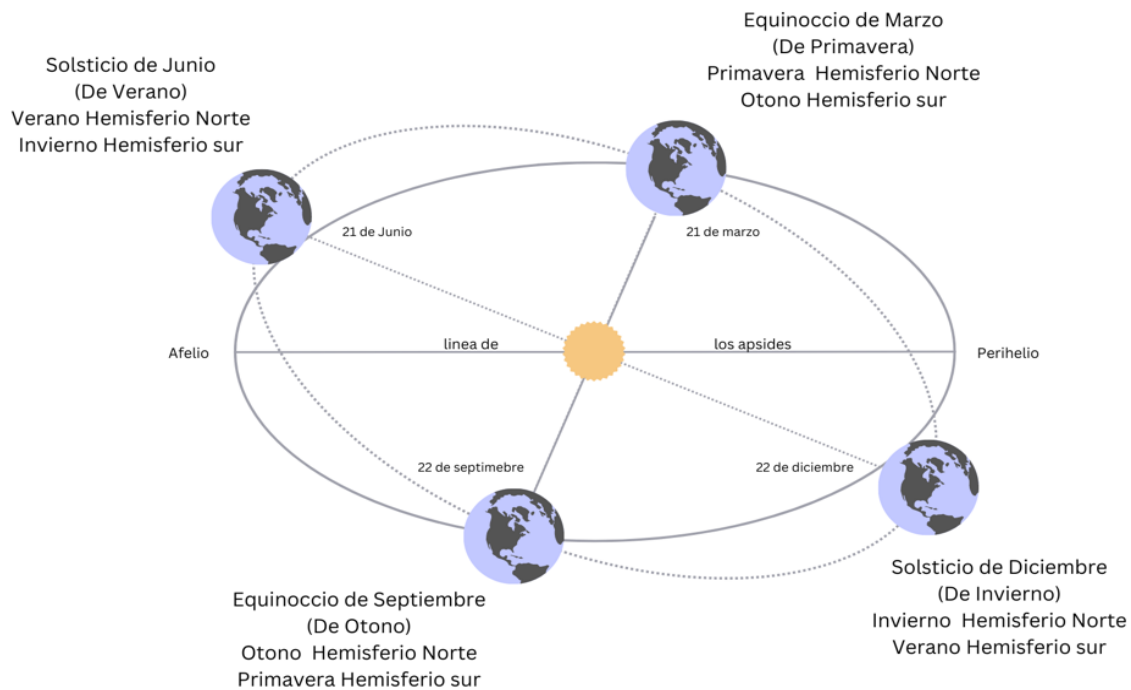


Figura 13. Movimientos terrestres respecto al sol.

En los días en los que el sol alcanza su máxima declinación se denominan solsticios, Estos días son el 21 de junio del solsticio de verano, esto se produce porque la tierra tiene una declinación de norte a sur 23,4 grados hacia el Sol y el 21 de diciembre del solsticio de invierno en donde obtiene la misma declinación, pero negativa. Por esta razón es que el sol parece estar más alto en verano que en invierno.

Así mismo mencionamos que los equinoccios ocurren entre cada solsticio, cuando la declinación del sol es cero, es decir, cuando la tierra se mueve del perihelio al afelio, se destaca que la noche y el día en cualquier punto de nuestro planeta tienen la misma duración. El equinoccio de primavera es el 21 de marzo y el equinoccio de otoño es el 21 de septiembre.

Para determinar los ángulos de la geometría solar básica, un supuesto básico es que las estrellas, incluyendo el sol, se unen en la superficie de la esfera celeste. Esta esfera imaginaria tiene un radio arbitrario y su centro depende de los diferentes sistemas de coordenadas. El radio está a gran distancia de la Tierra, así que la ubicación del Sol y otras estrellas pueden verse como puntos individuales. El centro de la esfera coincide con la posición del observador en el Sistema Horizontal mientras que en el Sistema Ecuatorial coincide con el centro de la Tierra.

Dependiendo del sistema, la posición de un punto en la superficie de la esfera celeste en movimiento puede ser especificada si se conocen dos ángulos. Este modelo simple ayuda en la

comprensión de los movimientos de aparentes diurnos y anuales. En el sistema horizontal, el plano de referencia es el horizonte del observador. Este plano se cruza con la esfera celeste en el horizonte. La intersección de la normal en este plano y la esfera celeste se llama el cenit (Z). En coordinar este sistema la posición del Sol en la esfera celeste se determina por dos ángulos, el ángulo de altitud solar (h) y el ángulo azimutal solar (α).

La altitud solar es el ángulo de la línea que une los centros del Sol y el observador con su proyección en el plano horizontal desde -90° a $+90^\circ$. La altitud solar es positiva cuando el Sol está sobre el horizonte, negativo cuando el Sol está por debajo de ella. La distancia hasta el cenit es el complemento del ángulo de altitud y se denomina ángulo cenital (θ_z). El acimut solar (α) es la distancia angular entre el sur y la proyección horizontal de los rayos del sol. Un ángulo de acimut solar positivo indica una posición al este del sur y un ángulo de acimut negativo indica al oeste del sur. Se mide debido al sur en el hemisferio norte y debido al norte en el hemisferio sur.

2.7.1 Ángulo de declinación solar

La declinación solar es el ángulo entre los rayos del sol y el plano del Ecuador de la tierra. Varía por un ángulo de hasta $\pm 23^\circ 27'$. Esta variación hace que los cambios de estación, con su período desigual de la luz y la oscuridad. La declinación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 * \sin \left(365 * \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (2)$$

Donde:

δ :Declinación Solar.

n:Día del año del que se quiere hacer el cálculo.

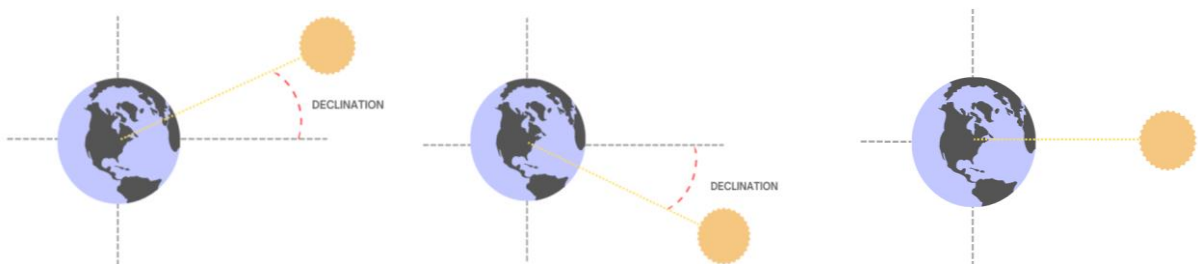


Figura 14. Ilustración del ángulo de declinación solar.

2.7.2 Ángulo horario solar

El ángulo de hora solar (ω) es la distancia angular entre el círculo de la hora del Sol y meridiano del local. El ángulo de la hora se define como cero al mediodía solar local, más tarde que la hora del día cuando el ángulo de altitud del sol está en su mayor. El ángulo aumenta 15° por cada hora antes del mediodía solar y disminuye el ángulo 15° por cada hora después del mediodía solar local (**Figura 15**). En otras palabras, el ángulo de la hora se establece como positivo antes del mediodía solar y negativo después del mediodía solar. Para calcular el ángulo de la hora es importante usar la hora solar local y no el tiempo del reloj.

$$\omega = 15 * (Ts - t) \quad (3)$$

Donde:

ω : Ángulo horario.

t: Máxima altura solar (12:00 PM).

Ts: Hora solar de la que se quiere conocer su ángulo.

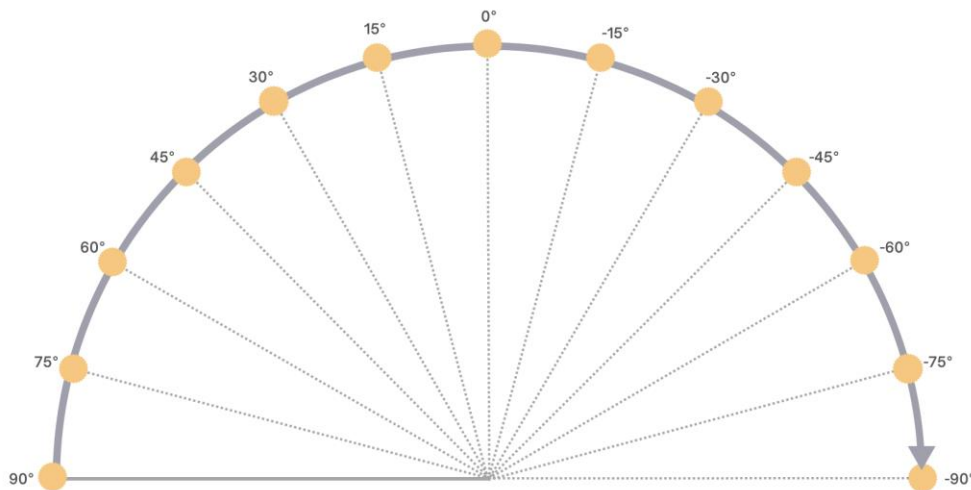


Figura 15. Ilustración del ángulo horario solar.

El tiempo solar (T_s) se basa en el movimiento del sol a lo largo del cielo, el mediodía solar es el momento en que el sol cruza el meridiano del observador y alcanza su altura máxima. Es importante señalar que la hora solar no corresponde a la hora local ni a la hora civil (T_c). Si desea convertir la hora civil a la hora solar, debe realizar dos correcciones; es la constante de

corrección de la hora (Fct), dada por la diferencia de la hora solar según la zona horaria en la que se encuentra, debido a los cambios de longitud y toma en cuenta la excentricidad.

La corrección de la ecuación del tiempo (E) afecta la órbita de la Tierra y la inclinación del eje de la Tierra en el momento en que el sol cruza el meridiano del observador.

Hora solar local (Local solar time LST):

$$\text{Hora Solar Local} = LT + \frac{TC}{60} \quad (4)$$

Donde:

LT= Hora Local (Local Time).

TC= Factor de corrección del tiempo.

Para calcular la hora solar local se debe conocer la corrección del tiempo en minutos (TC) la cual se utiliza debido a la variación de la hora solar local por la variación de longitud en un huso horario cualquiera se utiliza el Factor de corrección del tiempo (Time correction factor TC):

$$TC = 4(\text{Longitud} - LSTM) + EoT \quad (5)$$

Donde

4= Los cuatro minutos que necesita la Tierra para girar 1°.

LSTM= Hora Estándar Local de Meridiano.

EoT= Ecuación del tiempo (Equation of time).

Para conocer el factor de corrección del tiempo se debe conocer la hora estándar local de meridiano (LSTM) que es la hora tomando como referencia los meridianos para una zona horaria particular y la ecuación del tiempo (EoT) siendo una ecuación utilizada ya que el movimiento aparente del Sol no es uniforme y la duración del día solar no es constante a lo largo del año. Hora estándar local de meridiano (LSTM):

$$LSTM = 15^\circ \Delta T_{UTC} \quad (6)$$

Donde:

15= Los grados que se desplaza la Tierra por hora.

T_{UTC} = La diferencia entre la hora local (LT) y el tiempo coordinado universal (UTC).

Ecuación de corrección del tiempo (EoT):

$$EoT = 9.87\sin(2B) - 7.53\cos(B) - 1.5\sin(B) \quad (7)$$

Donde:

B = Variable que depende del día del año.

Para calcular B sería de la siguiente forma:

$$B = \frac{360}{365}(d - 81) \quad (8)$$

Donde:

d = Día del año del que se quiere hacer el cálculo.

Ángulo horario de salida y puesta del Sol (ω_s):

$$\omega_s = \cos^{-1}((-tan\delta)(tan\phi)) \quad (9)$$

Donde:

ω_s : Ángulo de salida y puesta del sol.

δ : Declinación en cierto día del año.

ϕ : Latitud del lugar.

Ángulo de Inclinación de la superficie o colector solar (β) indicado en la **Figura 16**:

$$\beta = 180^\circ - (90^\circ + \omega) \quad (10)$$

Donde:

β : Es el ángulo de inclinación del colector solar.

ω : Es el ángulo horario a cierta hora solar.

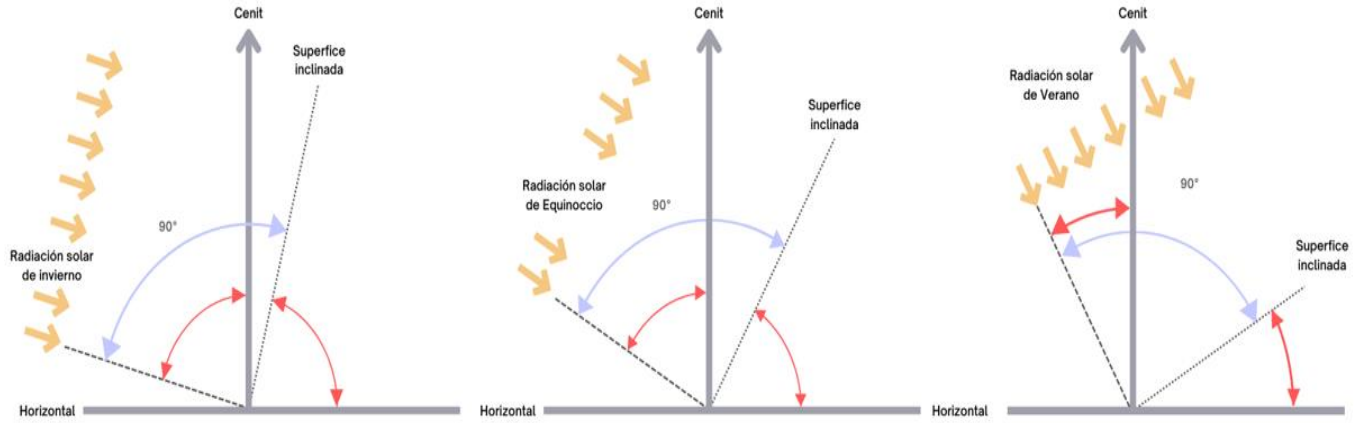


Figura 16. Ilustración del ángulo de inclinación de la superficie o colector solar.

Ángulo azimutal del sol (γ_s) esta trazado en la **Figura 17**:

$$\gamma_s = C_1 * C_2 * \gamma'_s + C_3 \left(\frac{1 - C_1 * C_2}{2} \right) 180 \quad (11)$$

El valor de la variable C_1 se obtiene a partir de:

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } |\omega| \leq \omega_{ew} \\ -1 & \text{si } |\omega| > \omega_{ew} \end{cases} \quad (12)$$

Donde:

ω : Ángulo horario.

La incógnita ω_{ew} se consigue con la siguiente expresión:

$$\omega_{ew} = \cos^{-1} \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi} \right) \quad (13)$$

Donde:

δ : Declinación en cierto día del año.

ϕ : Latitud del lugar.

El valor de la variable C_2 se consigue a partir de:

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } |\phi - \delta| \geq 0 \\ -1 & \text{si } |\phi - \delta| < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Donde:

δ :Declinación en cierto día del año.

ϕ :Latitud del lugar.

El valor de la variable γ'_s se calcula de la siguiente manera:

$$\gamma'_s = \tan^{-1}\left(\frac{\cos\delta * \sin\omega}{\sin\theta_z}\right) \quad (15)$$

Donde:

δ :Declinación en cierto día del año.

ω :Ángulo horario a cierta hora solar.

θ_z :Ángulo cenital.

El valor de la variable C_3 se obtiene a partir de:

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } |\omega| \geq 0 \\ -1 & \text{si } |\omega| < 0 \end{cases} \quad (16)$$

Donde:

ω :Ángulo horario a cierta hora solar

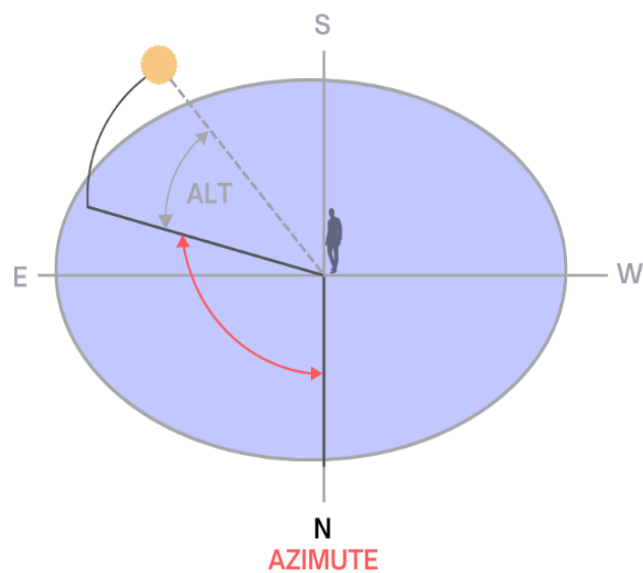


Figura 17. Ilustración del ángulo azimutal solar.

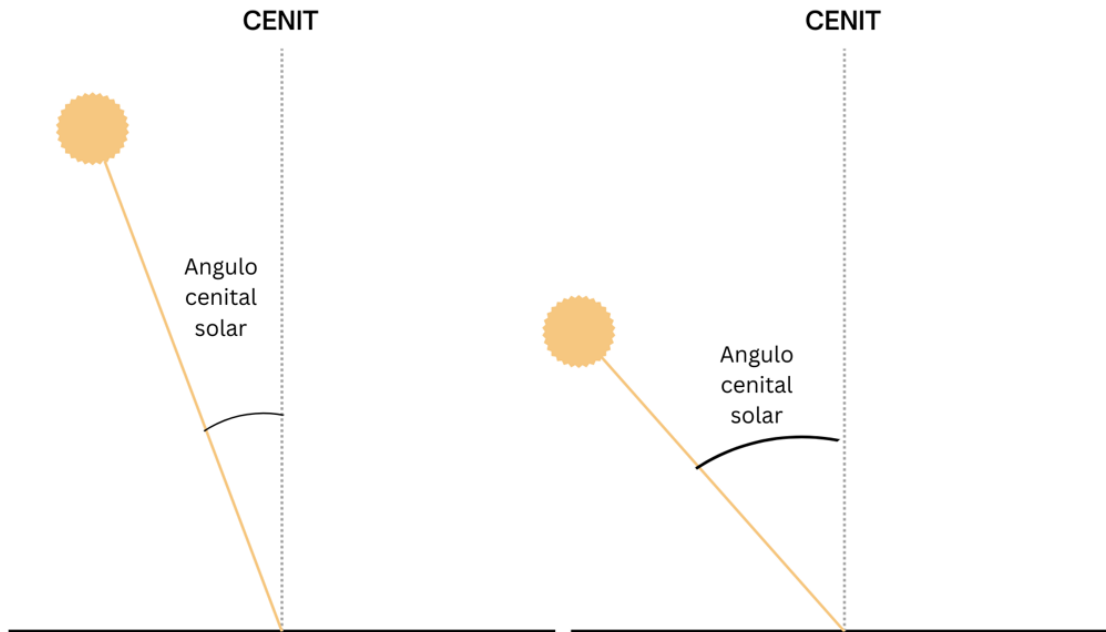


Figura 18. Ilustración del ángulo cenital solar.

La **Figura 18** dibuja el ángulo cenital del sol (θ_z):

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha_s \quad (17)$$

Donde:

θ_z : Ángulo cenital.

α_s : Ángulo de altitud solar.

Ángulo de incidencia del sol con respecto a una superficie (θ) mostrado en **Figura 19**:

$$\begin{aligned} \cos\theta = \sin\delta * \sin\phi * \cos\beta - \sin\delta * \cos\phi * \sin\beta * \cos\gamma + \cos\delta * \cos\phi * \cos\beta \\ * \cos\omega + \cos\delta * \sin\phi * \sin\beta * \cos\gamma * \cos\omega + \cos\delta * \sin\beta \\ * \sin\gamma * \sin\omega \end{aligned} \quad (18)$$

ó

$$\cos\theta = \cos\theta_z * \cos\beta + \sin\theta_z * \sin\beta * \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (19)$$

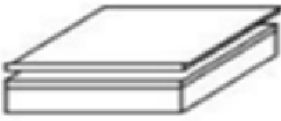

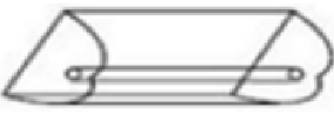
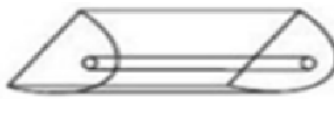

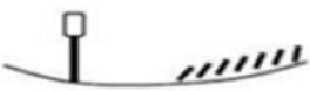
Donde:

2.8 Aplicaciones

2.8.1 Sistemas de captación solar

El colector solar es un tipo de intercambiador de calor que recoge y convierte la radiación solar en la principal fuente de energía. Podría ser un colector solar Clasificado como complejo central y complejo central. Actualmente existe un gran número de colectores centrales potenciales clasificados en tres categorías generales mostrados en la **Tabla 2**: fijas o semipermanentes, estas emplean un sistema de seguimiento en un eje y seguimiento en dos ejes(López Zavala, 2019) y estas tienen características y propiedades que muestra la **Figura 20**.

Tabla 2. Descripción características de concentración y temperatura de los colectores de energía solar.

		<i>Nombre</i>	<i>Croquis</i>	<i>Razon de concentracion "C"</i>	<i>Rango de temperatura alcanzada [C]</i>	
<i>Estacionario</i>	<i>Absorbedor plano</i>	Captador plano de agua/ aire		$C < 1$	$30 < T < 250$	
		Tubos de vacio		$C < 1$	$50 < T < 200$	
<i>Seguidores</i>	<i>Seguimiento a un eje</i>	<i>Absorbedores tubulares</i>	Colector parabolico compuesto		$1 < C < 15$	$70 < T < 300$
			Colector cilindro parabolico		$15 < C < 40$	$70 < T < 350$
	<i>Seguimiento a dos ejes</i>	<i>Absorbedores puntuales</i>	Disco parabolico		$100 < C < 1000$	$70 < T < 1500$
			Torre central		$100 < C < 1500$	$150 < T < 1500$

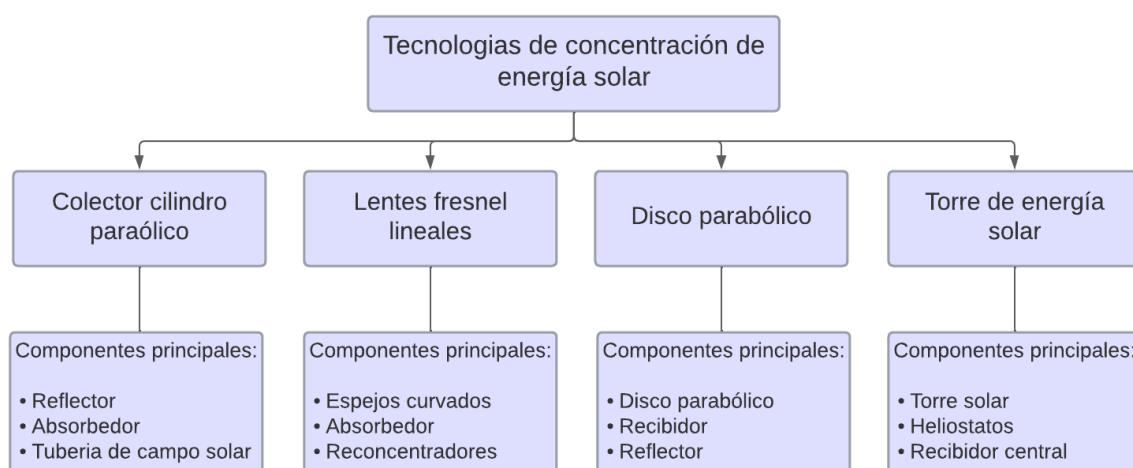


Figura 20. Traducción. Diferentes tipos de colectores solares con sus características (Krishna et al., 2020).

2.8.2 Sistema de seguimiento solar

Un seguidor solar es un sistema que orienta un colector solar de manera que su área de apertura logre posicionarse normal al rayo de luz incidente, logrando que este permanezca siempre perpendicular a los rayos del sol, de esta forma el aprovechamiento del recurso solar logra generar energía eléctrica o térmica destinada a diversos fines. Los tipos de los diseños de los seguidores solares pueden ser de 1, 2 o 3 ejes e incrementan la eficiencia de un sistema de un 30% al 40% (Hernández Velázquez, 2018).

2.9 Colector cilindro parabólico

El colector cilindro parabólico (CCP) es una tecnología completamente madura, por lo que ahora se utiliza para generar electricidad a partir del recurso solar. Este tipo de colector nos proporciona calor para diversos tipos de actividades (**Figura 21**).

El funcionamiento de este sistema se secciona de la siguiente manera: Primero, la radiación entra en contacto directo con la superficie reflectante dentro del área de apertura del colector solar, luego, el haz de luz que se refleja hacia el receptor impactándolo directamente realiza una transferencia de calor hacia el tubo absorbedor, donde en su interior el fluido de trabajo (agua o aceite térmico) logra incrementar su temperatura por medio del calor latente. Este tubo absorbedor se une a los extremos del colector mediante soportes y se encierra en la cubierta de vidrio que ayuda a evitar la pérdida de calor por convección hacia el ambiente, cada uno de estas partes se muestran en la **Figura 22**.



Figura 21. Concentrador cilindro parabólico (CCP).

2.9.1 Componentes del colector cilíndrico parabólico

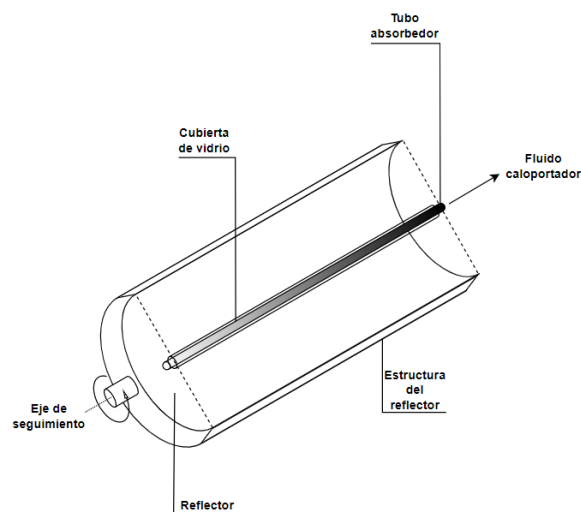


Figura 22. Plano general de los componentes del CCP.

- El Reflector Cilíndrico Parabólico:

Su misión es reflejar y enfocar hacia el receptor la luz solar directa haciendo que esta incida sobre la superficie del receptor. Se puede observar como un espejo curvo que forma una parábola en el total de sus dimensiones. Enfoca toda la radiación reflejada en la línea focal por debajo del material del receptor y comúnmente se encuentran contruidos en plásticos revestidos papel de plata o aluminio, hoja de metal siendo este último el más utilizado.

- El tubo de absorción o Receptor:

Es uno de los elementos básicos del CCP el cual influye en el rendimiento general de este colector pues depende en gran medida de su calidad en los materiales del cual está construido (**Figura 23**). En el aspecto termodinámico de absorción este puede presentar diversos valores ya que se puede construir con un tubo o dos de manera concéntrica. El tubo

exterior está hecho de vidrio y diseñado para reducir la pérdida de calor por convección del tubo de metal interior y a su vez este se usa para protegerlo de la intemperie. Debido a estos dos tubos la transmitancia de la radiación solar provoca un pequeño aumento en el rendimiento óptico del colector.



Figura 23. Tubo absorbedor de un CCP.

2.9.2 Parámetros geométricos

En este tipo de concentradores se habla del factor de concentración, con él se puede categorizar y para ello se debe de sacar una relación con la que podamos determinar cuál es este valor del factor de concentración. La fórmula cuantifica el valor del número de veces que aumenta la energía solar en la superficie absorbente. Los parámetros mostrados en la **Figura 24** varían según el autor consultado, pero la definición más práctica se refiere a la relación entre el área del plano de apertura del colector y el área del plano que recibe la radiación concentrada y se encarga de absorber:

$$C = \frac{A_{\text{apertura}}}{A_{\text{concentrador}}} \quad (21)$$

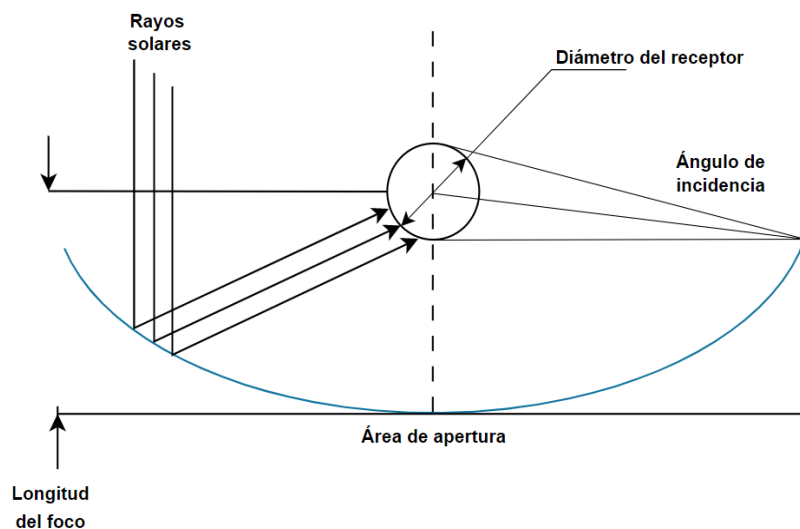


Figura 24. Esquema general de los parámetros geométricos del CCP.

2.10 Microcontroladores

2.10.1 Arduino MEGA

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables dupont) mostrado en **Figura 25**.

El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un cristal de 16Mhz, conexión USB, conexión para alimentación DC, conector ICSP, y un botón de reseteo .



Figura 25. Placa Arduino MEGA.

2.10.2 Arduino NANO

Arduino Nano es una versión simplificada de Arduino UNO. Esto minimiza los requisitos de energía que consume y también significa que se requiere menos espacio para acomodar las pines, lo que lo hace ideal para proyectos donde el tamaño importa. Utiliza un cable USB Mini-B en lugar de un cable estándar y esencialmente no tiene conector para alimentación externa. Ahora, aunque no tiene un conector de alimentación de CC como otras placas Arduino, tiene un puerto mini USB. Para monitoreo y programación en serie. Se basa en el microcontrolador Atmel ATmega328p o MCU en la versión 3.x y el ATmega168 en versiones anteriores.

La placa Arduino NANO (**Figura 26**) funciona a 16 MHz y presenta una placa de micro controlador pequeña, fácil de usar y muy flexible con un peso total de 7 gramos, 14 pines digitales, 8 pines analógicos, 6 pines de fuente de alimentación 1 (VCC y GND) y 2 pines de reinicio. Su memoria está compuesta por 32 KB o 16 KB flash, según cada versión. Por lo

general, los 2 KB son utilizados para el cargador de arranque. Cuenta con una tensión de alimentación de 5v. Mientras que, su tensión de entrada puede variar de 7 a 12v.

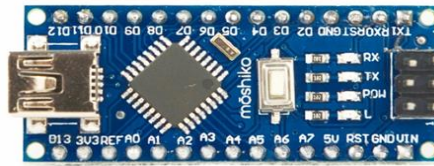


Figura 26. Placa Arduino NANO.

2.11 Protocolos de comunicación y almacenamiento de datos

2.11.1 Protocolo I2C

I2C es un protocolo síncrono el cual utiliza solo 2 cables, uno para la señal de reloj (SCL) y otro para la señal de datos (SDA) como se muestra en la **Figura 27**. Esto significa que el maestro y los esclavos envían datos por el mismo cable, el cual es controlado por el maestro, que crea la señal de reloj. Este protocolo no utiliza selección de esclavos, sino direccionamiento. Este es un bus de comunicaciones en serie y su nombre viene de Inter-Integrated Circuit (Inter-Circuitos Integrados).

La principal característica de I2C es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una para los datos y otra para la señal de reloj. También es necesaria una tercera línea, pero esta sólo es la referencia (masa). Como suelen comunicarse circuitos en una misma placa que comparten una misma masa esta tercera línea no suele ser necesaria.

Las líneas se llaman: SDA: datos, SCL: reloj, GND: tierra

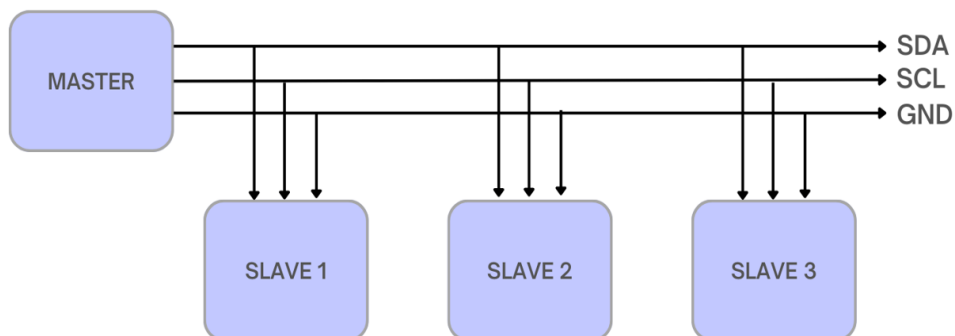


Figura 27. Esquema de conexión del bus I2C.

Este tipo bus de comunicación entre micro controladores requiere de una librería específica para poder trabajar, por lo que dentro de la programación de Arduino se debe de incorporar la librería Wire.h que trae como herramientas de trabajo diversas instrucciones.

2.11.2 Protocolo SPI

La **Figura 28** muestra el protocolo SPI el cual fue desarrollado por Motorola (ahora parte de NXP Semiconductors) alrededor de 1985. Es una interfaz serie síncrona para la comunicación de dispositivo a dispositivo de corto alcance. Desde entonces, se ha convertido en el estándar de facto utilizado por muchos fabricantes de semiconductores, especialmente microprocesadores y micro controladores. La razón de la popularidad de SPI son sus muchas ventajas.

La primera es que es una interfaz de direccionamiento de hardware simple que proporciona una flexibilidad completa en la cantidad de bits transferidos. Utiliza un único modo maestro-esclavo que puede controlar varios dispositivos esclavos mediante comunicación full-duplex a velocidades de reloj de hasta 50 MHz (**Figura 29**). No utiliza protocolos estándar y solo transmite paquetes de datos, lo que lo hace ideal para la transmisión de datos a largas distancias.

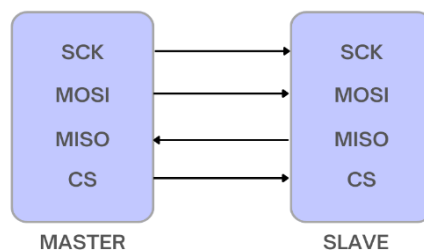


Figura 28. Esquema de conexión del bus SPI.

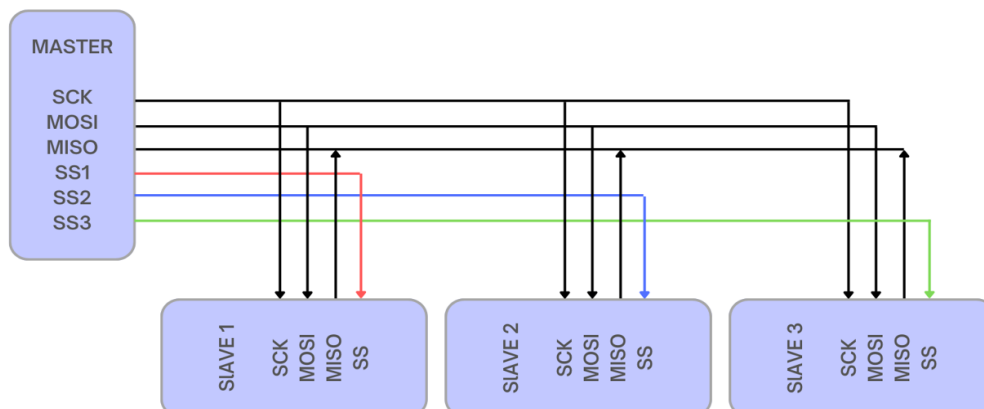


Figura 29. Esquema de conexión del bus SPI.

2.12 Sensores

2.12.1 Sensores de temperatura

Un sensor es un objeto capaz de detectar magnitudes físicas o químicas llamadas variables de instrumentación, que pueden ser la intensidad lumínica, la temperatura, distancia, aceleración. En este caso en particular un sensor de temperatura detecta esta magnitud la cual, asociada a las nociones de calor o diferenciales de temperatura en un cuerpo o en el ambiente, esos dispositivos se muestran en la **Figura 30**.

Dentro de los sensores de temperatura encontramos los sensores de diseño para esta plataforma existe el DHT11 el cual es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo y fácil uso. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Utilizado en aplicaciones académicas relacionadas al control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y más.

Así mismo, para el sistema de tuberías del CCP encontramos los sensores PT100 o las termorresistencias son un tipo específico de sensor RTD (detector de temperatura por resistencia). La característica más importante de los elementos Pt100 es que están fabricados con platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C y es con diferencia el tipo más común de sensor RTD.

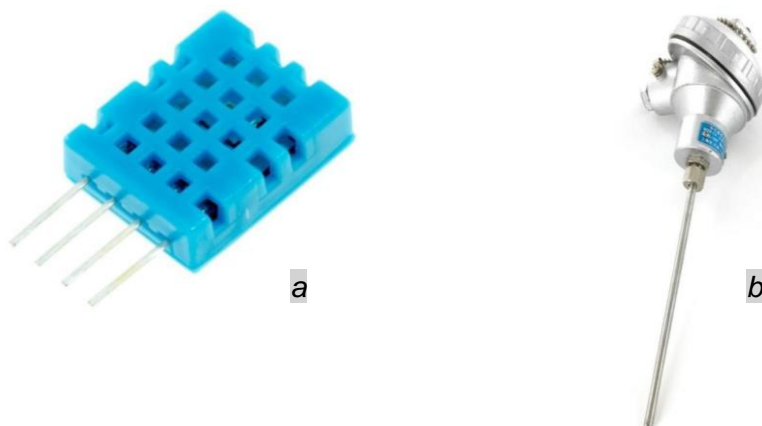


Figura 30. Sensor de temperatura DHT11 (a) y sensor PT100 (b).

2.12.2 Sensor de caudal

La **Figura 31** muestra un sensor de flujo el cual recoge el caudal de aire o líquido. Los sensores de flujo utilizan diferentes principios de medición. Por ejemplo, los sensores de flujo de líquidos funcionan en base a ultrasonidos. Sensor de caudal profesional para inspección y control La ventaja de esta medición sin contacto es que el sensor no está expuesto a golpes de ariete ni a medios sólidos.



Figura 31. Sensor de flujo.

2.13 Actuadores

2.13.1 Actuador lineal

Un actuador lineal es un dispositivo que convierte el movimiento giratorio de un motor de CC de bajo voltaje en movimiento lineal. Su movimiento de salida se produce en el mismo eje de salida, de esta forma es posible levantar, ajustar, inclinar, empujar o tirar de objetos pesados o de difícil acceso con solo pulsar un botón.

2.13.2 Actuador Rotativo

Los actuadores rotativos son definidos como todos aquellos actuadores en los que su movimiento final se realiza de forma circular (**Figura 32**). La función principal de un actuador rotativo es convertir los diferenciales que actúan a la entrada de este dispositivo en potencia rotativa y gracias a ello poder obtener un torque instantáneo. Este actuador consta de una cámara cilíndrica que incluye una barrera estacionaria y un eje central con una o dos paletas acopladas a él.



Figura 32. Actuador rotativo.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Propuesta del sistema

Mediante un análisis profundo a los sistemas instalados en la azotea del instituto de ingeniería se propone el desarrollar un seguidor solar en el cual se implementen varios dispositivos electrónicos de bajo costo (Arduino) para que, por medio de protocolos de comunicación, (I2C) para el intercambio y procesamiento de información generada por medio de un modelo matemático de geometría solar basado en ecuaciones se pueda interconectar varias etapas constituyentes del sistema.

Esta información se planea controlará la etapa de potencia, que hace que los motores puedan mover un sistema de captación solar mostrado en la **Figura 33** . El sistema propuesto tendrá la capacidad de cambiar el modo de seguimiento entre norte-sur y este-oeste, incluyendo diversos modos de operación como lo son el modo de resguardo el cual colocará el sistema de captación en una posición designada la cual fue previamente analizada para la preservación del sistema ante climas o situaciones adversas según lo requiera. Asimismo, se podrá operar de manera manual puesto que se requiera hacer ajustes o movimiento fuera de su programación de seguimiento autónomo.

Este sistema se aplicará para un colector solar del tipo cilindro parabólico o Colectores Cilíndrico Parabólico (CCP). Atendiendo a la continuación del plan de rehabilitación de sistemas de aprovechamiento de recurso solar del Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER).



Figura 33. Arreglo de colectores cilíndricos parabólicos en la azotea del Instituto de Ingeniería.

3.1.1 Descripción operativa del sistema

El sistema de seguimiento (**Figura 34**) consta de diversas etapas, comenzando con una etapa de conversión de voltaje en donde pasamos un voltaje de 24v a 5v ya que todos los módulos utilizados se energizan con este valor. Para la parte de la realización de los cálculos y control de las salidas del sistema, se utiliza un Arduino MEGA con la función de maestro dentro de los protocolos de comunicación y como estamos contemplando una comunicación entre maestros y esclavos, tenemos un Arduino del tipo NANO que se encarga de contar los pasos dados por el motor o el elemento de salida.

Para controlar esta salida y como se utilizan dos valores de voltaje en el sistema, recurrimos a un módulo de relevadores dobles con una configuración en la que los puntos comunes de estos son las salidas hacia nuestro motor y las salidas normalmente abiertas y normalmente cerradas se conectan respectivamente entre sí. Para las entradas y salidas de nuestro sistema contamos con unas borneras seccionadas en donde podemos encontrar un área de entrada para los sensores de límite, botón simple, interruptor de posición y SPDT que nos dan señales de entrada.

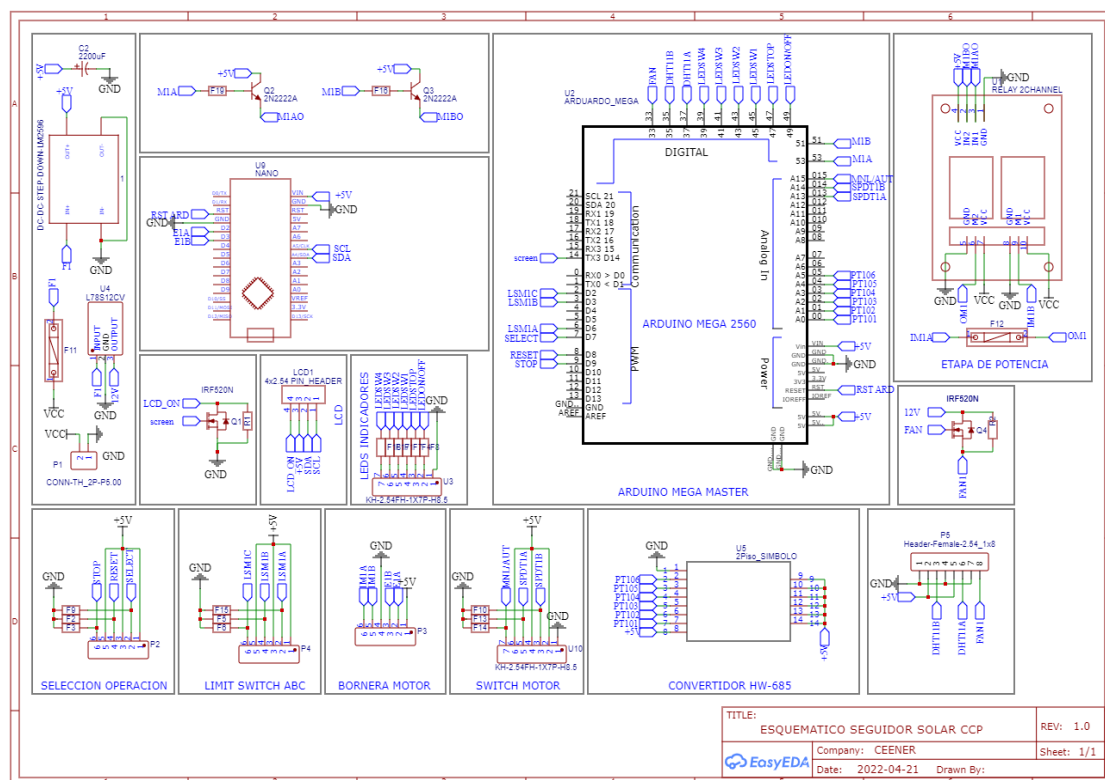


Figura 34. Diagrama esquemático del sistema.

3.2 Modelo Matemático

Para que el modelo pueda ser realmente preciso se debe de realizar el análisis de la estructura de la parábola mostrado en la **Figura 35**, por ello se utiliza el esquema de la Figura 36 como referencia, en donde podemos calcular las distancias de la figura geométrica partiendo de la ecuación de la parábola:

$$x^2 = 4py \quad (22)$$

Para nuestros fines debemos de conocer y dividir la distancia en el eje y en dos secciones, las cuales son la distancia o longitud del foco y el excedente con el que cuenta nuestra parábola, despejando la ecuación quedando de la siguiente manera:

$$P + e = \frac{1}{4P} * x^2 \quad (23)$$

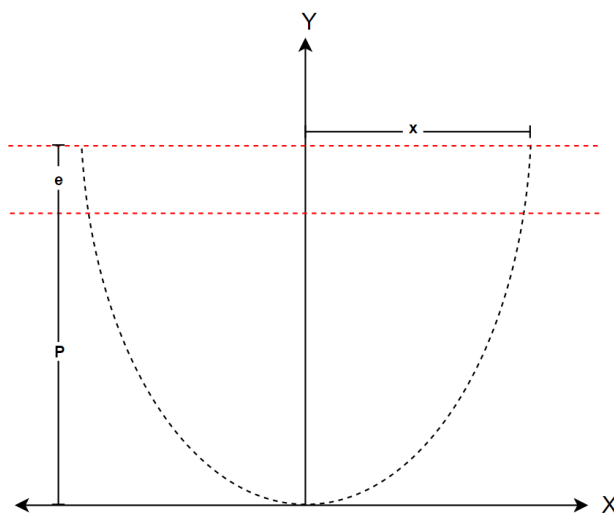


Figura 35. Estructura geométrica de la parábola

3.2.1 Metodología de simulación

La metodología de trabajo que se planeó, está representada bajo el esquema de la **Figura 36**.

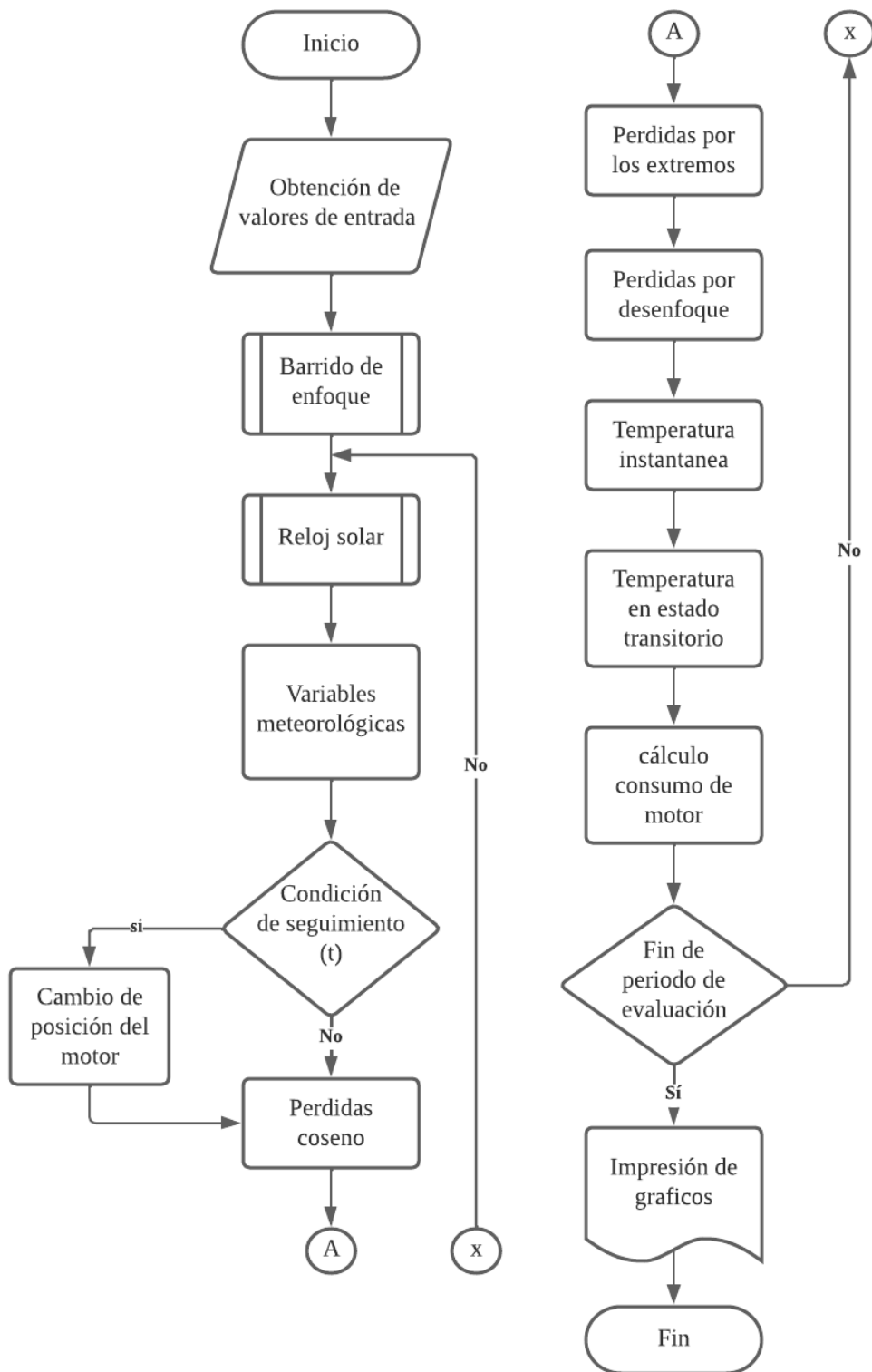


Figura 36. Descripción general del simulador

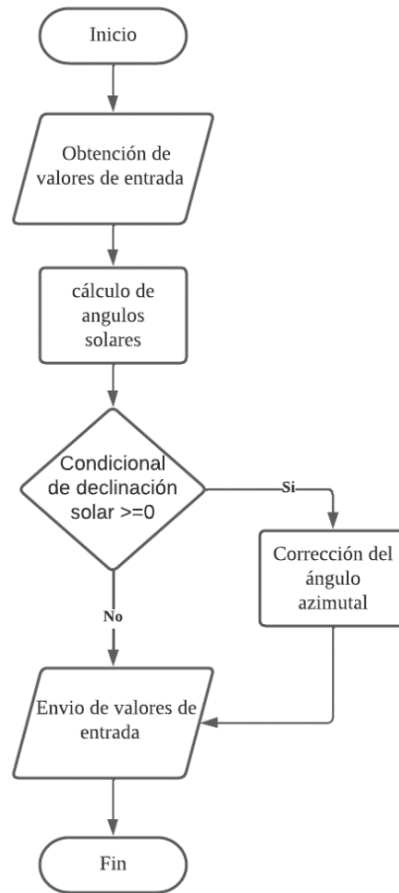


Figura 37. Descripción de la sub función reloj solar

Para poder realizar el análisis se propuso un sistema de referencias bajo el cual trabaja la simulación dependiente de la subfunción de reloj solar (**Figura 37**), el sistema de seguimiento contempla 3 referencias principales X, Y y Z presentados en la **Figura 38** donde señalan estas referencias las cuales provienen de las siguientes ecuaciones tomando como base los ángulos de geometría solar quedando de la siguiente manera:

$$Z_{ref} = \text{sen}(\alpha_s) \quad (24)$$

$$Y_{ref} = \text{cos}(\alpha_s) * \text{cos}(\gamma_s) \quad (25)$$

$$X_{ref} = \text{cos}(\alpha_s) * \text{sin}(\gamma_s) \quad (26)$$

Así mismo para que nuestras nuevas referencias tengan coherencia con lo que vemos en la realidad se debe de ajustar el cuadrante en el cual está ubicado el sol, por ello se hace una corrección en los ángulos sumando 180° al valor obtenido de la relación que existe entre las

nuevas referencias de seguimiento, las cuales son NS ref y EO ref obtenidas a partir de los vectores de Z_{ref} , Y_{ref} y X_{ref} como se muestra a continuación:

$$NS_{ref} = \arctan\left(\frac{Z_{ref}}{X_{ref}}\right) \quad (27)$$

$$EO_{ref} = \arctan\left(\frac{Z_{ref}}{Y_{ref}}\right) \quad (28)$$

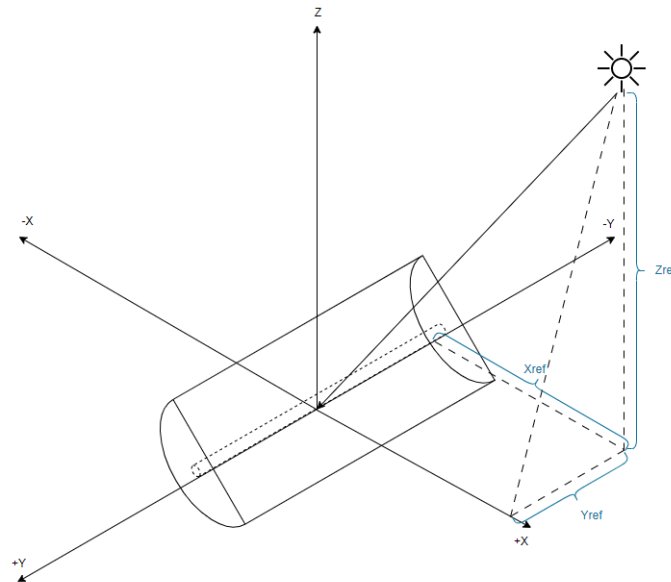


Figura 38. Referencias geométricas para obtener los ángulos de seguimiento

3.3 Análisis opto geométrico de un CCP

En el análisis opto geométrico del CCP debe de considerar diversos aspectos de construcción, como lo es la longitud de nuestro colector, altura del foco del receptor y el ángulo incidente reflejado por la superficie del colector, a estos factores los consideraremos como pérdidas de nuestro sistema las cuales son coseno, por extremos y por desenfoque.

3.3.1 Pérdidas coseno

Las pérdidas coseno se dan por un efecto en la geometría de los rayos incidentes en el colector, ya que estos forman un ángulo θ con respecto a la normal del plano generado por el área de apertura como se muestra en la **Figura 39**. Uno de los puntos clave de los colectores cilindro parabólico es precisamente el cuidado de estos efectos geométricos ya que al buscar la mayor eficiencia consecuentemente se debe de reducir este ángulo generado.

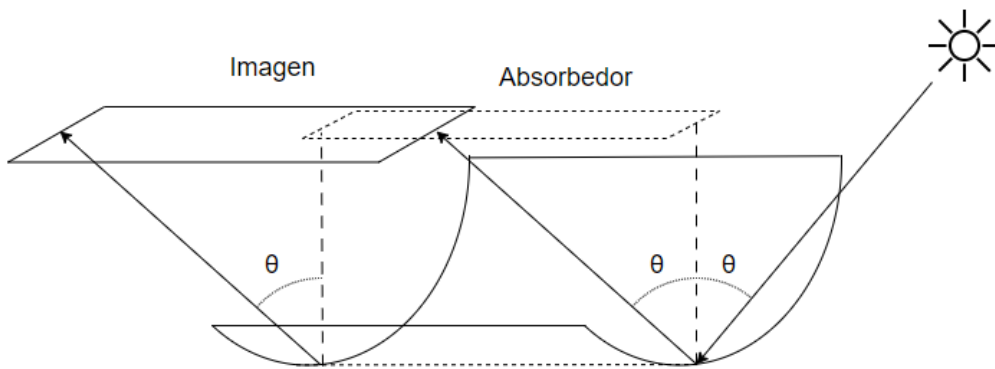


Figura 39. Representación de las pérdidas coseno en un colector cilindro parabólico.

Las pérdidas coseno se pueden definir en pocas palabras como el coseno del ángulo de incidencia, el cual se expresa por la siguiente formula:

$$P_{cos} = \cos(\theta) \quad (29)$$

3.3.2 Pérdidas por los extremos

El colector cilindro parabólico al tener una estructura definida presenta condiciones que afectan directamente a su eficiencia, esto debido a parámetros de su propia construcción. Las pérdidas por los extremos se presentan por la inexistencia de una superficie en los extremos del colector y que de manera matemática nos ayudan a determinar las horas en las que concentra este sistema y a su vez nos denotan en que intervalos de tiempo se pierden los rayos reflejados como se muestra en la **Figura 40**.

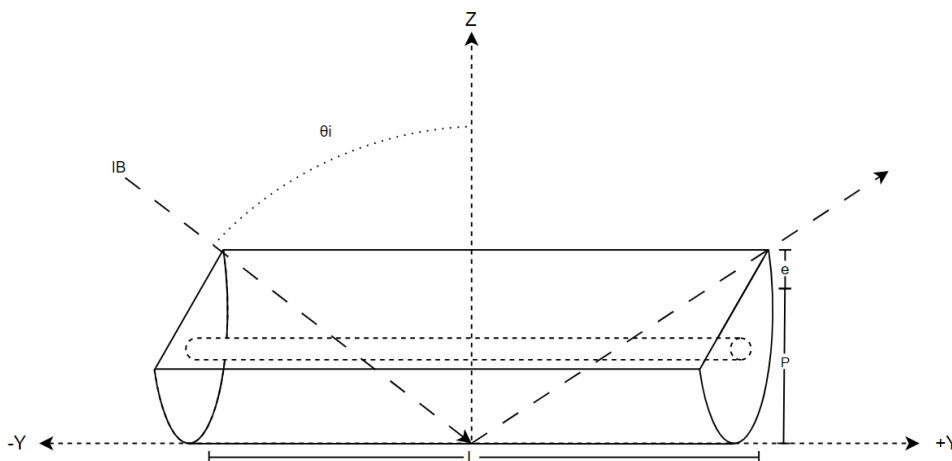


Figura 40. Representación de las pérdidas por los extremos en un colector cilindro parabólico.

Este efecto se puede representar de manera matemática considerando la longitud del colector y la distancia sumada del foco y el excedente, el cual genera una nueva altura de foco (P_a) por lo que por medio de análisis trigonométrico tenemos que:

$$P_{ext} = L - \frac{P_a * \tan(\theta)}{L} \quad (30)$$

3.3.3 Pérdidas por desenfoco

El principal motivo de realizar un seguidor solar, es el hecho de que en la tecnología de captación solar como lo es el colector cilindro parabólico, se presenta un desfase del ángulo de incidencia el cual presentara un desenfoco que afectara directamente a la eficiencia óptica del mismo.

Este efecto de desenfoco se analiza en la **Figura 41** por medio de segmentos de parábola los cuales dan pie a la creación de una recta tangente a la superficie donde inciden los rayos solares, sobre esta nueva recta se desarrolla una recta normal sobre la cual se calculará el nuevo ángulo del reyo reflejado y se evaluará si impacta en el absorbedor. Estos planos se calculan como sub función en el simulador (**Figura 42**) a partir de despejar las siguientes ecuaciones:

$$Z_i = \frac{y_i^2}{4P} \quad (31)$$

$$Z_{recta} = (m_{recta} * y_i) + B_{recta} \quad (32)$$

$$m_{recta} = \frac{y_i}{2P}; B_{recta} = -(m_{recta} * y_i) + Z_i \quad (33)$$

$$m_{nor} = -\frac{1}{m_{recta}} \quad (34)$$

Para las ecuaciones de la recta normal generada a partir del primer plano en donde impactara el rayo de luz se deduce a través de las siguientes ecuaciones:

$$Z_{nor} = m_{nor} * y_{nor} + B_{nor} \quad (35)$$

$$Z_i = -\frac{1}{m_{nor}} * y_i + B_{nor} \quad (36)$$

$$B_{nor} = Z_i + \frac{y_i}{m_{nor}} \quad (37)$$

Para obtener el ángulo del rayo reflejado en la superficie creada a raíz del plano y la normal se toma que:

$$Z_r = M_r * y_r + B_r \quad (38)$$

$$Z_i = M_r * Y_r + B_r \quad (39)$$

$$Z_i = tg(\theta_r) * y_i + B_r \quad (40)$$

$$B_r = Z_i - tg(\theta_r) * y_i \quad (41)$$

Una vez obtenido el Angulo del rayo reflejado se comprueba que este impacte en el receptor mediante la siguiente ecuación:

$$(Z - P)^2 + Y_s^2 = R_{recept}^2 \quad (42)$$

$$Z^2 - 2ZP = R_{mr}^2 - P^2 - Y_s^2 \quad (43)$$

Este barrido de enfoque se basa en la determinación del ángulo de aceptación el cual relaciona la eficiencia térmica del colector (Arasu & Sornakumar, 2007).

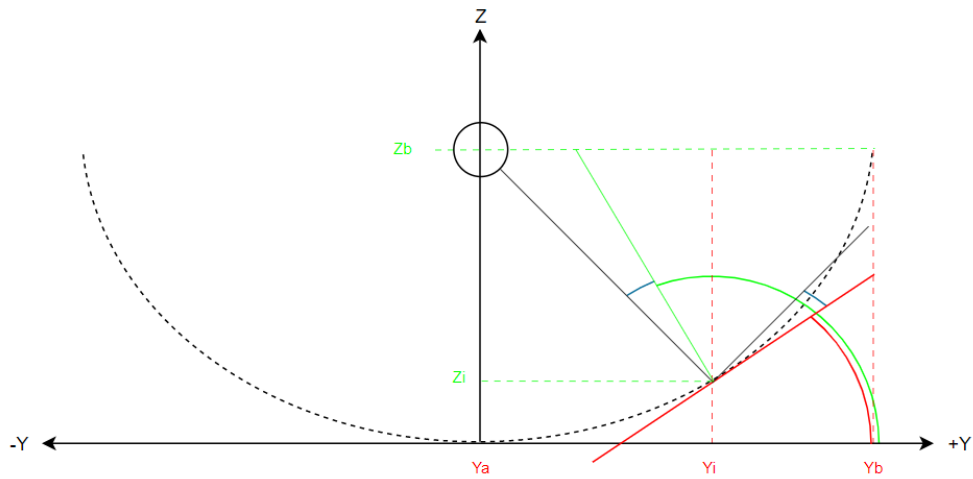


Figura 41. Representación de las pérdidas por desenfoque en un colector cilindro parabólico.

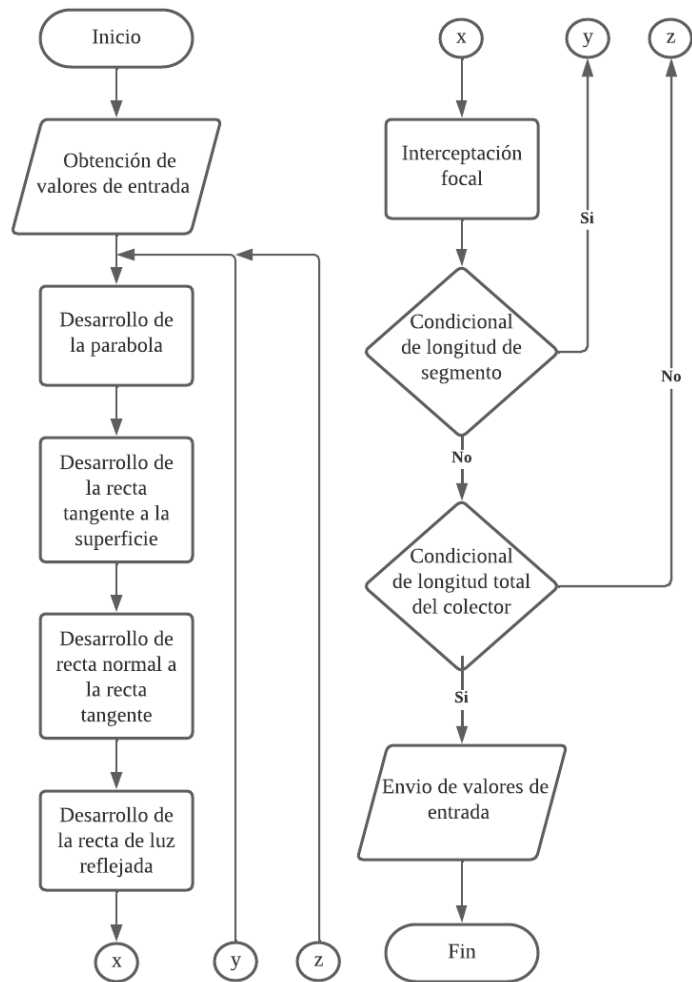


Figura 42. Descripción de la subfunción barrido de enfoque

3.3.4 Análisis térmico

Balance energético en el CCP se basa en el calor de entrada que es absorbido en el tubo y el calor perdido que presenta por los diferentes métodos de transferencia de calor dejando así solo el calor con el que podemos trabar denominado calor útil expresado en la **Figura 43** de la siguiente manera:

$$Q_{util} = Q_{absorbido} - Q_{perdidas} \quad (44)$$

Donde:

- Q_{util} = Es el calor útil total en el absorbedor al retirar las pérdidas
- $Q_{absorbido}$ = Es el calor que entra en el absorbedor
- $Q_{perdidas}$ = Es el calor que se pierde por los diversos mecanismos

Para poder analizar los flujos de energía mencionados anteriormente debemos de tener en cuenta que existen variables propias del colector que interactúan geométrica y ópticamente, quedando de la siguiente manera:

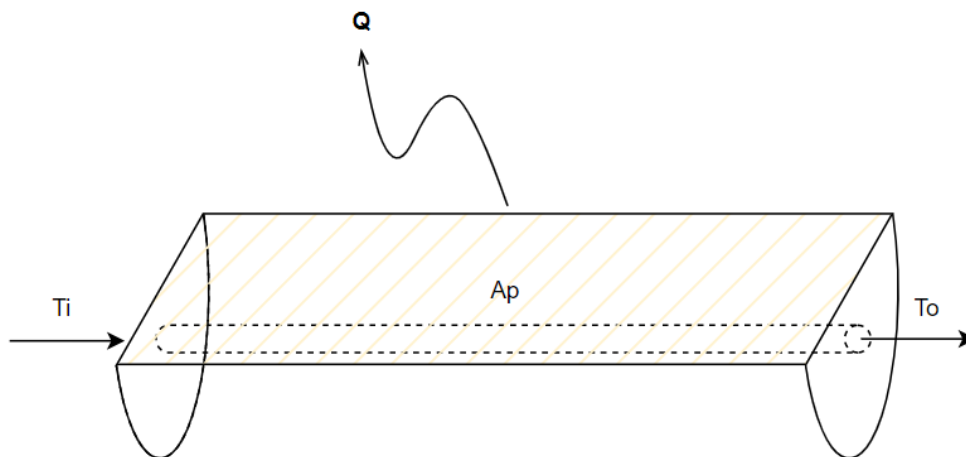


Figura 43. Esquema general de calor útil y temperaturas.

$$Q_{abs} = I_b * A_p \quad (45)$$

Dónde:

Q_{abs} : Es el calor total que entra en el área de apertura del colector.

I_b : Es la radiación total.

A_p : Es el área de apertura del colector.

Una vez entra el calor en el área de apertura este se aprovecha calentando el tubo absorbedor este lo transfiere al fluido calo portador el cual cuenta con una temperatura y calor específico para de esta manera conocer la temperatura de salida mediante el siguiente despeje:

$$Q_u = mC_p\Delta T = mC_p(T_o - T_s) \quad (46)$$

$$T_s = \frac{Q_u}{mC_p} + T_o \quad (47)$$

Para este estudio se tomó como ecuación de eficiencia térmica instantánea máxima alcanzada en el análisis de la línea 1 del banco de pruebas CCP del centro de estudios de las energías renovables, la cual demostró que fue de 26.6%, obteniendo un calor útil de 1,919 W. En la **Figura 44** se aprecia la ecuación característica del CCP, así como la incertidumbre de las mediciones.

Los análisis realizados al banco de pruebas presentaron una eficiencia óptica máxima del 26.6%, donde calcularon el coeficiente de pérdidas térmicas (1.391 °C m²/W), (Aguilar Jiménez et al., 2017) valores que conforman la ecuación utilizada para calcular el valor de la temperatura para este análisis con seguimiento solar. En el análisis del banco de pruebas se menciona que el problema de la baja eficiencia óptica es debido a problemas con la fabricación, desbalanceo, desprendimiento de lámina reflejante y desviación del sistema de seguimiento, por lo que este trabajo demostrara que los diferentes tiempos de muestreo y velocidades del motor aplicados en este sistema ayudaran considerablemente a mantener la eficiencia térmica.

Tabla 3. Especificaciones CCP

<i>Variable</i>	<i>Dimensiones</i>
<i>Longitud del receptor</i>	8 m
<i>Longitud sombreada del receptor</i>	1 m
<i>Ancho del colector</i>	1.168 m
<i>Diámetro interno del receptor</i>	0.0127 m
<i>Diámetro externo del receptor</i>	0.0158 m
<i>Diámetro interno de la cubierta de vidrio</i>	0.034 m
<i>Diámetro externo de la cubierta de vidrio</i>	0.040 m
<i>Relación de concentración</i>	23.42
<i>Absortancia del receptor</i>	0.89
<i>Emitancia del receptor</i>	0.40

Transmitancia de la cubierta de vidrio
 Emitancia de la cubierta de vidrio
 Reflectancia de lámina

0.92
 0.85
 0.91

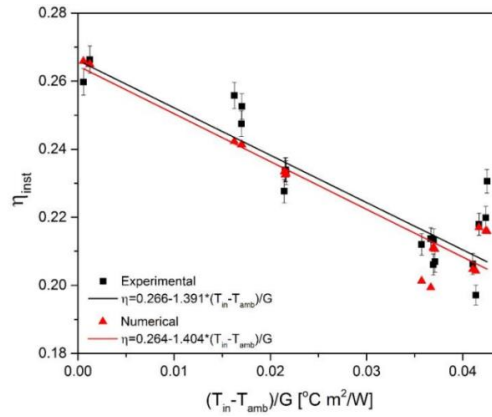


Figura 44. Grafica de valores típicos de CCP.

La ecuación característica queda de la siguiente forma:

$$\text{Experimental } \eta = 0.266 - 1.391 (T_{in} - T_{amb}) / G$$

Capítulo 4. Discusión de resultados

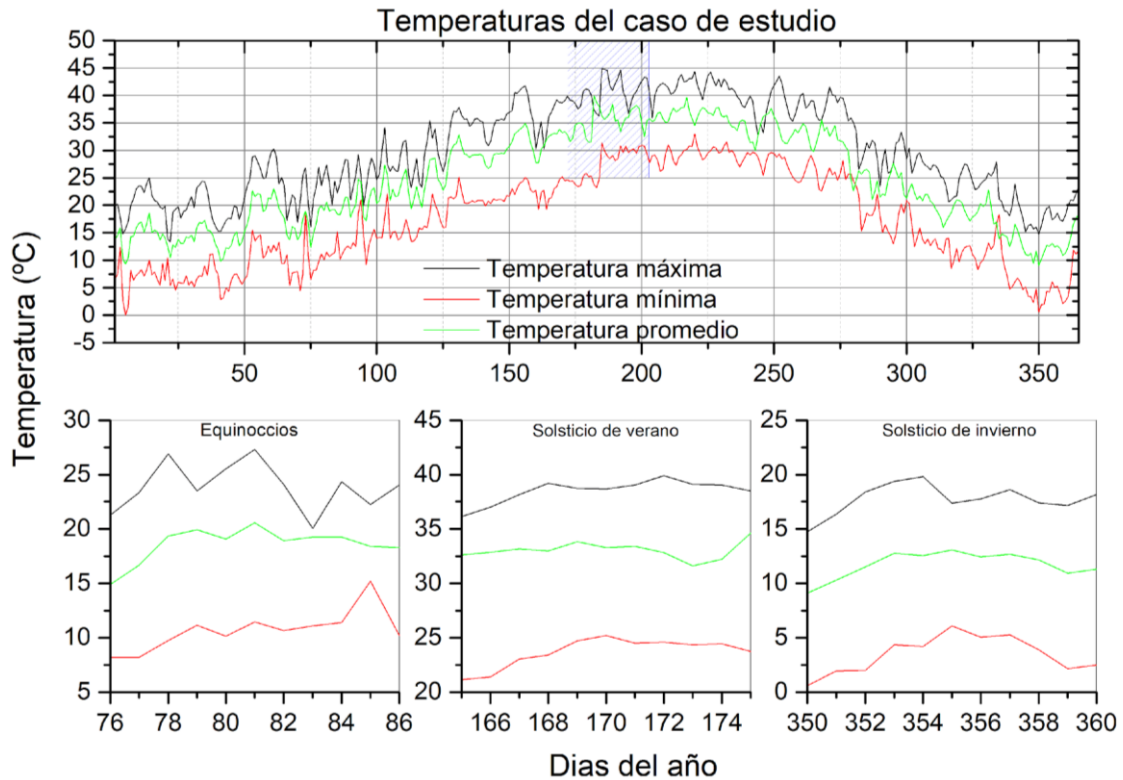


Figura 45. Temperaturas registradas en el lugar donde se realiza el estudio.

Con base en los valores contenidos del archivo TMY se rescata que, en Mexicali, Baja California, durante los últimos años los valores de temperatura en el equinoccio de primavera donde su inicio ocurre alrededor del 20 o 21 de marzo en el hemisferio norte (y alrededor del 22 de septiembre en el hemisferio sur) las temperaturas tienden a rondar los 25 grados Celsius (77 grados Fahrenheit).

Por otro lado, los solsticios de verano e invierno son los momentos en los que el Sol alcanza su posición más alta y más baja en el cielo correspondientemente durante el año. El solsticio de verano, que ocurre alrededor del 21 o 22 de junio en el hemisferio norte (y alrededor del 21 de diciembre en el hemisferio sur), marca los días más largos y las noches son más cortas y es aquí donde las temperaturas tienden a ser más altas debido a la mayor incidencia de la luz solar donde las temperaturas pueden alcanzar valores cercanos a los 40 grados Celsius (104 grados Fahrenheit) durante los días más cálidos del verano.

Así mismo, el solsticio de invierno, que ocurre alrededor del 21 o 22 de diciembre en el hemisferio norte (y alrededor del 21 de junio en el hemisferio sur), marca el inicio del invierno, periodo donde los días son más cortos y las noches son más largas. En esta época las temperaturas suelen ser más bajas debido a la menor incidencia de la luz solar y a la duración más corta del día, las temperaturas pueden descender a alrededor de los 20 grados Celsius (68 grados Fahrenheit) durante los días más fríos del invierno como se muestra en la **Figura 45**.

En resumen, durante el equinoccio de primavera, los valores de temperatura suelen ser de aproximadamente 25 grados Celsius. Mientras tanto, en los solsticios de verano e invierno, las temperaturas tienden a ser más altas (alrededor de 40 grados Celsius) y más bajas (alrededor de 20 grados Celsius), respectivamente, debido a las diferentes condiciones de luz solar y duración del día que caracterizan a estas estaciones como el promedio de la radiación que llega a esta zona geográfica y sus valores máximos registrados en el año como se denota en la **Figura 46**.

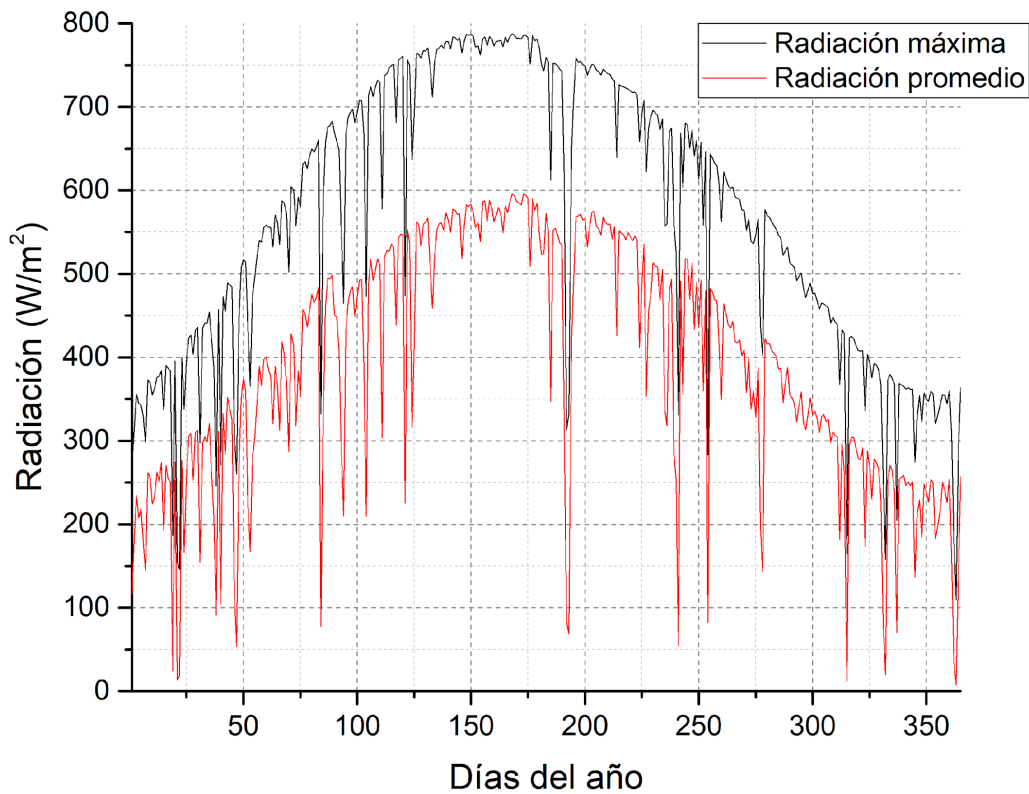


Figura 46. Radiación máxima y promedio al año del lugar.

Como validación la **Figura 47** de resultados del sistema de seguimiento solar propuesto, tenemos que como anida sub funciones dentro de él, las cuales podemos encontrar la función del reloj solar la cual nos permite obtener información de los ángulos de la geometría solar. Para esta simulación se tomó en cuenta un lapso de tiempo que abarca desde la 6 am hasta las 6 pm, obteniendo así los ángulos de altura solar, Angulo azimutal los cuales delimitan el entorno de nuestra simulación.

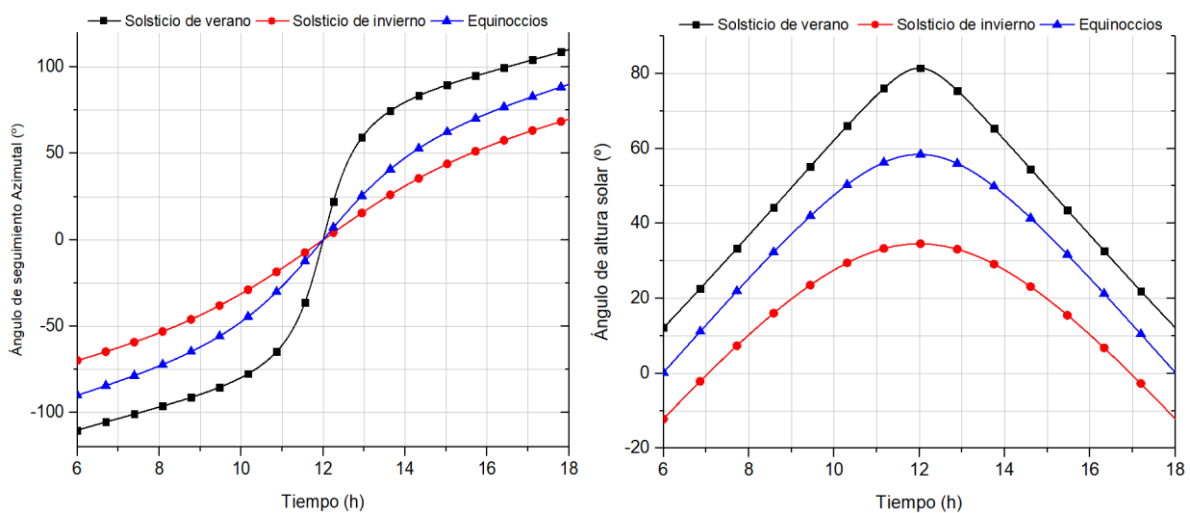


Figura 47. Ángulo azimutal (izquierda) y altura (derecha) solar evaluado en Mexicali B.C

La **Figura 47** muestran la trayectoria del sol en las coordenadas geográficas de Mexicali B.C, $32^{\circ} 43'$ de latitud norte en los días 81, 172 y 355 del año juliano los cuales hacen referencia a los equinoccios y solsticios de verano e invierno. Así mismo se muestra que la variación de ángulos entre cada estación es de 23.5° los cuales hacen referencia a los grados de inclinación de la tierra validando así los comportamientos que generan la geometría solar. Se observa que en los valores de altura solar son correspondientes a los reales ya que los resultados obtenidos de los equinoccios son valore de 58 grados, en solsticios de verano e invierno son de 83 y 35 grados correspondientemente.

La **Figura 48** muestra cómo es que se comporta el ángulo de seguimiento de Norte - Sur propuesto para el sistema, analizado en los días 81, 172 y 355 referentes al equinoccio, solsticio de verano e invierno respectivamente, reflejando así el comportamiento del ángulo azimutal y el de altura solar. Este valor del ángulo de seguimiento (NS) refleja cómo se deberá de comportar el motor en cada estación del año.

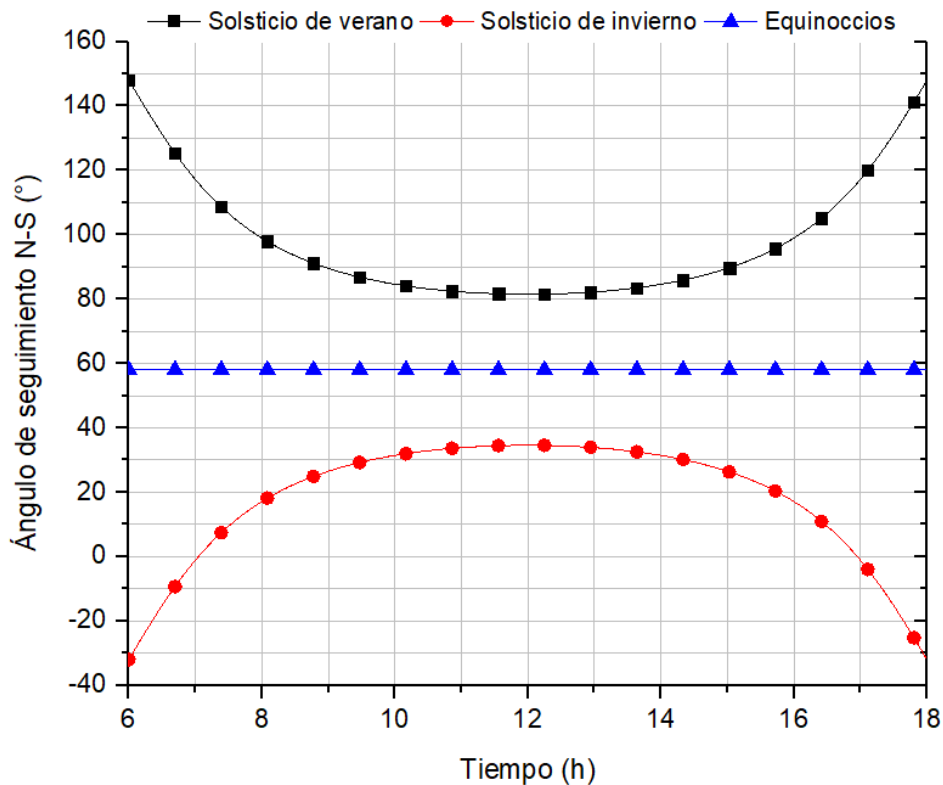


Figura 48. *Ángulo de seguimiento compuesto E-O evaluado en Mexicali B.C.*

Dentro del análisis de este trabajo se encuentra contemplado el desenfoque como parámetro que afecta la eficiencia del sistema, el desenfoque en este sistema de concentración solar analiza la desviación del punto focal en nuestro modelo óptico propuesto. Por ello, cuando el

punto focal no se encuentra perfectamente alineado con el receptor, se producen pérdidas que se traducen a una baja eficiencia. El desenfoque puede ser causado por diferentes factores, como errores en el seguimiento solar, imperfecciones en la superficie reflectante o condiciones atmosféricas adversas.

Bajo condiciones atmosféricas ideales y manejando un reflector completamente libre de imperfecciones el modelo matemático propuesto para el análisis del desenfoque revela que el hecho de disminuir un par de grados del punto focal puede tener un impacto significativo en la eficiencia del sistema.

Los valores obtenidos muestran que en general, un desenfoque de 2 grados tiene un impacto negativo en la eficiencia del sistema, lo que provoca la dispersión de la radiación solar concentrada, esto implica que el área efectiva de captación de energía disminuye, lo que reduce la cantidad de energía útil que se puede aprovechar.

Para minimizar los efectos negativos del desenfoque en la eficiencia del sistema de concentración solar, es importante mantener un seguimiento solar preciso o mantener su desfase por debajo de 2 grados de diferencia como se muestra en la **Figura 49** (a) donde incluso el hecho de tener 2.5° de desenfoque mantiene su eficiencia en aproximadamente un 70% con valores fijos de diámetro del receptor y altura del punto focal los cuales fueron los propios del sistema físico.

Como adición a este análisis de desenfoque en la **Figura 49** (b) muestra cómo se exploró la posibilidad de modificar la relación que existe entre el diámetro del receptor (D) y la altura del punto focal (P), así como las variaciones producidas en el valor del ángulo de incidencia, obteniendo así un mapeo de la eficiencia con respecto las dimensiones del receptor, destacando que la eficiencia por desenfoque es directamente proporcional a la relación D/P .

Aplicando un aumento a las dimensiones del diámetro del receptor y obteniendo una relación de 0.45 con respecto a la altura del punto focal se obtiene que aun desfasando la trayectoria del rayo solar en 5° la eficiencia se mantiene en 100%. En resumen, el aumento o reducción de la relación de las variables del receptor pueden aumentar la eficiencia, pero el hecho de tener un área de sección transversal mayor afecta a los mecanismos de transferencia de calor debido a que también el flujo volumétrico aumenta.

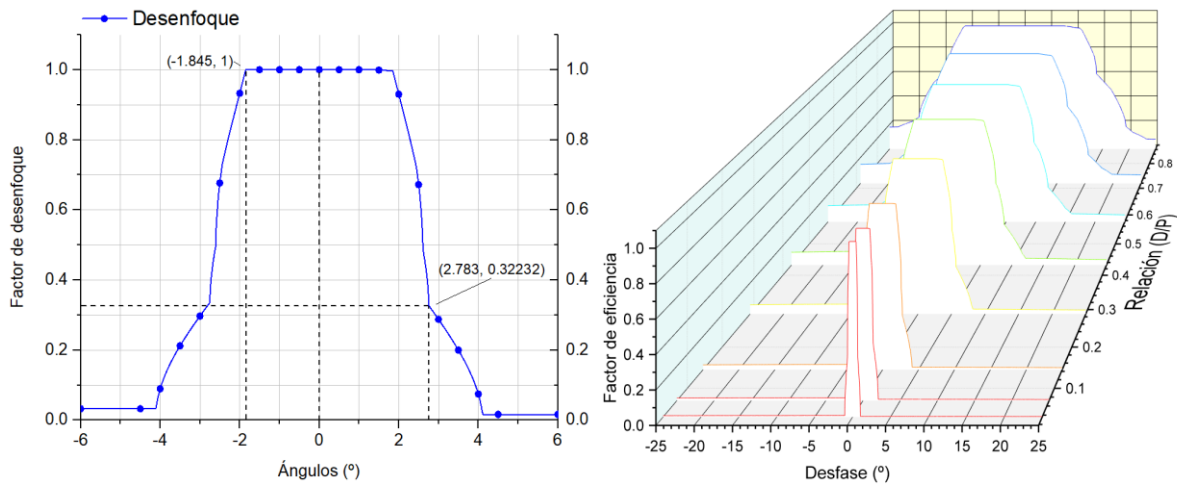


Figura 49. Gráfica de relación entre eficiencia y grados de desfase focal en un CCP.

Otro de los factores que afectan la eficiencia del sistema son las pérdidas por los extremos como se muestra en la **Figura 50** que se generan con la relación entre la posición del colector, sus dimensiones y el ángulo de seguimiento solar (NS). El modelo planteado para estas pérdidas por los extremos se analiza con valores propios del colector físico que revela que en los equinoccios la eficiencia de pérdidas en los extremos se mantiene por arriba del 80% en un periodo de tiempo de 10 horas.

Durante el verano los días son más largos lo que provoca el aumento del periodo de tiempo donde no se presentan las pérdidas por los extremos, mostrando que durante un lapso de tiempo de 12 horas la eficiencia se mantiene por encima del mismo 80%. A diferencia del verano en el invierno, los días son más cortos y esto provocará un aumento en las pérdidas por radiación en los extremos del colector manteniendo un lapso de tiempo de 8 horas con la misma cantidad de eficiencia.

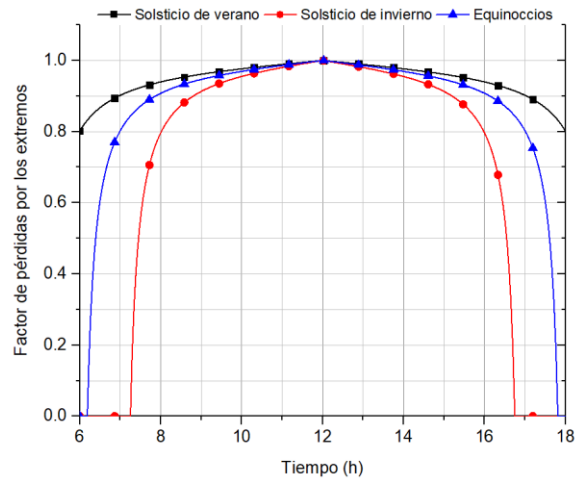


Figura 50. Gráfica de relación entre pérdidas por los extremos y horas del día en un CCP.

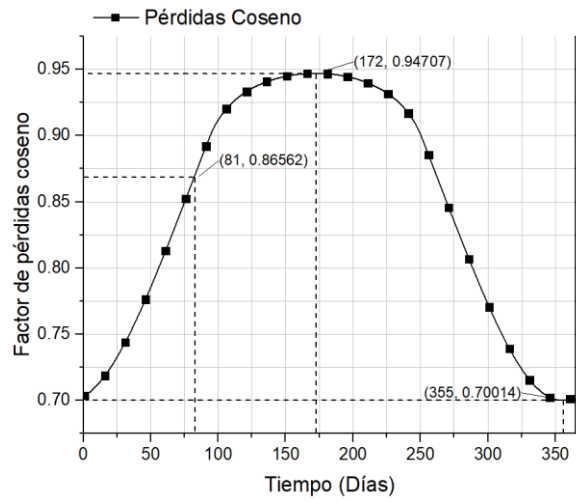


Figura 51. Promedio anual de pérdidas coseno

4.1 Equinoccio

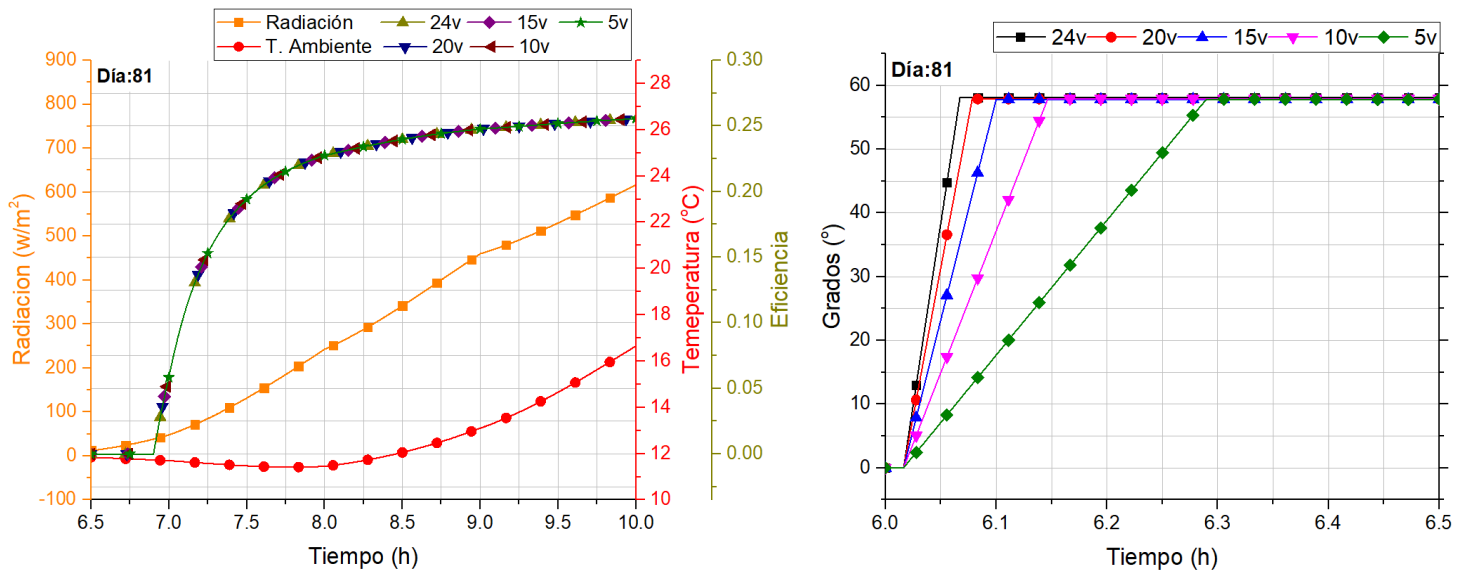


Figura 52. Comparación entre valores de eficiencia térmica (izquierda) y ángulo de seguimiento (derecha) con diferentes velocidades del día 81.

Como se muestra en la **Figura 52** donde se denota la eficiencia del sistema en las primeras horas del día y con relación con el seguimiento solar mostrado en la **Figura 48**, durante los equinoccios el ángulo de seguimiento NS no cambia significativamente a lo largo del día. Esto se debe a que el Sol se encuentra cerca del ecuador celeste y su trayectoria aparente en el cielo es prácticamente horizontal manteniendo un valor de 58° aproximadamente.

Por lo anterior se afirma que, en cuanto al tiempo de muestreo y la velocidad del motor, estas variables no son tan relevantes cuando se utiliza el seguimiento solar en esta época del año en comparación con los solsticios de verano e invierno, por lo que la eficiencia en la captación de energía solar siempre es la más óptima. La variación del ángulo de seguimiento NS es prácticamente imperceptible por lo que es posible utilizar tiempos de muestreo más largos contemplando hasta las 2 horas y aplicando velocidades en el motor de hasta 5 volts, esta configuración de muestreo-velocidad de bajo consumo energético no afectar significativamente la eficiencia para estas estaciones del año.

En cuanto a las temperaturas la **Figura 53** resalta que solo los muestreos mayores a 1 hora tienen pérdidas, por lo que muestreos menores aprovechan todo el calor de entrada del colector, entregando hasta 31° Celsius a la salida del sistema contemplando las consideraciones iniciales para este análisis.

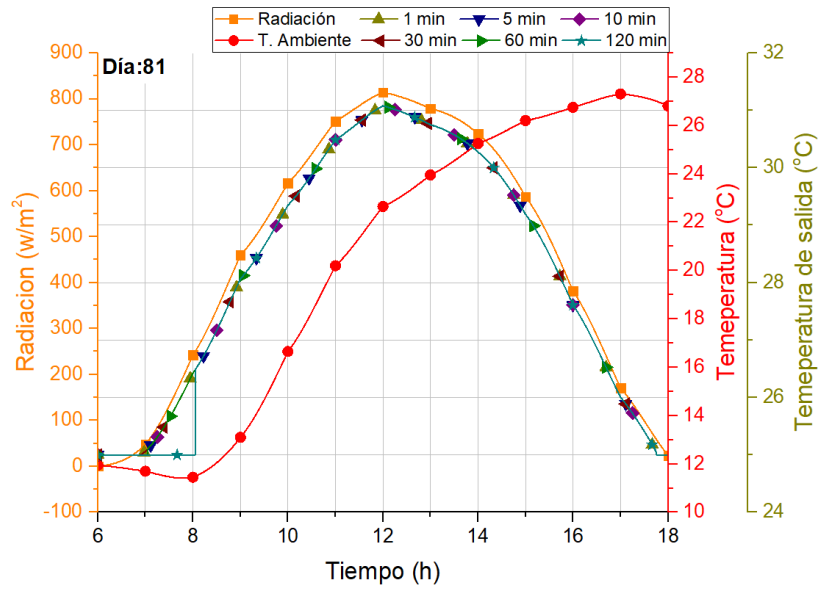


Figura 53. Comparación de temperatura de salida del colector con diferentes muestreos del día 81.

4.2 Solsticio

4.2.1 Verano

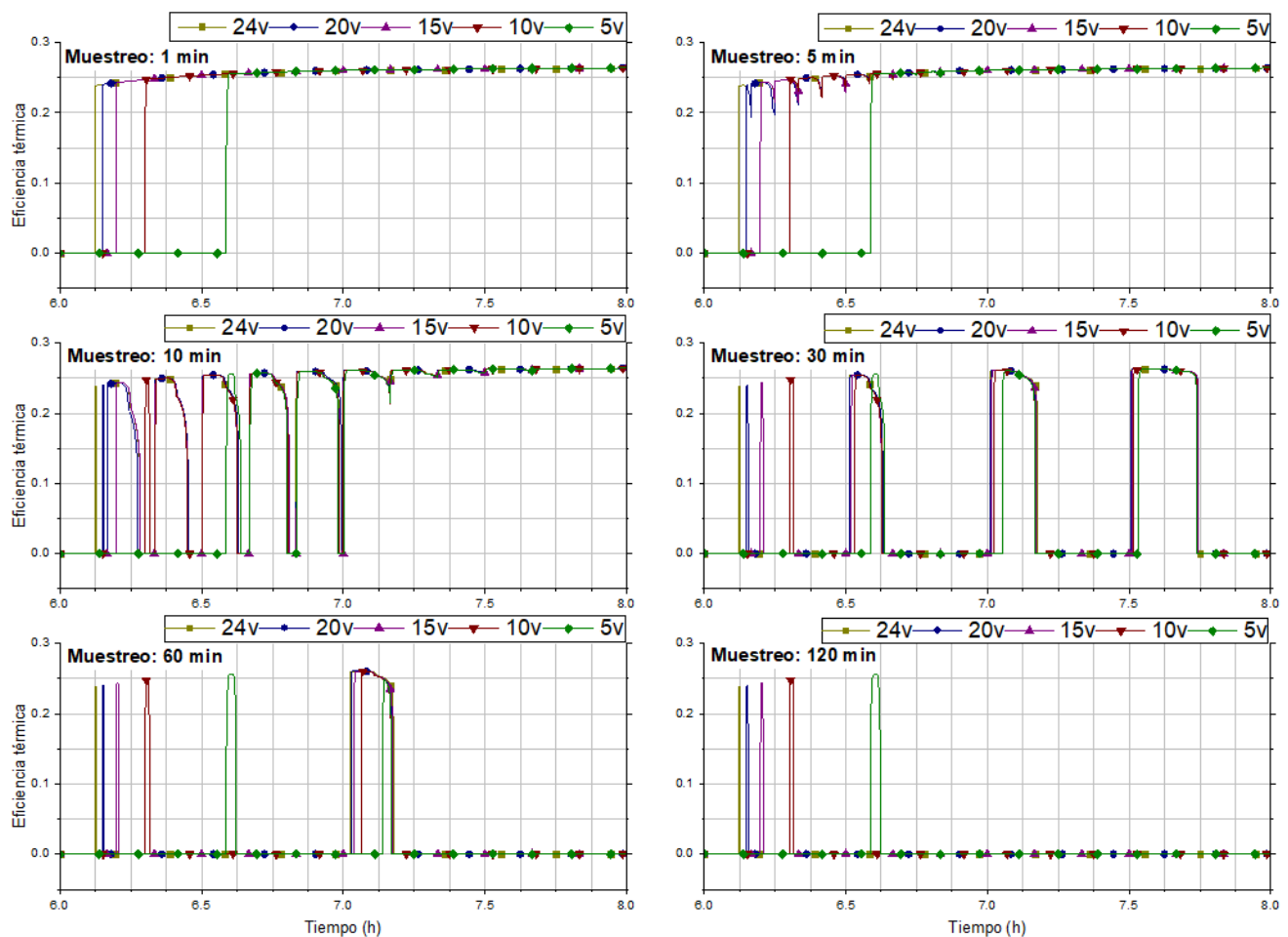


Figura 54. Comparación entre valores de eficiencia térmica con diferentes velocidades y muestreos del día 172.

Durante el día 172 del año, que corresponde al solsticio de verano, el ángulo del sol experimenta cambios significativos a lo largo del día. En esta fecha, el sol alcanza su punto más alto en el cielo durante el año, lo que implica que su posición varía considerablemente a medida que transcurren las horas. Es por eso que el tiempo de muestreo y la velocidad de seguimiento son aspectos altamente importantes en esta ocasión.

Para optimizar la eficiencia en el seguimiento solar durante el solsticio de verano, se puede utilizar un tiempo de muestreo de 5 minutos. Esto significa que se realizarán ajustes en la posición del colector con mayor frecuencia para mantenerlo alineado y evitar las pérdidas por desenfoque ya que estas como se mencionaba en la **Figura 49** con poco más de 2° de desfase de su ángulo óptimo puede perder más del 70% de eficiencia .

Además, este muestreo se debe realizar con una velocidad de seguimiento de 24 volts, ya que como se ilustra en la **Figura 55** (b) se puede tardar hasta 40 minutos en llegar al valor del ángulo de seguimiento NS .Al utilizar un muestreo de 5 minutos a 24 volts, es posible mantener una eficiencia por encima del 95% esto se debe a que los ajustes frecuentes permiten captar la mayor cantidad posible de energía solar incidente y aprovechando todo el calor útil del sistema.

Es importante tener en cuenta que la velocidad de seguimiento también tiene un impacto en las temperaturas ya que la configuración de muestreo-velocidad de 5 minutos a 24 volts mantiene las temperaturas instantáneas constantes entregando hasta 32° Celsius a la salida del sistema. A medida que la velocidad disminuye, las temperaturas tienden a descender, esto se debe a que un movimiento más lento produce mayores pérdidas ópticas y la generación de calor dentro del absorbedor se ve mermado.

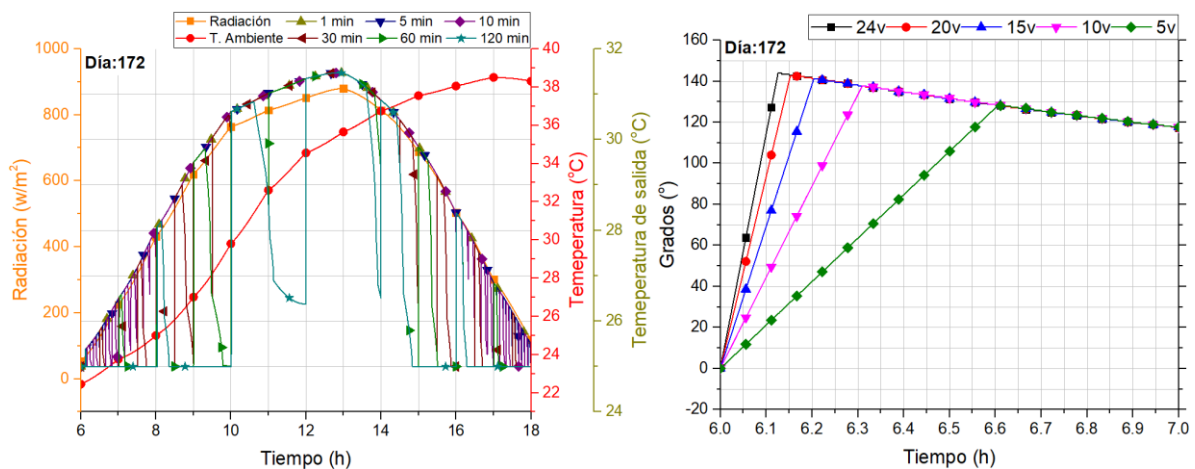


Figura 55. Comparación de temperatura de salida del colector y comparación de diferentes velocidades del día 172.

4.2.2 Invierno

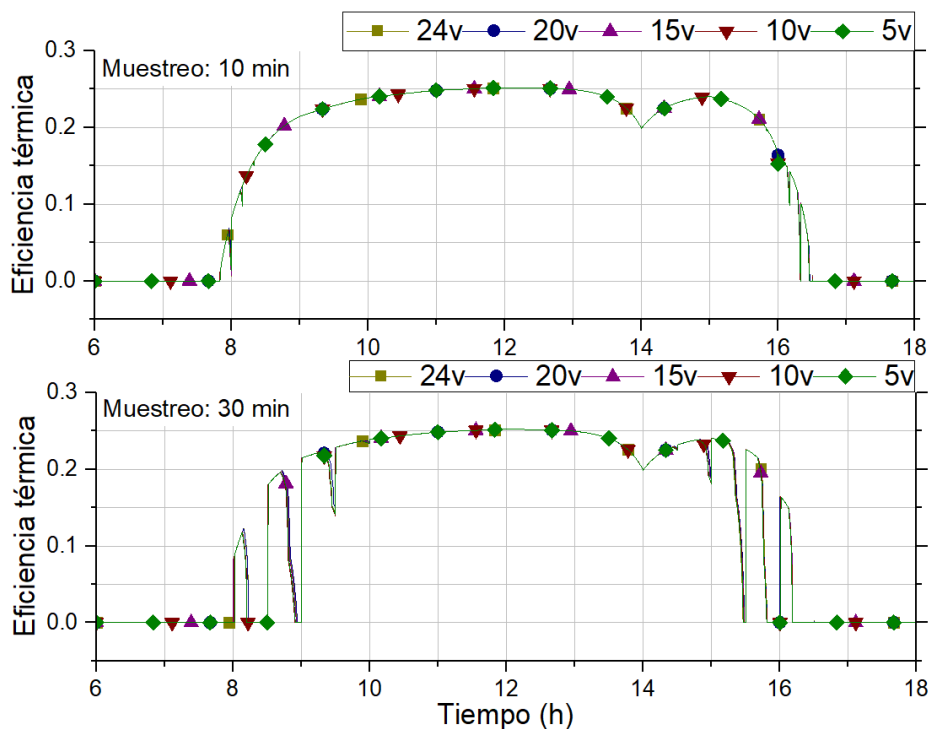


Figura 56. Comparación entre valores de eficiencia térmica (izquierda) y ángulo de seguimiento (derecha) con diferentes velocidades del día 355.

En el día 355 del año, que corresponde al solsticio de invierno, el sol tiene cambios menores en su trayectoria a lo largo del día. En esta fecha, el sol alcanza su punto más bajo en el cielo durante el año, lo que implica que su posición varía relativamente poco a medida que transcurren las horas. En este contexto, el tiempo de muestreo se vuelve altamente importante, mientras que la velocidad de seguimiento puede tener variaciones.

Para optimizar la eficiencia en el seguimiento solar durante el solsticio de invierno, se puede utilizar un tiempo de muestreo de 10 minutos como se muestra en la **Figura 56** tiempo suficiente en el que el ángulo de seguimiento NS será prácticamente igual al ángulo óptimo, indicando que este será igual en términos de eficiencia a muestreos de 5 y 1 minuto en donde no afecta el desenfoque.

En cuanto a la velocidad de seguimiento, se puede utilizar una velocidad de hasta 5 voltios. Esta velocidad de bajo consumo permite un movimiento más lento del colector, con la cual el área de apertura que alinea adecuadamente dados los cambios en la trayectoria del sol y el ángulo de seguimiento NS durante el solsticio de invierno. Al ajustar el ángulo con una velocidad más baja, se puede mantener una eficiencia por encima del 95% .

Es importante mencionar que las temperaturas solo se ven afectadas después de tiempos de muestreo de más de 30 minutos y una velocidad de 5 voltios. Esto significa que solo después de un tiempo prolongado en el ajuste del seguimiento las temperaturas pueden comenzar a tener decrementos. En este escenario, es importante remarcar que se analizó un día con condiciones atmosféricas poco ideales para simular un entorno más real como se muestra en la **Figura 57**.

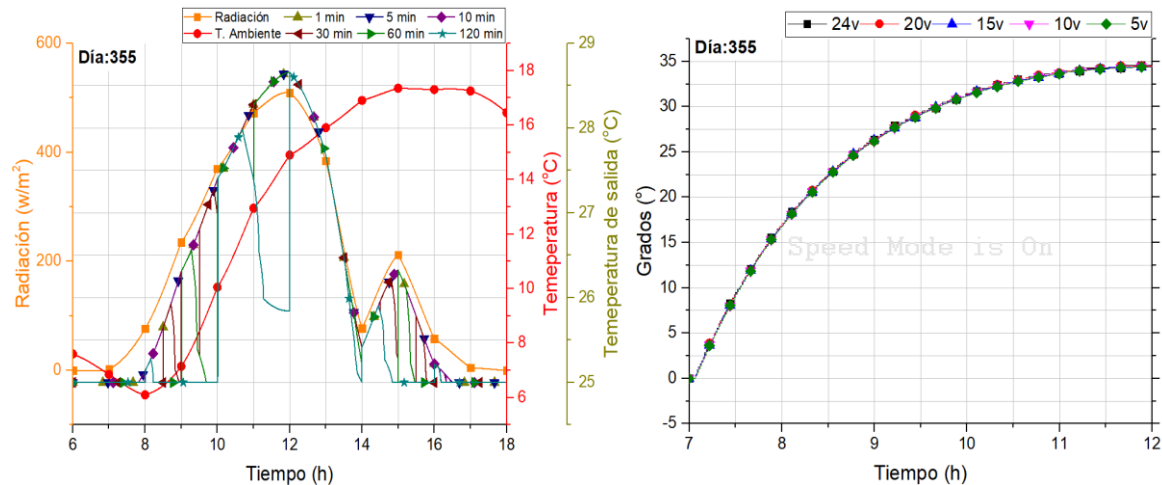


Figura 57. Comparación de temperatura de salida del colector con diferentes muestreos del día 355

4.3 Resultados anuales

Se obtuvieron resultados promedios anuales para poder tener un panorama más amplio de lo que pasaría con ciertas variables del sistema en lapsos de tiempo más largos y con diferentes condiciones meteorológicas, por ello dentro de los resultados anuales obtenidos se pudo observar que el uso de dos bloques de muestreo, rápido y lento, generó variaciones en los porcentajes de error calculados los cuales fueron contrastados con la velocidad del motor controlados por su voltaje.

En la región, se cuenta en promedio con de $5 \text{ kW}/\text{m}^2$, por lo que para nuestro sistema de 4 colectores con un área de apertura total de 9.33 m^2 idealmente debería de contar $17,027.25 \text{ kW}$. El cambio de velocidades menores a los 10 volts y tiempos de muestreo mayores a 1 hora generan un decremento considerable en la energía de entrada de nuestro sistema, así mismo se presentan casos en donde la energía eléctrica promedio consumido no suponen un cambio en sus valores mostrados en la **Tabla 4**. Por lo anterior se destaca que los tiempos de muestreo del primer bloque solo cuentan con una diferencia menor 0.2531% de error a diferencia del segundo bloque que se extiende pasando por un 28.8208% de error.

Tabla 4. Promedios anuales de calor y consumo eléctrico

Muestreo rápido Voltaje	Energía de entrada (kW)			Calor útil (W)			Consumo promedio (kWh)		
	1 min	5 min	10min	1 min	5 min	10min	1 min	5 min	10min
24 v	13669.98	13669.54 2	13635.37 8	932.178 0	929.161 8	926.8632	0.0017	0.0017	0.0017
20 v	13669.98	13669.98	13634.06 4	932.178 0	929.167 4	926.7527	0.0017	0.0017	0.0017
15 v	13670.41 8	13669.54 2	13631.43 6	932.186 4	929.162 5	926.5806	0.0016	0.0016	0.0016
10 v	13670.41 8	13669.54 2	13627.93 2	932.190 4	929.153 2	926.3665	0.0016	0.0016	0.0016
5 v	13670.41 8	13669.54 2	13623.11 4	929.197 3	929.142 5	926.0359	0.0013	0.0013	0.0013
Muestreo lento Voltaje	Energía de entrada (kW)			Calor útil (W)			Consumo promedio (kWh)		
	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min
24 v	12969.61 8	11672.7	9730.17	881.925 6	793.882 1	661.7293	0.0017	0.0016	0.0014
20 v	12956.47 8	11645.54 4	9730.17	881.035 2	792.032 7	661.7293	0.0016	0.0016	0.0014
15 v	12933.26 4	11607.87 6	9670.602	879.466 8	789.465 8	657.6622	0.0016	0.0015	0.0014
10 v	12906.98 4	11559.25 8	9604.464	877.693 7	786.170 9	653.1405	0.0016	0.0015	0.0013
5 v	12865.37 4	11481.73 2	9475.254	874.878 9	780.910 6	644.3647	0.0013	0.0013	0.0011

La duración del tiempo de muestreo influye directamente en la precisión del valor del ángulo de seguimiento solar. Los datos arrojan que contando con un muestreo de 5 minutos tan solo se genera un 0.0032% de error en comparación con el valor de un muestreo de 1 minuto considerado para este experimento el más óptimo ya que el sol se mueve 1 grado cada 4 minutos.

Se rescata que el tener un muestreo de 10 minutos genera un error de 0.2531% por . Así mismo este segundo muestreo indica una discrepancia ligeramente mayor en comparación con el valor

del ángulo de seguimiento, sin embargo, el consumo del motor baja si se aplica una velocidad de 15 v provocando que se tengo un menor consumo, pero una generación prácticamente igual a la real. Por ello los muestreos con valores de 5 y 10 minutos aplicados con una velocidad a 15v son más óptimos para la relación generación-consumo.

Por otro lado, en la **Tabla 4** se muestra que en los muestreos iguales o mayores a 30 minutos generan un error de 5.1233%, intervalos de 60 minutos un 14.6107% y finalmente, con un tiempo de muestreo de 120 minutos, se obtiene un porcentaje de error aún mayor a 28.8208% en donde prácticamente el concentrador perdería el enfoque, dando como resultado que apenas y aumentara 0.035° Celsius. Este porcentaje indica una discrepancia sustancial entre las mediciones y el valor real, además de que se debe contemplar la influencia de factores externos durante ese período de tiempo.

Tabla 5. Promedios anuales de temperatura

Muestreo rápido		Temperatura de salida Máxima (°C)			Temperatura de salida Mínima (°C)			Temperatura de salida Promedio (°C)		
		1 min	5 min	10min	1 min	5 min	10min	1 min	5 min	10min
Voltaje	24 v	28.876 0	28.876 1	28.864 6	25.048 2	25.048 2	25.0482	27.833 0	27.833 0	27.826 0
	20 v	28.876 0	28.876 4	28.862 7	25.048 2	25.048 2	25.0482	27.833 0	27.833 0	27.825 6
	15 v	28.875 9	28.876 5	28.862 3	25.048 2	25.048 2	25.0482	27.833 0	27.833 0	27.825 1
	10 v	28.876 0	28.876 1	28.861 1	25.048 2	25.048 2	25.0482	27.833 1	27.832 9	27.824 4
	5 v	28.876 0	28.876 3	28.859 1	25.048 2	25.048 2	25.0482	27.833 1	27.832 9	27.823 4
Muestreo lento		Temperatura de salida Máxima (°C)			Temperatura de salida Mínima (°C)			Temperatura de salida Promedio (°C)		
		30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min	30 min	60 min	120 min
Voltaje	24 v	28.768 8	28.710 5	28.674 8	25.036 3	25.018 7	25.0032	27.688 9	27.420 5	27.017 6
	20 v	28.767 5	28.709 7	28.674 8	25.036 2	25.019 0	25.0032	27.686 2	27.414 9	27.017 6
	15 v	28.765 6	28.709 0	28.676 6	25.034 7	25.018 4	25.0031	27.681 5	27.407 0	27.005 2

10 v	28.764 4	28.706 3	28.676 4	25.034 6	25.018 0	25.0030	27.676 0	27.397 0	26.991 4
5 v	28.761 9	28.695 3	28.676 3	25.034 1	25.017 0	25.0028	27.667 5	27.381 0	26.964 6

El tiempo de muestreo y la velocidad del motor son factores importantes en el seguimiento solar y pueden tener un impacto en las temperaturas generadas. Al considerar promedios de temperatura anuales, se observan diferentes resultados según el tiempo de muestreo y la velocidad del motor utilizados.

Como se muestra en la **Figura 58**, cuando se utilizan muestreos de entre 5 y 10 minutos con velocidades de 24 a 20 voltios, se puede lograr una eficiencia óptima en la captación de energía solar. Estos intervalos de tiempo permiten realizar ajustes frecuentes en el ángulo de seguimiento NS en relación con la trayectoria real del sol, lo que maximiza la captación de energía. En consecuencia, se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 28 grados Celsius, lo que indica una alta eficiencia en la conversión de energía solar en calor.

Sin embargo, si se opta por muestreos de 30 minutos, se puede experimentar una pérdida de eficiencia. En promedio, se puede llegar a perder hasta un grado en la temperatura anual. Esto se debe a que los intervalos más largos entre ajustes en el ángulo de seguimiento pueden ocasionar una menor captación de energía solar durante ciertos periodos, lo que afecta la eficiencia del sistema.

Es importante destacar que, independientemente de la velocidad del motor utilizado, los muestreos de más de 1 hora y media (100 minutos) prácticamente resultan en la pérdida de toda eficiencia. En estos casos, los intervalos de tiempo tan largos entre ajustes en el ángulo de seguimiento NS reducen significativamente la captación de energía solar. Como resultado, se generan incrementos mínimos en las temperaturas, ya que la eficiencia del sistema se ve afectada de manera importante.

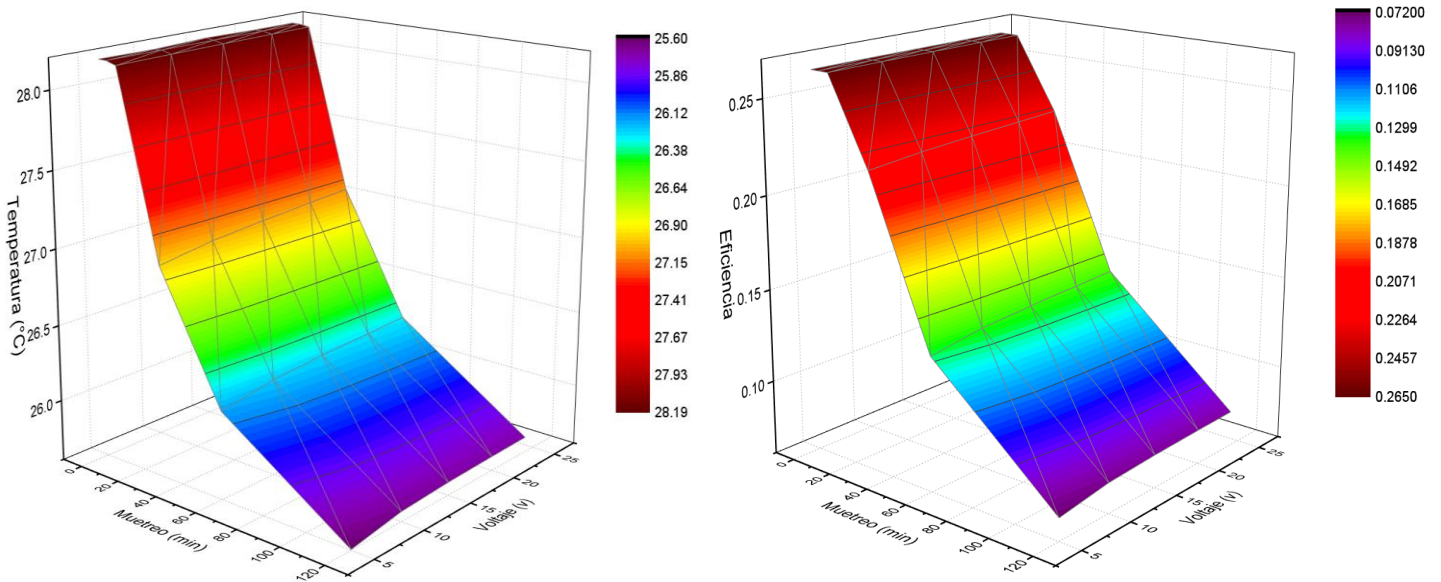


Figura 58. Temperatura de salida y Eficiencia térmica alcanzada con variaciones de velocidad y muestreo

Los promedios de energía consumidos anualmente como se muestra en la **Figura 59** pueden variar según el tiempo de muestreo y la velocidad del motor utilizados en el sistema. Cuando se realizan muestreos más frecuentes, entre 5 y 10 minutos, a velocidades de 24 a 20 voltios, se consume aproximadamente 0.0017 kilovatios hora (kWh) de energía. Las configuraciones presentadas se aplican a una simulación de 12 horas y permite mantener valores de calor útil cercanos a 1 kW.

Sin embargo, cuando se utilizan muestreos de más de 30 minutos, se puede experimentar una pérdida promedio anual de hasta el 12% del calor útil total. Esto se debe a que los muestreos son menos frecuentes afectando la captación de energía y por consecuencia hacen que se reduzca la cantidad de calor útil. A medida que se prolonga el tiempo de muestreo a 60 minutos, las pérdidas promedio anuales del calor útil total aumentan de manera considerable, en este caso, se puede observar una pérdida de hasta el 22% en comparación con la configuración de muestreo de 5 a 10 minutos. Además, si se continúa con un muestreo de más de 120 minutos, la pérdida promedio anual del calor útil total puede llegar hasta el 36%.

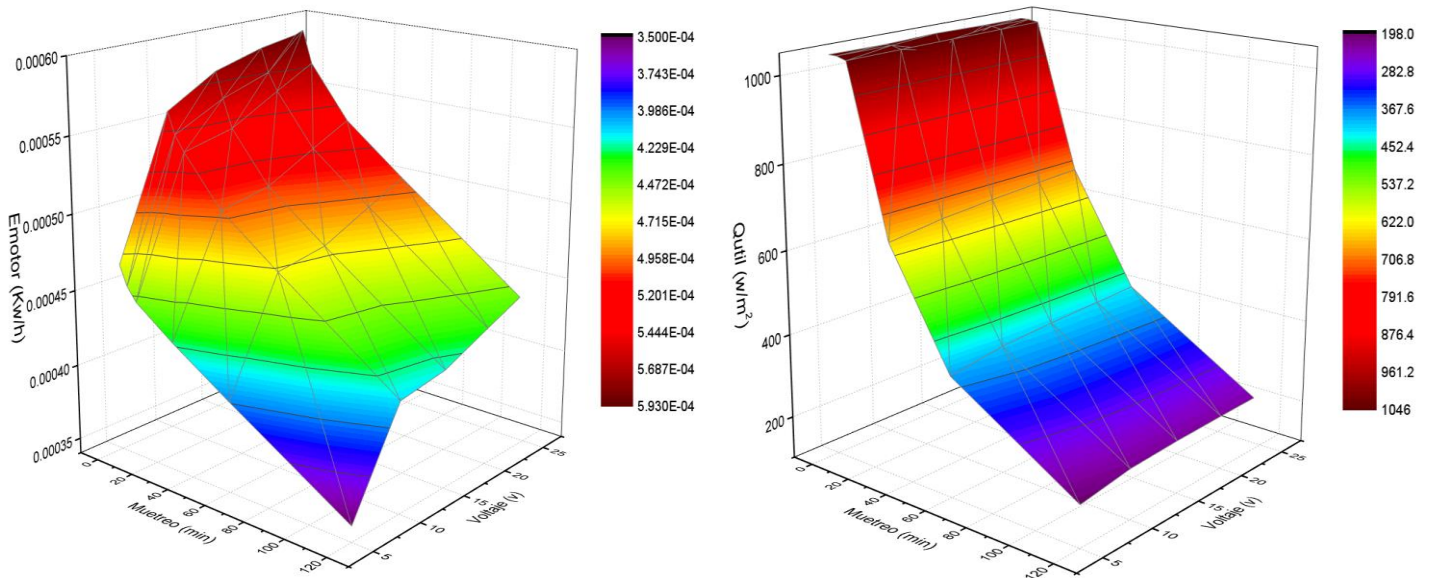


Figura 59. Energía consumida y Calor útil alcanzados con variaciones de velocidad y muestreo.

Los promedios del factor de enfoque ilustrados en la **Figura 60** pueden variar según el tiempo de muestreo y la velocidad del motor utilizados en el sistema. Cuando se realizan muestreos más frecuentes, entre 5 y 10 minutos, a velocidades de 24 a 20 voltios, puede mantener un factor de enfoque promedio de 0.94, y manteniendo el promedio de las pérdidas coseno en valores en su factor de aproximadamente 0.83.

Sin embargo, al utilizar muestreos de 30 minutos, se puede experimentar una pérdida promedio de eficiencia de hasta un 35% en su factor de enfoque, lo que indica que los muestreos de largos intervalos de tiempo provocan ajustes menos precisos y por ellos más pérdida de eficiencia. Si se prolonga el tiempo de muestreo a 60 minutos, las pérdidas promedio de eficiencia aumentan aún más, llegando hasta 50% en comparación con la configuración de muestreo de 5 a 10 minutos con velocidades de entre 15 a 24 voltios. Esto implica una disminución significativa en el factor de enfoque y, por lo tanto, una menor eficiencia en la captación de energía.

Además, si se continúa con un muestreo de más 120 minutos y con velocidades menores de 5 voltios, se puede experimentar una pérdida promedio de eficiencia de hasta 60%. En esta configuración, el factor de enfoque se ve aún más afectado ya que para nuestro sistema el solo echa de sdesfasar2 grados implica mandar el factor de enfoque en valores menores s a 0.1 como se muestra en la **Figura 49**.

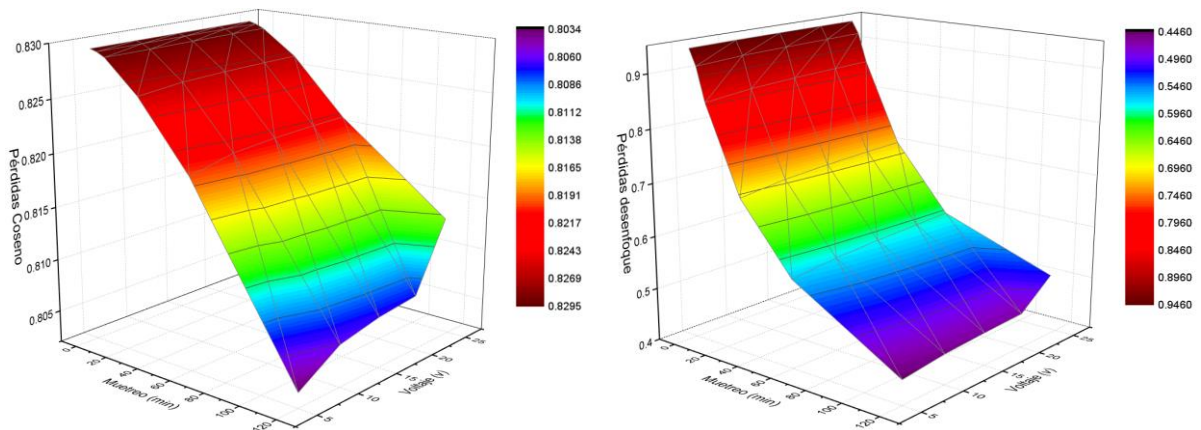


Figura 60. Pérdidas coseno y desenfoque alcanzadas con variaciones de velocidad y muestreo

Por los resultados obtenidos en la simulación de los días típicos de cada estación del año se puede resumir que cada uno de ellos puede tener una configuración personalizada dentro de la programación de nuestro sistema de seguimiento solar y con ello lograr obtener la máxima eficiencia térmica en cualquier periodo del año, por lo que se proponen ecuaciones las cuales agrupan en bloques de días del año quedando de la siguiente manera:

$$f(x) = \begin{cases} 2 \text{ hrs @ } 5v & \text{si } x < 81 \text{ ó } 173 < x < 265 \\ 5 \text{ min @ } 24v & \text{si } 82 < x < 172 \\ 10 \text{ min @ } 5v & \text{si } 266 < x < 355 \end{cases}$$

Capítulo 5. Trabajo de campo

En los capítulos 3 y 4 se realizó y analizó una propuesta del sistema de seguimiento solar basado en ecuaciones para concentradores cilindro parabólico con eje norte-sur con el fin de optimizar la eficiencia del sistema, reduciendo el consumo de los motores y minimizando las pérdidas ópticas geométricas del concentrador. Es por ello que con los resultados arrojados por el estudio teórico realizados en estado estable se propone realizar el prototipo del sistema de seguimiento solar por medio de electrónica de bajo costo para así comprobar la hipótesis inicial y comparar los resultados teóricos con los experimentales.

Para realizar el análisis experimental se toma un sistema complejo el cual contempla el subsistema de seguidor solar, banco de colectores cilindro parabólico y subsistema SCADA para adquisición y manipulación de datos. Así mismo el banco de pruebas de colectores cilindro parabólicos tiene interconectados un tanque de almacenamiento, intercambiadores de calor y un sistema de sensores como se muestra en la **Figura 61**.

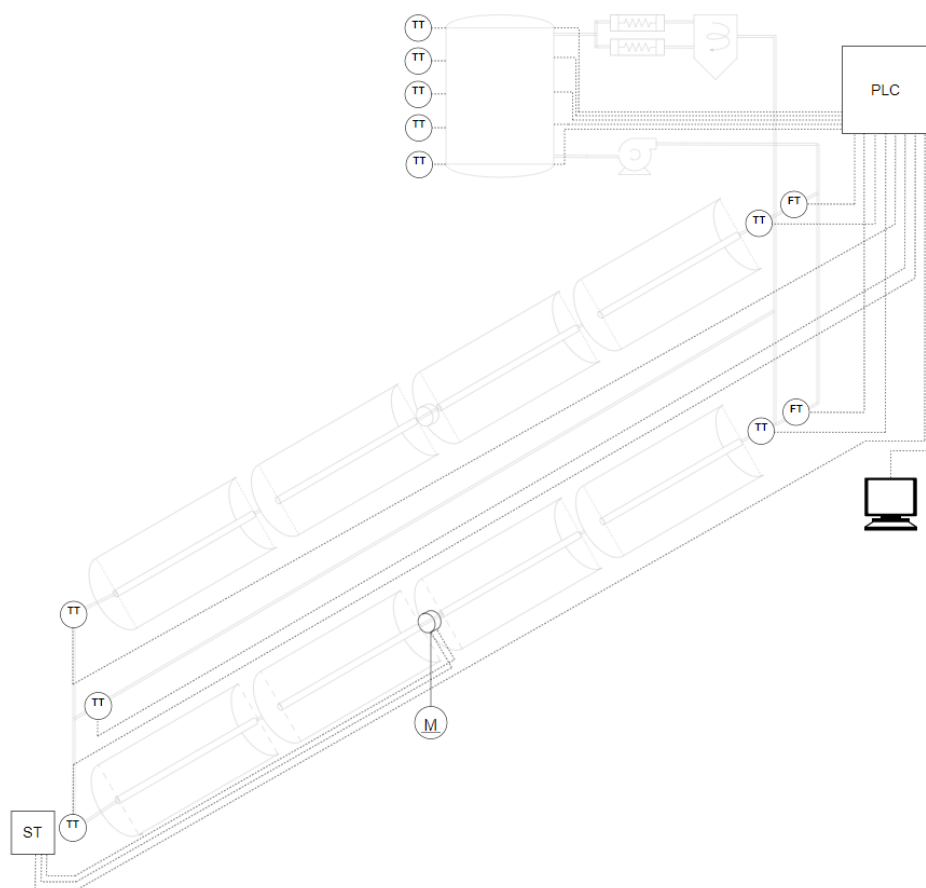


Figura 61. Esquemático del sistema de sensores.

Subsistema de seguimiento solar: El sistema de seguimiento solar consta de dispositivos electrónicos de bajo costo programados en la plataforma libre (Arduino) interconectados con componentes electrónicos como módulos de reloj, convertidores de voltaje (BUCK) y semiconductores que en conjunto con módulos de relevadores pueden controlar el movimiento del CCP.

Sistema de calentamiento: El sistema de calentamiento de agua por medio de los colectores cilindro parabólico consiste en dos líneas paralelas de 4 colectores individuales conectados en serie que tienen unión por medio de tubería Steel a los intercambiadores de calor y consecuentemente al termotanque en donde se almacena el agua caliente.

El sistema de tuberías está controlado por válvulas de paso manuales que con las cuales podemos provocar el sentido del flujo del agua en una dirección determinada haciendo que pase por uno o ambas líneas de colectores hasta llegar al termotanque. En este trabajo se utilizó la línea inferior para realizar el análisis por lo que las válvulas 1 y 3 se cerraron provocando el paso del agua por la línea superior no activa siguiendo por la línea inferior en la cual se produce el calentamiento y pasando por la válvula 2 que está abierta para dirigir el fluido al termotanque como se muestra en la **Figura 62**.

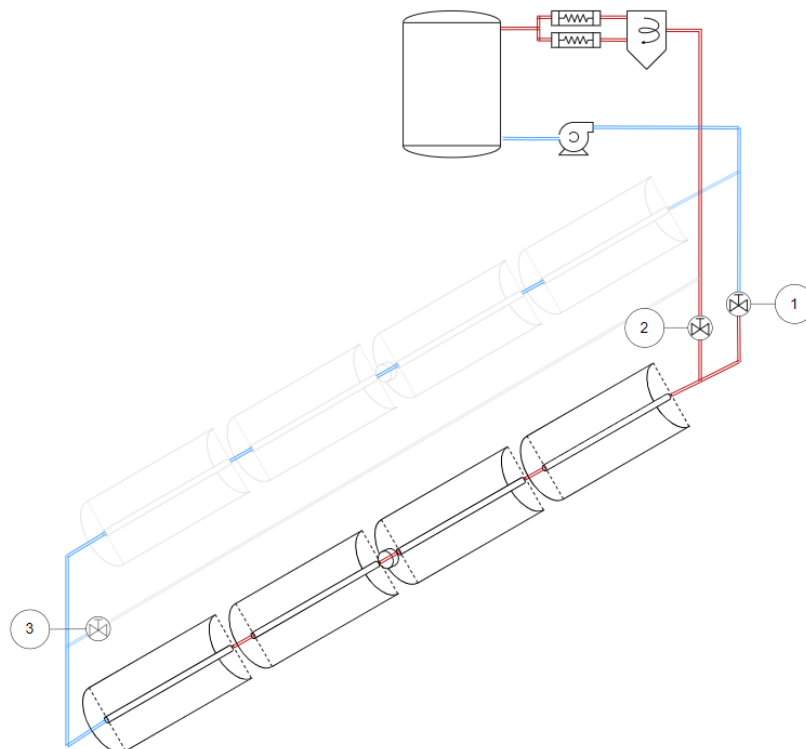


Figura 62. Esquemático de la tubería del sistema.

Subsistema SCADA:

El sistema SCADA mostrado en la **Figura 63** sirve como una herramienta de automatización y control, que supervisa, recopila y analiza datos generando gráficos del sistema consiste en una red de sensores de temperatura y flujo conectados a un PLC cuya función decodificar la información y transmitirlos a una computadora central por de protocolo MODBUS TCP/IP.

El sistema de adquisición de datos está instalado en la computadora central del laboratorio en la cual se tiene el programa TIA PORTAL V13 que contiene la información de los diversos proyectos instrumentados por medio de componentes SIEMENS y mostrados de manera grafica por medio de un HMI con el cual podemos monitorear y modificar los parámetros del sistema.

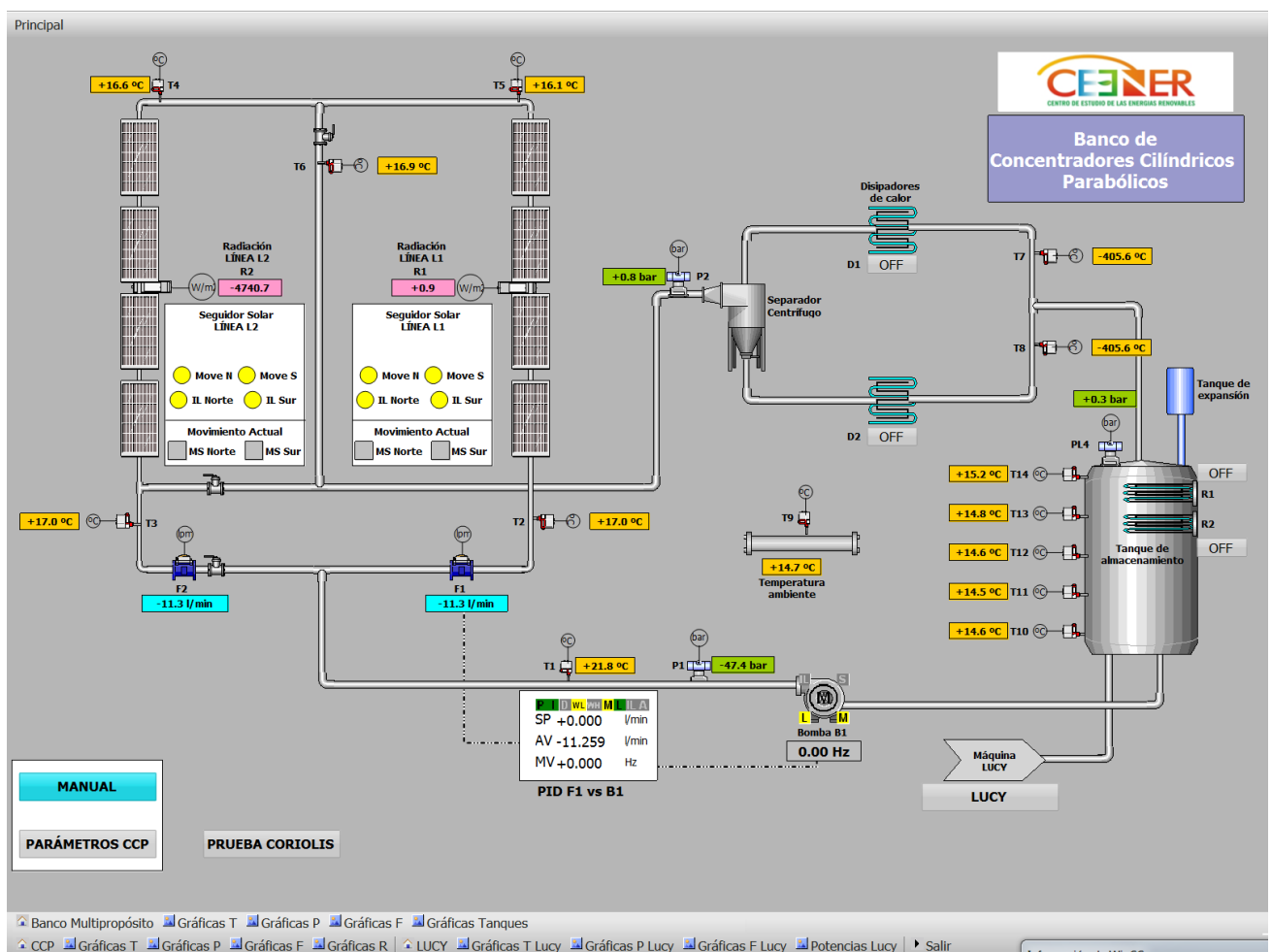


Figura 63. HMI sistema colectores cilindro parabólicos.

5.1 Rehabilitación de sistema

Dentro de los objetivos de este trabajo está la rehabilitación del sistema de colectores cilindro parabólicos los cuales luego de un par de años se vieron afectados directamente por la temperatura y la corrosión provocada por el agua estancada. Es por ello que se tomó acción con un plan para poner de nuevo en marcha el sistema, comenzando por analizar el estado de la parte física/estructural del banco de colectores y la parte de instrumentación.

Partiendo con la restauración física se tomó en cuenta la lubricación de los motores y verificación del funcionamiento de estos ya que se encontraban en un estado no optimo en el cual se realizó una limpieza ya que a simple vista se denotaba corrosión en la unión entre el sistema de engranajes planetarios y la transmisión como se muestra en la **Figura 64** , este mismo proceso se aplicó para el tubo absorbedor el cual se encontraba en las mismas condiciones como se muestra en la **Figura 65**.



Figura 64. Motor Huafang del sistema colectores cilindro parabólicos.

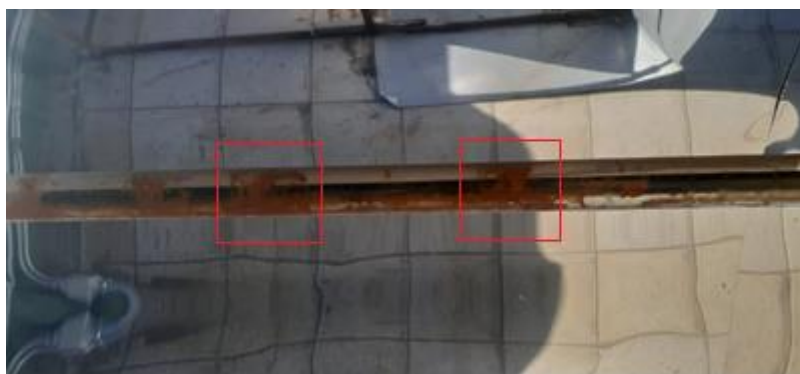


Figura 65. Receptor del sistema colectores cilindro parabólicos.

En la **Figura 66** se muestra que la superficie reflectante se encuentra despegada de la base de foam, por ello se realizó un mantenimiento correctivo de la estructura. Para despegar la superficie reflectante del material de la base, se necesitó de una serie de herramientas y materiales, de manera lógica se preparó el área de trabajo colocando el área de apertura del colector de manera normal a la superficie y se inspeccionó que la superficie reflectante no contara con golpes o deformaciones de carácter importante, ya que esto podría provocar que al separar ambas superficies el material de foam fuera deformado.

De manera lenta y a velocidad constante se retiró la superficie reflectante, se limpiaron los residuos del material adhesivo con el que ya contaba y al finalizar se inspeccionó el área de la base detectando espacios faltantes (**Figura 67**) los cuales fueron rellenados por material adhesivo (pasta foam) mismo con la que se unieron ambas superficies



Figura 66. Receptor del sistema colectores cilindro parabólicos.



Figura 67. Receptor del sistema colectores cilindro parabólicos.

Antes de comenzar con las reparaciones de la tubería de agua y la cobertura del tubo absorbedor se realizó la documentación del sistema para poder comprender el circuito de la tubería de agua, procediendo con la inspección asegurándonos que el sistema no contara con agua en su interior o que estuviera conectado a otro sistema. Una vez verificado el estado de las tuberías se retiraron los sensores de temperatura (PT100) los cuales fueron reemplazados por unos que contaran con un mejor estado operativo.

Una vez desconecta la tubería anterior se deslizó la tubería hacia afuera del sistema como se muestra en la **Figura 68** en donde se pudo quitar la corrosión que presentaba y se localizaron puntos donde se contaba con fugas. Una vez reacondicionado la tubería se colocó nuevamente y se instalaron los nuevos sensores de temperatura PT100. Se verificó y probó el sistema asegurando las uniones y abriendo las válvulas de paso, verifica si existían fugas o goteos en el sistema.



Figura 68. Receptor del sistema colectores cilindros parabólicos.

En el entorno de programación de TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) se realizaron cambios en programa de escalera del proyecto, los ajustes realizados en las entradas que detecta nuestro sistema fueron provocados por que los sensores PT100 que previamente estaban instalados presentaban áreas fuertemente corroídas principalmente en las terminales de este, por ello se cambiaron dichos sensores por otros del mismo tipo pero con variaciones en su modelo, ya que los que se tenían inicialmente contaban con un rango de operación de -50° a 250° y fueron reemplazados por unos con menor rango, -50° a 150° . Estos sensores reemplazados están etiquetados como T2, T4, T5 y T6 dentro de nuestro programa de escalera y que físicamente están ubicados a la entrada y salida del colector como se muestra en la **Figura 69**.

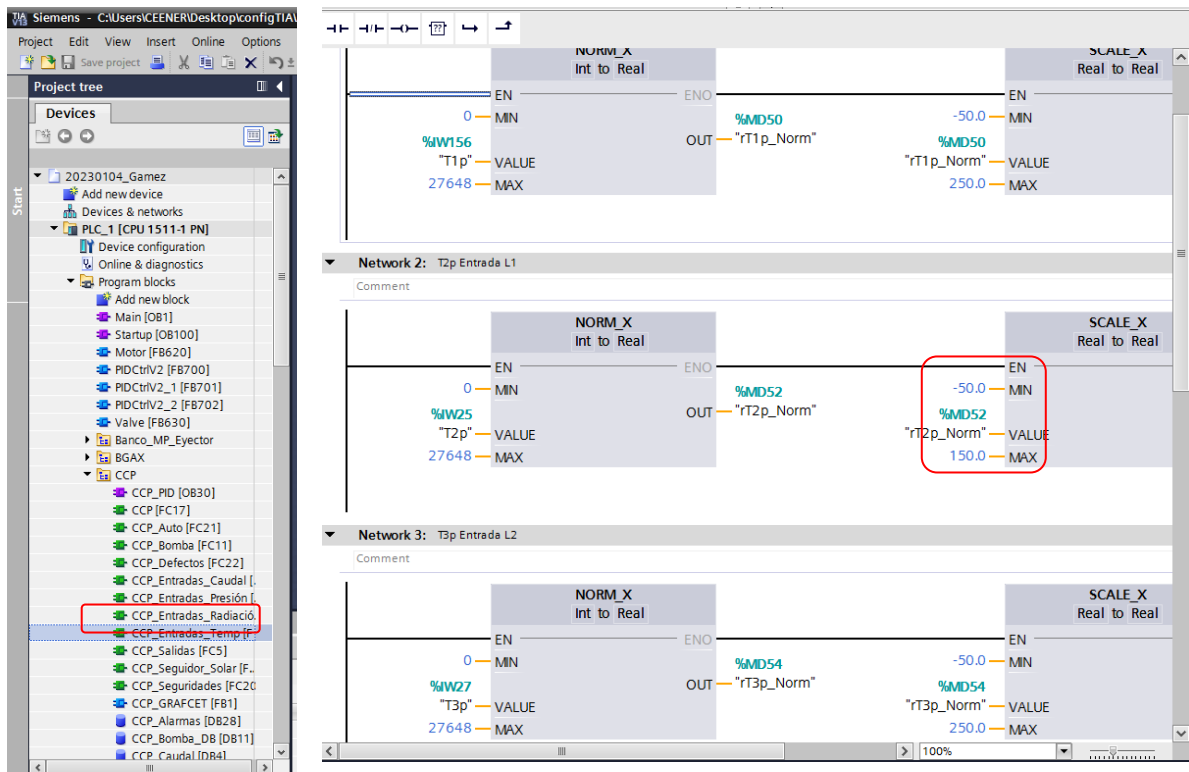


Figura 69. Programa de entradas de temperatura para HMI sistema colectores cilindro parabólicos.

5.2 Diseño y desarrollo

5.2.1 Esquemático

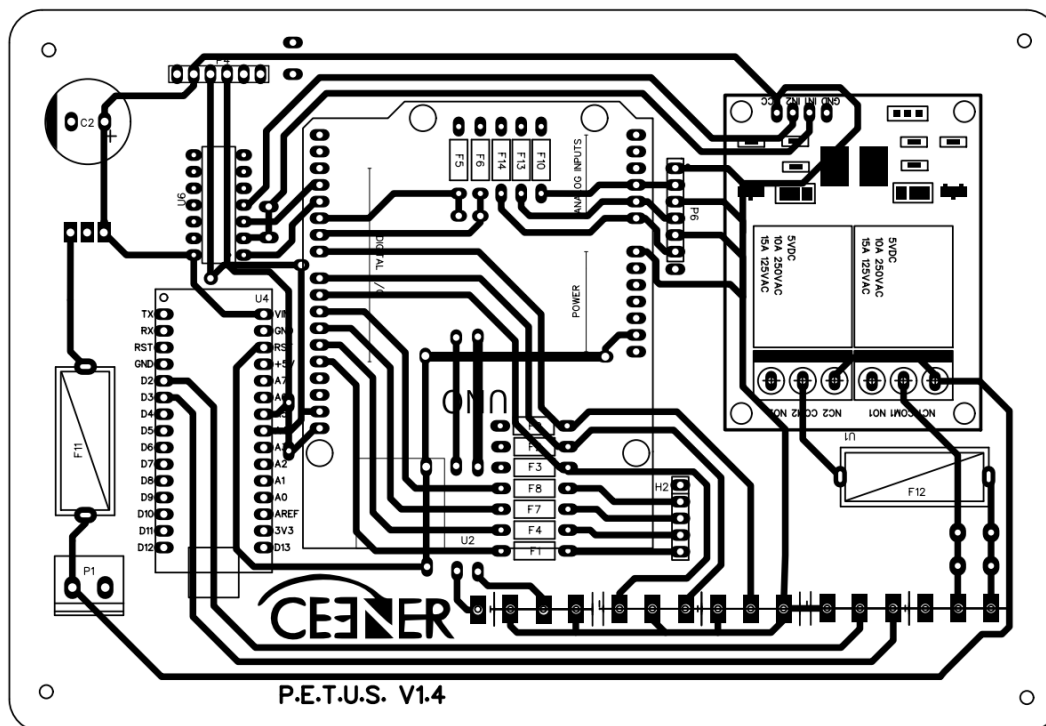


Figura 70. Esquemático del sistema de seguimiento.

El desarrollo de del sistema de seguimiento comienza tomando el diseño elaborado en la plataforma de diseño de circuitos electrónicos Easyeda, en donde se generan los archivos Gerber mostrados en la **Figura 70** donde se observa las pistas de cobre que unirán las diversas etapas con las que cuenta el sistema, pasando de una etapa de conversión de voltaje, una sección donde se realizan los cálculos hasta la etapa de control de las salidas del sistema.

La placa está diseñada de manera modular de tal forma que sea accesible para ensamblar y retirar de manera rápida algún componente de la misma, por ello en la Figura 40 se muestra que se le colocaron conectores hembra de 2.54mm en cada uno de los componentes principales, como lo son los Arduinos Mega y Nano, módulos de reloj y de relevador, provocando que así se tenga un rápido mantenimiento del sistema. Como método de seguridad se colocaron fusibles en cada entrada y salida del sistema para evitar afectar a la parte principal donde se efectúan los cálculos.

5.2.2 PCB

Una vez que se contó con la placa PCB maquinada se verificaron las pistas conductoras y los plantillas donde se colocaran los componentes. Después de este proceso, se colocó estaño en las pistas y plantillas dejando listos para soldar el conector hembra donde se colocaron los módulos del sistema de seguimiento solar como se muestra en la **Figura 72**.

Se realizó una inspección y prueba de la placa después de soldar todos los componentes, verificando de manera visual y con ayuda de un multímetro se checando la continuidad de las pistas asegurándonos así de que no existieran cortocircuitos o errores. Para finalizar, en la **Figura 73** se realizaron pruebas de operación mediante la energización del circuito utilizando una fuente de voltaje y acoplando el motor.

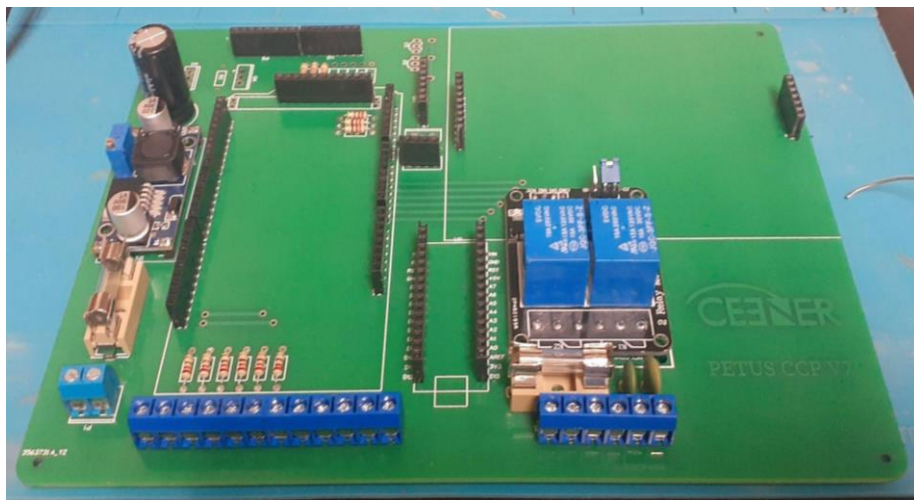


Figura 72. Construcción de la PCB del sistema.



Figura 73. Conexión del sistema con alimentación y actuador final.

5.2.3 Caracterización de equipo

5.2.3.1 Variables del sistema

Tabla 6. Descripción de las variables de entrada del sistema de seguimiento.

<i>Digitales alfanuméricas</i>		
<i>Entrada</i>	<i>Calculadas</i>	<i>Salida</i>
<i>Fecha y hora</i>	<i>Ángulo horario</i>	-
<i>Latitud y Longitud</i>	<i>Ecuación del tiempo</i>	-
<i>Referencia del motor</i>	<i>Tiempo solar</i>	-
	<i>Altura solar</i>	-
	<i>Ángulo azimutal</i>	-
	<i>Ángulo cenital</i>	-
	<i>Ángulo Norte-Sur</i>	-
	<i>Ángulo Este-Oeste</i>	-

Tabla 7. Descripción de los pines de la entrada del sistema de seguimiento.

<i>Digitales I/O</i>		
<i>Entrada</i>	<i>Calculadas</i>	<i>Salida</i>
<i>Límite Norte-Sur</i>	-	<i>Indicador de límite de seguimiento derecha</i>
<i>Límite Este-Oeste</i>	-	<i>Indicador de límite de seguimiento izquierda</i>
<i>Modo de seguimiento</i>	-	<i>Indicador de paro</i>
<i>Paro de emergencia</i>	-	<i>Indicador de marcha</i>
<i>Resguardo</i>	-	<i>Motor TA</i>
<i>Codificador del motor</i>	-	<i>Motor TB</i>
<i>Modo de operación</i>	-	-
<i>Posición manual</i>	-	<i>Motor TA/TB</i>

5.2.4 Caracterización de los actuadores

Mediante el uso de un osciloscopio se analizó las señales del codificador con el que cuenta el motor, de esta manera se determinó la frecuencia del motor, la cual es de 37Hz con una relación de 575:1 como se muestra en la **Figura 74**.

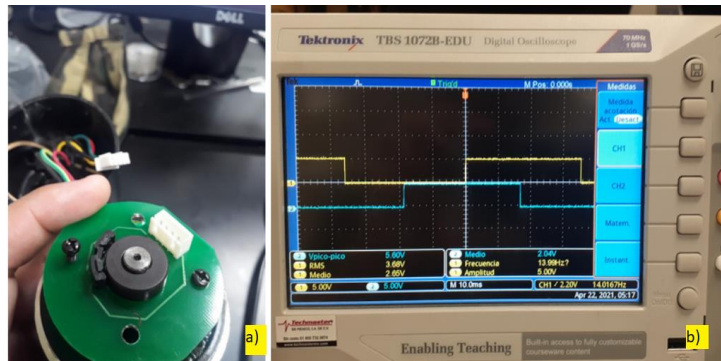


Figura 74. Caracterización del encoder del motor.

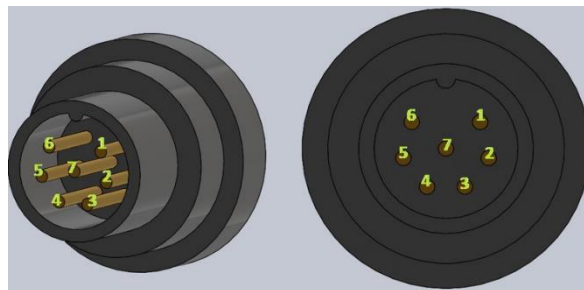


Figura 75. Caracterización de los pines del motor.

Tabla 8. Descripción de los pines de la entrada del motor.

Pines de motor

<i>No</i>	<i>Descripción</i>	<i>Color</i>
<i>1</i>	<i>Motor GND</i>	<i>Negro</i>
<i>2</i>	<i>Motor VCC</i>	<i>Rojo Mate</i>
<i>3</i>	<i>Codificador GND</i>	<i>Negro</i>
<i>4</i>	<i>Codificador VCC</i>	<i>Rojo</i>
<i>5</i>	<i>Señal B</i>	<i>Verde</i>
<i>6</i>	<i>Señal A</i>	<i>Amarillo</i>
<i>7</i>	<i>GND (FRAME)</i>	<i>Verde</i>

El modelo de motor que se decidió usar fue un motor con codificador rotativo de efecto Hall (Alejandro López-Contreras & Danilo Rairán-Antolines, 2019) de la marca china llamada Huafang mostrado en la **Figura 76**. El voltaje de operación es de 24 Volts y tiene un valor máximo de 1.2 Amperios contando con una reducción de motor por medio de un sistema de engranaje planetario de 575:1.

Esto en conjunto con una transmisión de tipo gusano el cual es un hilo de rosca helicoidal formado sobre un eje con el mismo perfil de diente como un engranaje de estímulo logran una transmisión de 73:1. Por lo tanto, para que el motor logre una vuelta de 360 grados es necesario que se den 41,975 pulsos del codificador de este motor.

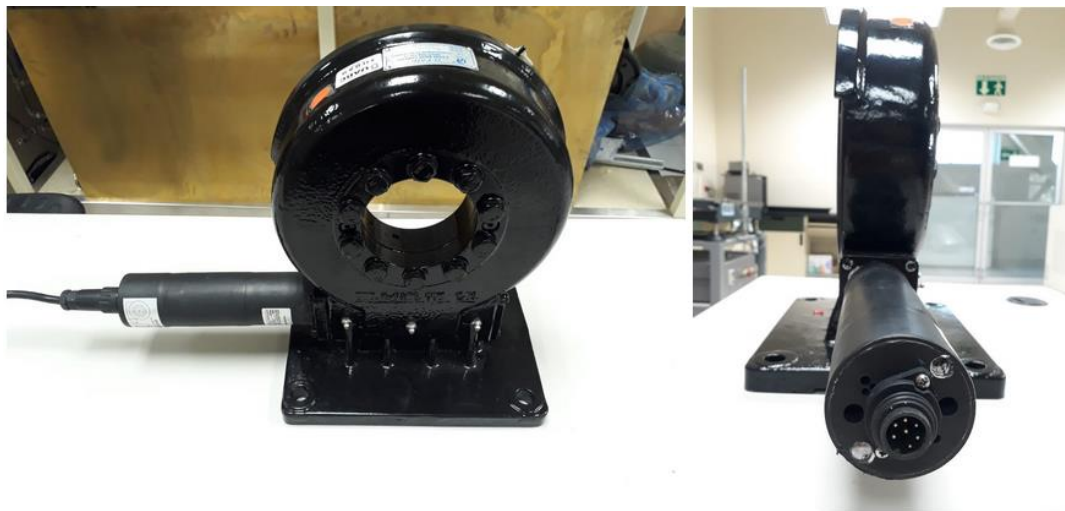


Figura 76. Motor con transmisión Huafang para el seguimiento solar.

5.3 Caracterización del sistema

La propuesta de placa PCB generada contempla diversos componentes los cuales se encuentran caracterizados y seccionados como se muestra en la **Figura 77** de modo que cada uno de estos cuenta con una función específica detallada en la tabla 7.

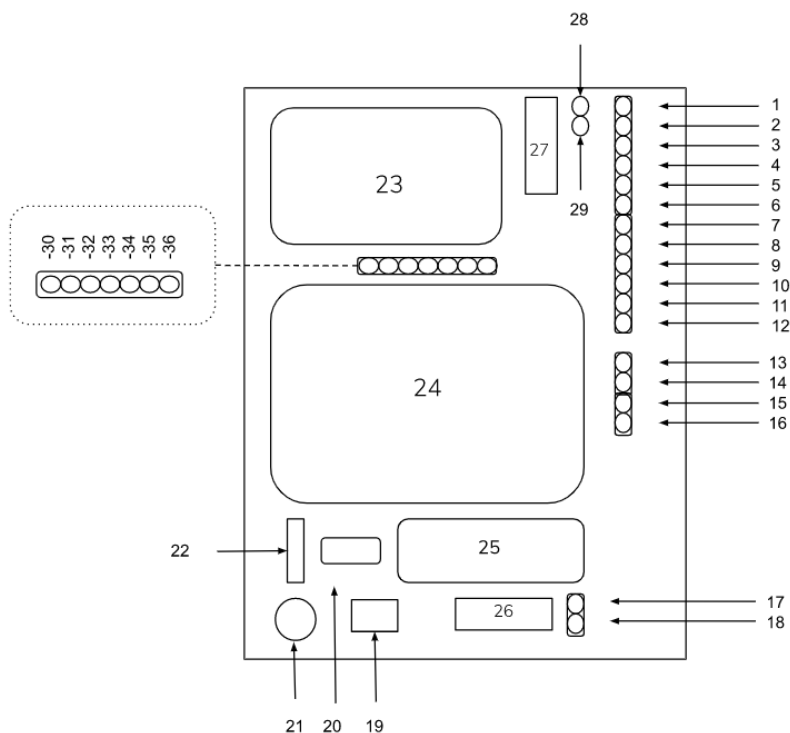


Figura 77. Esquema general del sistema de seguimiento.

Tabla 9. Descripción de los componentes del sistema de seguimiento.

Disposición de contactos de placa PCB

No	Tipo de componente	Descripción
1	Terminal Borne Bloque 1	Terminal contacto de motor M1A
2	Terminal Borne Bloque 1	Terminal contacto de motor M1B
3	Terminal Borne Bloque 1	Terminal conector de alimentación tierra
4	Terminal Borne Bloque 1	Terminal contacto codificador B
5	Terminal Borne Bloque 1	Terminal contacto codificador A
6	Terminal Borne Bloque 1	Terminal para conector de alimentación 5v
7	Terminal Borne Bloque 2	Terminal botón seleccionar
8	Terminal Borne Bloque 2	Terminal de alimentación 5v
9	Terminal Borne Bloque 2	Terminal botón Home

10	<i>Terminal Borne Bloque 2</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
11	<i>Terminal Borne Bloque 2</i>	<i>Terminal botón stop</i>
12	<i>Terminal Borne Bloque 2</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
13	<i>Terminal Borne Bloque 3</i>	<i>Terminal contacto sensor de límite 1</i>
14	<i>Terminal Borne Bloque 3</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
15	<i>Terminal Borne Bloque 3</i>	<i>Terminal contacto sensor de límite 2</i>
16	<i>Terminal Borne Bloque 3</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
17	<i>Terminal Borne Bloque 4</i>	<i>Terminal conector de alimentación tierra</i>
18	<i>Terminal Borne Bloque 4</i>	<i>Terminal conector de alimentación 24v</i>
19	<i>LM2596</i>	<i>Regulador de voltaje 24v a 5v</i>
20	<i>7408</i>	<i>Compuerta lógica NOT (Inversor)</i>
21	<i>Capacitor</i>	<i>Capacitor electrolítico 2200uF</i>
22	<i>DS3231</i>	<i>Modulo tiny RTC (Real Time Clock)</i>
23	<i>JQC-3FF-S-Z</i>	<i>Módulo de relevador doble</i>
24	<i>Arduino UNO</i>	<i>Placa programación Arduino modelo UNO</i>
25	<i>Arduino NANO</i>	<i>Placa programación Arduino modelo NANO</i>
26	<i>Fusible F1</i>	<i>Fusible de protección F1 voltaje de entrada</i>
27	<i>Fusible F2</i>	<i>Fusible de protección F2 voltaje de salida</i>
28	<i>Capacitor C1</i>	<i>Capacitor de arranque para motor</i>
29	<i>Capacitor C2</i>	<i>Capacitor de arranque para motor</i>
30	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
31	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal toggle switch CCW</i>
32	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
33	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal toggle switch CCW</i>
34	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal de alimentación 5v</i>
35	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal botón modo de operación</i>
36	<i>Terminal bloque 5</i>	<i>Terminal conector de alimentación tierra</i>

5.3.1 Indicadores y entradas del sistema de seguimiento propuesto.

El sistema cuenta con una variedad de entradas y salidas, así como indicadores que ayudan a identificar en que etapa del seguimiento se encuentra, en la **Figura 78**.

Indicadores (1-4)

- a) Indicador verde (1): Indica que el sistema está andando.
- b) Indicador rojo (2): Indica que el sistema está detenido.
- c) Indicador azul (3): Indica que el sentido giratorio del motor es opuesto a las manecillas del reloj.
- d) Indicador azul (4): Indica que el sentido giratorio del motor es acorde a las manecillas del reloj.

Botón Casa (5)

Botón pulsador que permite realizar la función Home dentro del sistema la cual se encarga de colocar el CCP en una posición de resguardo colocando la apertura de la parábola hacia el suelo.

Botón seleccionar (6)

Botón selector que permite elegir el modo de seguimiento entre Norte-Sur (I) y Este-Oeste (O).

Botón de paro de emergencia (7)

Botón color rojo con enclavamiento que permite interrumpir todas las funciones que esté realizando el sistema.

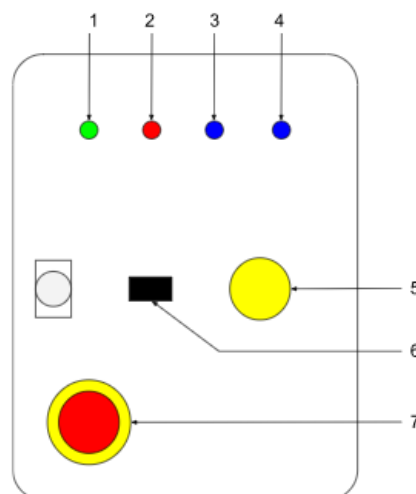


Figura 78. Esquema general de los indicadores y entradas del sistema de seguimiento (Frontal).

5.4 Montaje e Instalación

Para la instalación del sistema de seguimiento solar fue necesario buscar un lugar adecuado en la estructura del CCP para el fácil acceso y manipulación del usuario (**Figura 79**). Se hizo una conexión que permitió comunicar a los dos motores de manera en que sólo se necesitan las terminales necesarias para un motor las cuales involucran los 6 hilos que salen de él. Siendo dos cables de alimentación (24v y Tierra), alimentación del codificador (5v y Tierra) y las terminales de los motores (TMA y TMB).

Se tomó en consideración la ubicación de una fuente de 24v que energiza el sistema y corre a lo largo de las canaletas instaladas en la estructura del CCP. Para la comunicación entre los motores y sistema se usó 40 metros de cable 18 AWG de cuatro hilos

La realización de las pruebas de arranque se divide en dos fases: laboratorio y campo. Para las pruebas de laboratorio se contó con una fuente de 24v, el sistema de seguimiento y un motor de las mismas características que los motores que se encuentran montados en la estructura metálica del CCP en la azotea del Instituto de Ingeniería. A este motor se le adaptaron cables que nos permitieron hacer las pruebas realizadas.



Figura 79. Montaje del módulo de seguimiento en el sistema CCP.

Para realizar la instalación del sistema se debe tener en cuenta que tiene que estar alimentado con 24v por ello debe de contar con una fuente de alimentación de estas características. Una vez se cuente con la longitud adecuada de cable a utilizar para instalar el sistema se deberá conectar con el desarmador de cabeza plana para poder ajustar las terminales de la bornera, además de unas pinzas de corte.

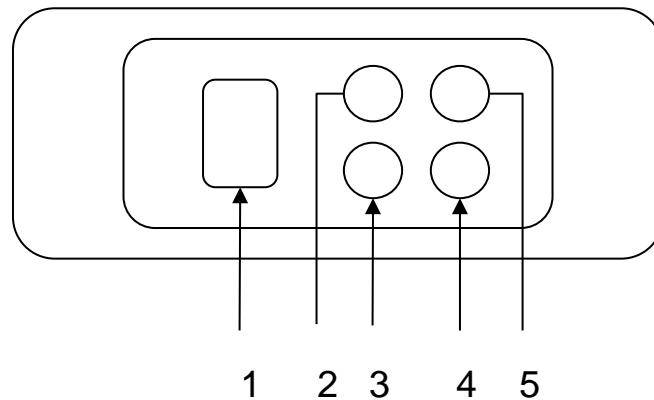


Figura 80. Esquema general de los indicadores y entradas del sistema de seguimiento (Inferior).

La **Figura 84** muestra los orificios numerados 2 y 3 que distribuyen los cables de entrada y salida para tener un mayor orden y que sea más sencilla la localización de estos. En el orificio 2 se tendrán dos cables de entrada los cuales corresponden a la alimentación de 24v. El orificio 3 contempla señales de entrada siendo estos los cables de los sensores de límite. Para el número 4 tiene comprendidas todas las líneas de comunicación que salen al motor, esto contempla la alimentación y las señales del codificador y para el último orificio 5 contempla las salidas con las que se controla el motor.

5.5 Pruebas

Durante la corta esta de pruebas se analizó el día 81 del año, ya que durante este periodo de tiempo que son los equinoccios la trayectoria aparente el sol no cambia por lo que es muy óptima para saber si el sistema de seguimiento cumple con las condiciones de muestreo de este caso en particular. Con el sistema de seguimiento instalado se pudo observar que los indicadores montados en la puerta de la caja del sistema teníamos una previsualización de la operación del sistema en la que se encontraba en cada momento. El CCP mostrados en la **Figura 81** denota que el absorbedor está recibiendo toda la energía posible ya que se percibe que la luz entra por la superficie transparente hace que el tubo tome un color blanco brillante.



Figura 81. Concentración de los cilindro parabólicos durante el equinoccio de primavera.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Es posible desarrollar un seguidor solar de bajo costo. Sin embargo, aún se requieren pruebas de operación que determinen la calidad de operación del sistema.
- Un seguidor solar basado en ecuaciones puede presentar desfase focal cuando se implementa en un sistema de cilindros parabólicos.
- El seguimiento solar en equinoccios puede tener intervalos de tiempo de muestreo de hasta 2 horas en el ajuste del ángulo de seguimiento y puede contar con velocidades de hasta 5 voltios sin afectar la eficiencia del sistema.
- El seguimiento solar con intervalos de 5 minutos es el óptimo para un colector cilindro parabólico en esta localización geográfica en épocas como solsticio de verano.
- El seguimiento solar con intervalos de 10 minutos es el óptimo para un colector cilindro parabólico en esta localización geográfica en épocas como solsticio de invierno.
- La eficiencia del sistema se puede mantener por arriba del 95% siempre y cuando se utilicen las configuraciones mencionadas para cada segmento del año.
- Es posible controlar la temperatura de salida del colector mediante el control de desenfoque por medio del seguidor solar.

6.2 Recomendaciones y Trabajos futuros

- Realizar experimentación con diversos tipos de motores, reducciones mecánicas y cambios en la estructura del colector
- Estudiar nuevas tecnologías para implantarlas al sistema y crear cogeneración e incluso poli generación.

-
- Reproducir el sistema de seguimiento solar para implementarlos en los restantes tipos de colectores instalados en la azotea.
 - Crear un sistema de monitoreo del sistema para así obtener datos de este sin necesidad de estar presente, Además de operar los sistemas interconectados de manera remota.
 - Desarrollar un sistema basado en sensores de posición de uno o más ejes, implementado acelerómetros.
 - Realizar una base de datos accesible para todos de forma que se pueda estar monitoreando la información y estado del sistema.
 - Realizar código de retroalimentación para obtener un control de la temperatura de salida mediante señales de los sensores.

1. Referencias

1. Agarwal, A. K., & Building, H. E. P. P. (1992). Two axis tracking system for solar concentrators. In *Renewable Energy* (Vol. 2, Issue 2).
2. Aguilar Jiménez, J. A., Velázquez Limón, N., Wong Ferreira, J. E., Álvarez Mancilla, J., López Zavala, R., & González Uribe, L. (2017). *Reporte Banco de pruebas con colectores CCP*.
3. Alejandro López-Contreras, W., & Danilo Rairán-Antolines, J. (2019). *VISION ELECTRONICA Design of a magnetic encoder using the Hall effect*. 13(2), 254–261.
4. Arasu, A. V., & Sornakumar, T. (2007). DESIGN, DEVELOPMENT AND PERFORMANCE STUDIES OF EMBEDDED ELECTRONIC CONTROLLED ONE AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM. In *Asian Journal of Control* (Vol. 9, Issue 2).
5. Banerjee, R. (2014). Solar Tracking System. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(3). www.ijsrp.org
6. Brooks, M. J., Mills, I., & Harms, T. M. (2006). Performance of a parabolic trough solar collector. *Journal of Energy in Southern Africa*, 17(3), 71–80. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2006/v17i3a3291>
7. CONAGUA. (2020). *OPCBC_13072020*.
8. Guillermo, L., & Escobar, V. (2007). *Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso*.
9. Günther, M., Joemann, M., Csambor, S., Guizani, R. A., Krüger, D., & Hirsch, T. (2011). *Advanced CSP Teaching Materials Parabolic Trough Technology*.
10. Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 91, pp. 754–782). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>
11. Heriberto Ruelas Puente, A., & Isaías Rosas Almeida, D. (2010). *Sistema de control para unidad de enfriamiento activado con energía solar-biomasa*.
12. Hernández Velázquez, J. (2018). *Diseño y construcción de un seguidor solar para aplicaciones en solarimetría Design and construction of a solar tracker for solarimetry applications* (Vol. 5).
13. Juan Carlos Casas Raygoza, P. (2021). *Desalinización de agua en zonas áridas costeras, con tecnología que utiliza energía solar en forma pasiva*.
14. Juaristi, J. i M., & Vitoria-Gasteiz. (1996). *Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica*".
15. Krishna, Y., Faizal, M., Saidur, R., Ng, K. C., & Aslfattahi, N. (2020). State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Vol. 152). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119541>
16. Lara Chávez, F. (2013). *Sistema de generación de vapor tipo expansión súbita activado con energía solar y acoplado directamente a una unidad de enfriamiento por absorción avanzada*.
17. Lee, C. Y., Chou, P. C., Chiang, C. M., & Lin, C. F. (2009). Sun tracking systems: A review. In *Sensors* (Vol. 9, Issue 5, pp. 3875–3890). <https://doi.org/10.3390/s90503875>
18. López Zavala, R. (2019). *Estudio de sistemas avanzados de desalinización por absorción activados con energía solar térmica*.

-
19. Luna León, A. (2008). *Diseño y evaluación de vivienda energéticamente sustentable*.
 20. Magaña Almaguer, H. D., & Pérez Tello, C. (2012). *EVALUACIÓN DE TEMPERATURAS EN LA REPÚBLICA MEXICANA PARA ACCIONES DE AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA*.
<https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstream/20.500.12930/3234/1/MXL110516.pdf>
 21. Martín Rodríguez Madrid, P., & Muñoz Antón, J. (2016). *Estudio y revisión crítica de diseño de la planta solar termoeléctrica NOVA 1*.
 22. Mpodi, E. K., Tijparuro, Z., & Matsebe, O. (2019). Review of dual axis solar tracking and development of its functional model. *Procedia Manufacturing*, 35, 580–588.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.082>
 23. Pelkowski, J. (2007). El Albedo terrestre. *Ciencias de La Tierra*, XXXI.
 24. Reyes-Caballero, F., Fernández-Morales, F. H., & Duarte, J. E. (2016). Panorama energético. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 7(1).
<https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n1.2016.5605>
 25. Rhif, A. (2012). A Sliding Mode Control for a Sensorless Tracker : Application on a Photovoltaic System. *International Journal of Control Theory and Computer Modeling*, 2(2), 1–14. <https://doi.org/10.5121/ijctcm.2012.2201>
 26. Rodríguez Becerra, M., Mance, H., Barrera Rey, X., & García Arbeláez, C. (2015). *Cambio climático: lo que está en juego*.
 27. Sarla, A., Charan, S., & Dandu, R. (2022). *Sun Tracking System*. www.bth.se
 28. Shufat, S. A. A., Kurt, E., & Hancerlioğulları, A. (2019). Modeling and design of azimuth-altitude dual axis solar tracker for maximum solar energy generation. *International Journal of Renewable Energy Development*, 8(1), 7–13.
<https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.7-13>
 29. Skouras, G. N. (2018). *DESIGN AND ANALYSIS OF A PARABOLIC TROUGH SOLAR CONCENTRATOR*.
 30. Valle Pereña, J. A., & Ortega Navarro, H. O. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*.
 31. Ya'u Muhammad, J., Ya', M. J., & Jamilu, M. (2017). 46-50 Ya'u. A Review on Solar Tracking Systems and Their Classifications. *Article in Journal of Energy Environmental & Chemical Engineering*, 2(3), 46–50.
<https://doi.org/10.11648/j.jeece.20170203.12>

2. Apéndice

1. Formulario

***Discutir la forma de realizar el formulario ***

2. Glosario

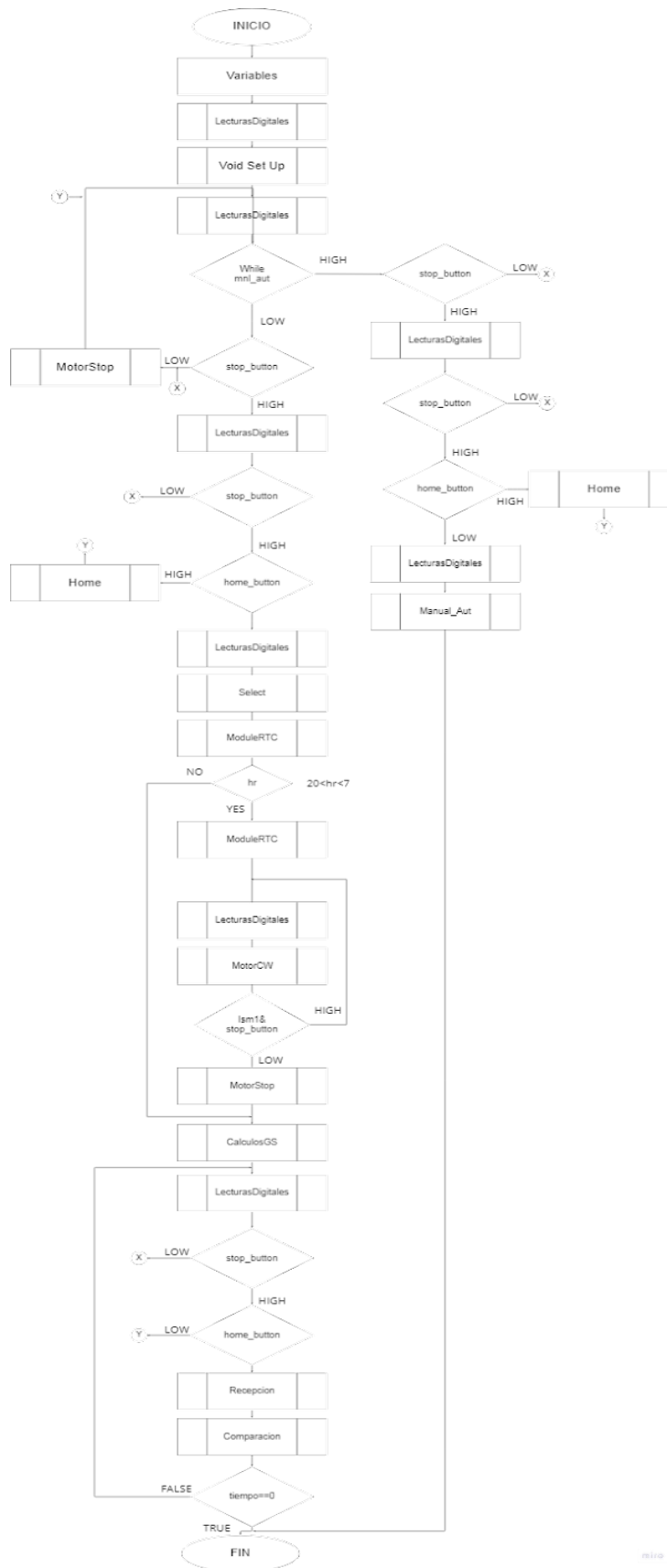
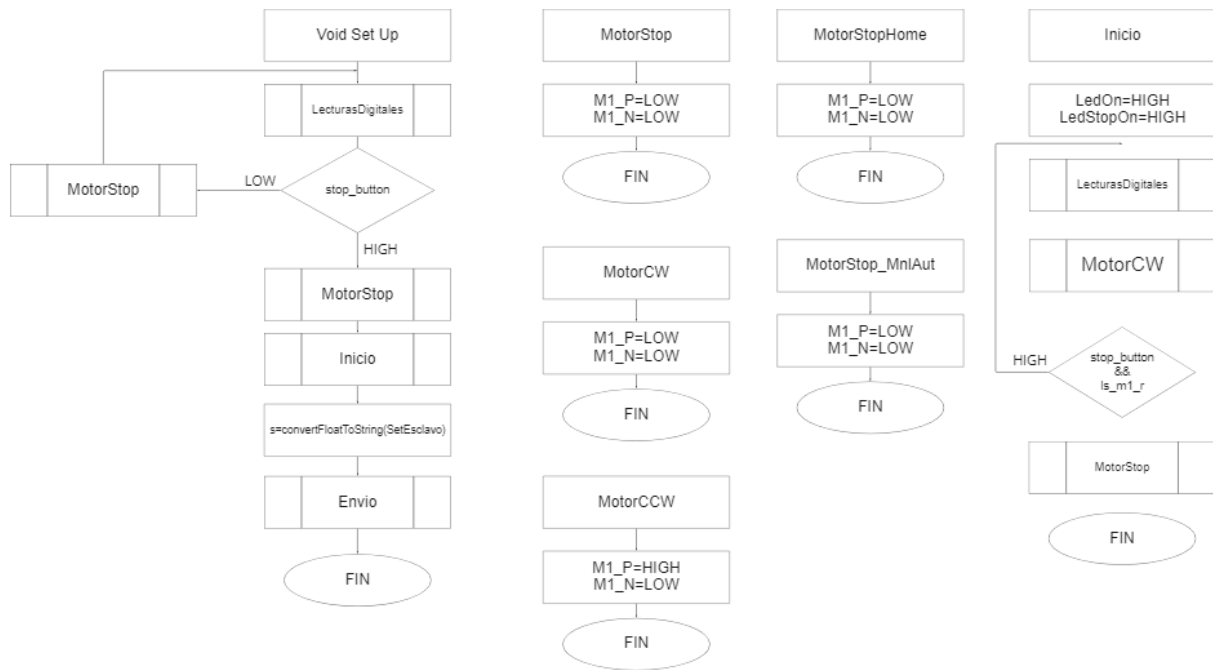
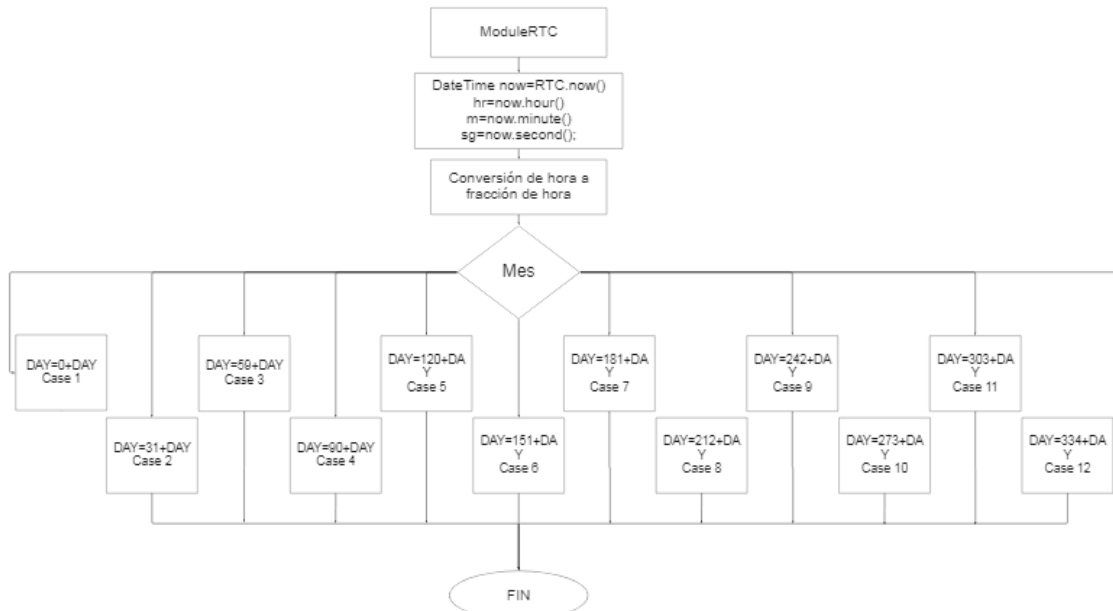


Diagrama de la estructura del programa.



Diagramas de funciones de inicio, paro y stop de emergencia.



Diagramas para determinar el día del año.

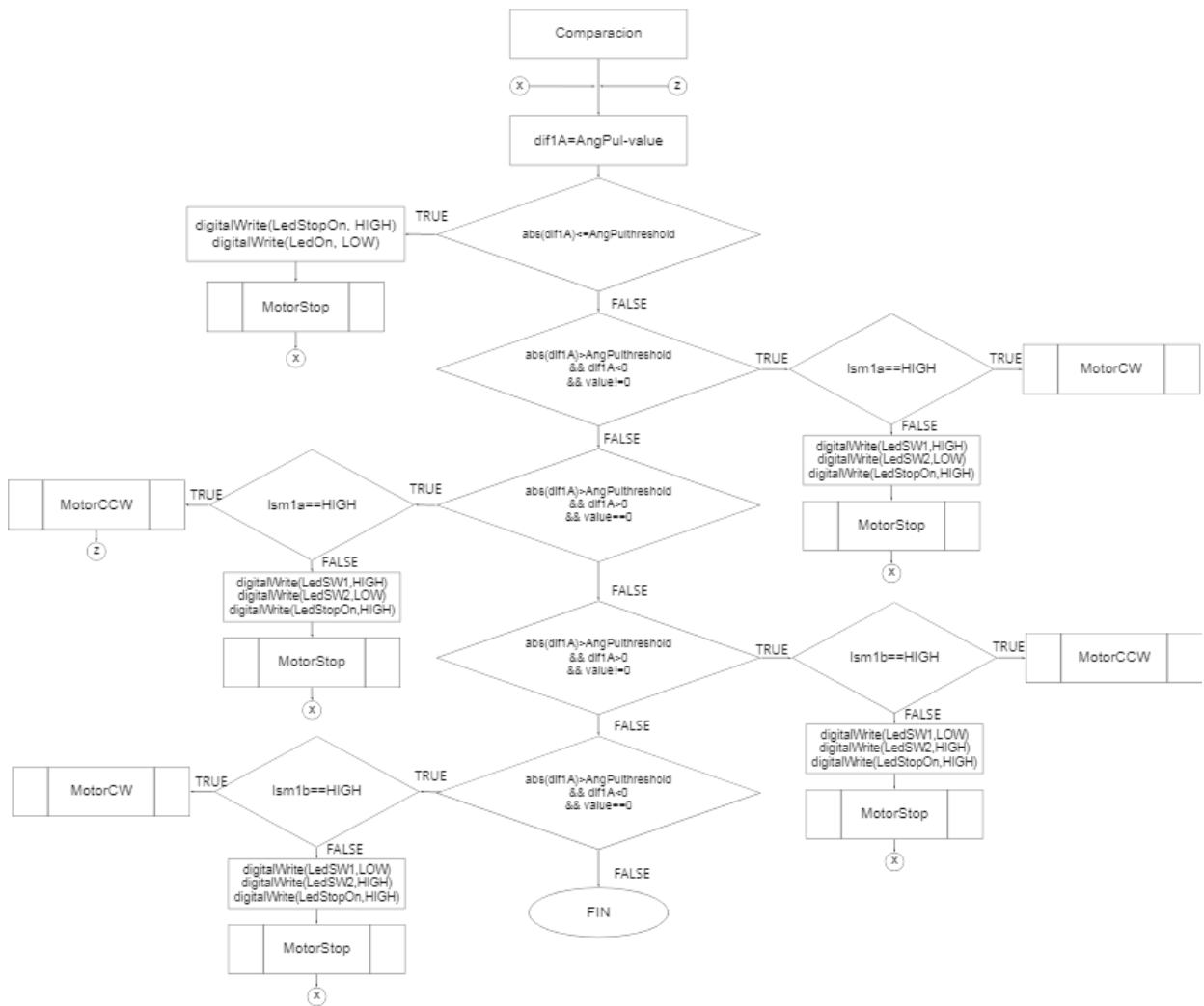
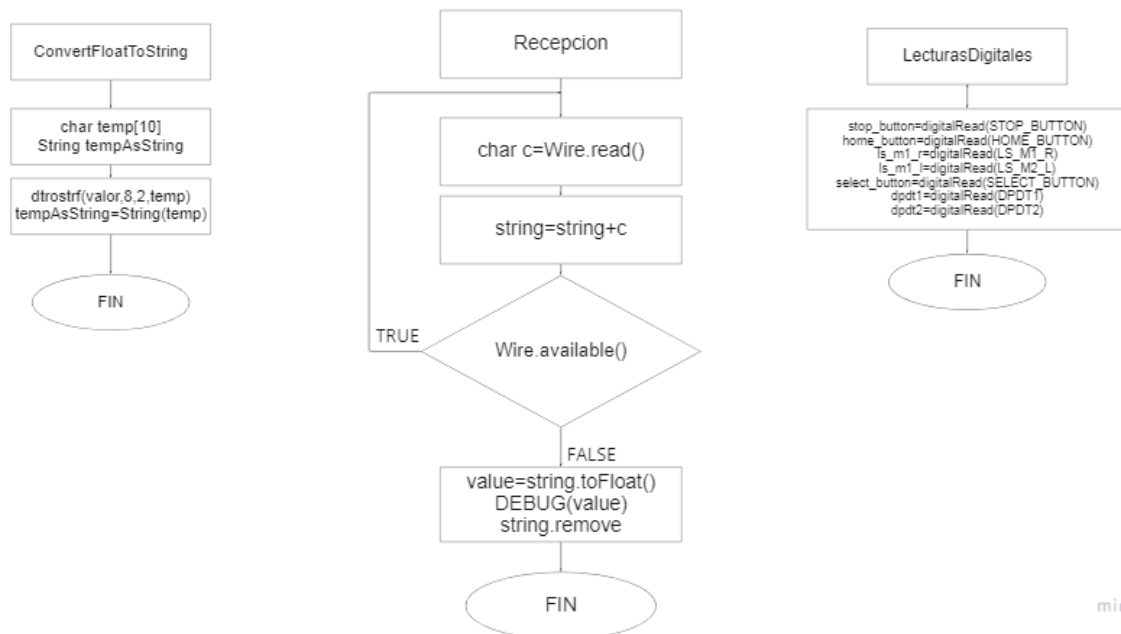
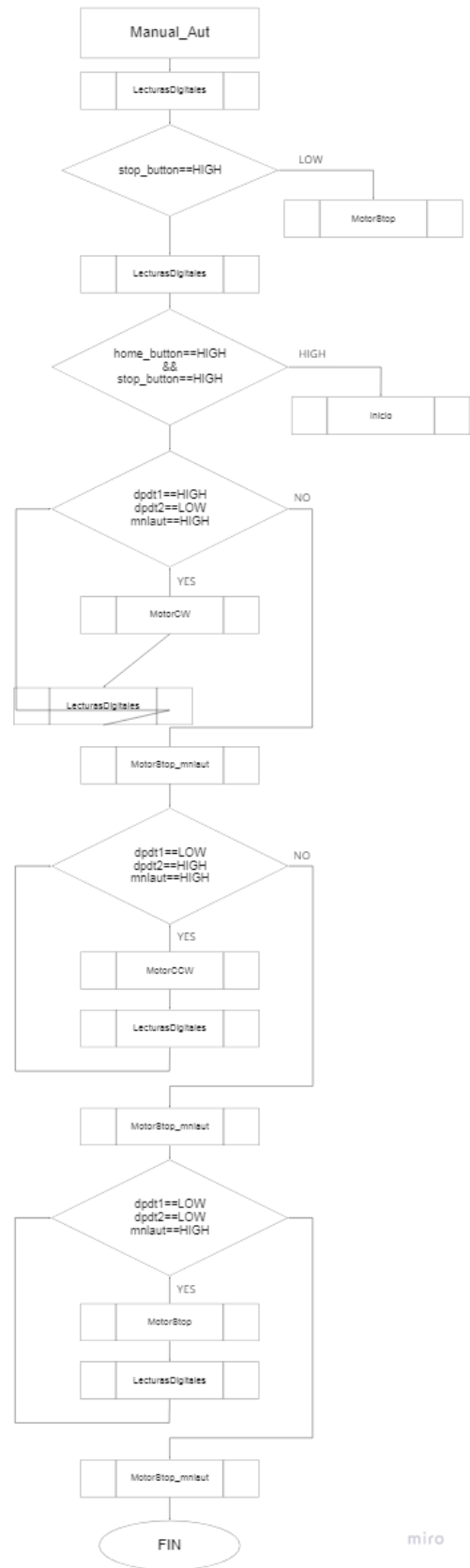
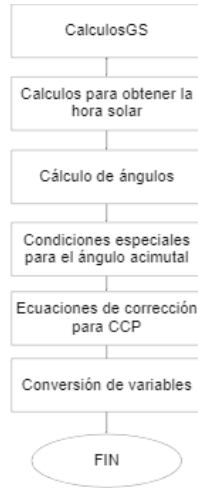


Diagrama de flujo de las funciones de la programación de Arduino Uno (Master).



miro

Diagrama de flujo de las funciones de la programación de Arduino Uno (Master).



miro

Diagrama de flujo de las funciones de la programación de Arduino Uno (Master).

3. Código de control

```
//-----MASTER-----
////////// DEFINICION DE VARIABLES GLOBALES//////////
#include<Wire.h> // Se incluye la librería para
comunicación I2C
#define DEBUG(a) // Función para depurar la conversión
string a flotante
#include "RTClib.h" // Se incluye la librería para reloj en
tiempo real
#include <math.h> // Se incluye librería para operaciones
matemáticas
#include <EEPROM.h>
RTC_DS1307 RTC; // Nombre del reloj en tiempo real
////////// Variables de pines o salidas//////////
int M1A=3;
int M1B =4;
int LSM1B =6;
int LSM1A =5;
int SELECT_BUTTON =7;
int HOME_BUTTON =8;
int STOP_BUTTON =9;
int LedOn=10;
int LedStopOn=11;
int LedSW1=12;
int LedSW2=13;
int SetEsclavo = -20987.5;
float ns=0;
float eo=0;
//////////Variables de entrada//////////
float LATT=0.558505; // Latitud del lugar donde se hará la
medicion
double Longitud=-115.48; // Longitud de Mexicali
int DAY; // Día del año
float LT; // Tiempo Local
double TUTC=-7; // Tiempo Universal Coordinado de
Mexicali
float FactorLineal=233.1944; // Número de pulsos para que avance 1
grado el motor lineal
float value=0, value2=0, value3=0; // Valor del
flotante una vez convertido
double tiempo;
//////////Variables calculadas//////////
float angDec; // Angulo de declinacion
float angH; // Angulo Horario a cierta hora solar
float angAS; // Angulo de altitud solar
double angC; // Angulo cenital
float angAz; // Angulo azimutal
double LST; // Tiempo Solar Local
double TC; // Factor de corrección de tiempo
```

```

double B;                // Incógnita para el cálculo de la hora
solar
double E;                // Incógnita para el cálculo de la hora
solar
double LSTM;           // Hora Local de Meridiano
float AngPul=0;        // Pulsos a dar para llegar al grado
deseado en el sistema lineal (angulo horario)
String string;        // string donde se almacena todos los
datos optenidos
String s="";          // String donde se almacena el float
para su envio
int hr;                // Se guarda el valor de la hora
recibida del reloj en una variable
float m;               // Se guarda el valor de los minutos
recibidos del reloj en una variable
float sg;              // Se guarda el valor de los segundos
recibidos del reloj en una variable
int mes;              // Se guarda el valor del mes recibido
del reloj en una variable
int dia;              // Se guarda el valor del día recibido
del reloj en una variable
int AngPulthreshold = 5; // Umbral de valores que puede obtener
nuestro valor recibido
int sec;
//////////////////// Variables de transmisión o temporales////////////////////
float A_Rx= 0;
float phi_AX = 0;
float phi_a=0;
float A_R=0;
float O_R=0;
float alt_sol_M;
double diflA;
double diflB;
bool stop_button;
bool select_button;
bool lsmla;
bool lsmlb;
bool home_button;
float Z_ref;
float X_ref;
float Y_ref;
float A_NS;
float A_EO;
//////////////////// Banderas, contadores, etc.////////////////////
int ban=0;            // Bandera para la primer orden
bool banant=true;
bool banhome;
void setup() {
Wire.begin();        // Inicio de comunicacion
I2C

```

```

Serial.begin(9600); // Se activa la comunicacion
serial
pinMode(LSM1A, INPUT); // Configura la señal LSI
del limit switch como entrada
pinMode(LSM1B, INPUT); // Configura la señal LSI
del limit switch como entrada
pinMode(LedOn, OUTPUT);
pinMode(LedStopOn, OUTPUT);
pinMode(M1A, OUTPUT);
pinMode(M1B, OUTPUT);
pinMode(SELECT_BUTTON, INPUT);
pinMode(STOP_BUTTON, INPUT);
pinMode(HOME_BUTTON, INPUT);
RTC.begin(); // Inicia la comunicación
con el RTC
RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__)); // Establece la fecha y hora
(Comentar una vez establecida la hora)
digitalWrite(LedOn, HIGH);
MotorStop(); // Funcion para detener el
motor
Serial.println("Inicializando");
delay(10000);
Serial.println("Bienvenidos");
delay(5000);
Inicio(); // Se manda llamar la
funcion para setear el motor a su inicio
Envio(); // Se manda llamar la
funcion envio
}

void loop() {
Lecturas_Digitales();
if(stop_button==LOW) { // STOP
Serial.println("STOP EMERGE");
digitalWrite(LedOn, LOW);
digitalWrite(LedStopOn, HIGH);
MotorStop();
delay(250);}
Lecturas_Digitales();

Lecturas_Digitales();
if((home_button==HIGH) && (stop_button==HIGH)){ // CAMBIO DE ANGULO
Serial.println("SET HOME...");
digitalWrite(LedOn, HIGH);
digitalWrite(LedStopOn, LOW);
delay(250);
Inicio();}

Lecturas_Digitales();
static double ultimo_cambio = 0; // Se declara una
variable de contador para el tiempo de repeticion

```

```

ModuleRTC();
// Se manda llamar la funcion de Reloj
CalculosGS(); // Se manda llamar la
funcion de calculosGS
Lecturas_Digitales();
while((tiempo - ultimo_cambio <= 300000) && (stop_button == HIGH)){
    tiempo= millis(); // Se declara una variable de
tiempo para guardar el tiempo desde el inicio
    Lecturas_Digitales();
    select();
    Recepcion();
    delay(5);
    Lecturas_Digitales(); // Se manda llamar la funcion
para hacer las lecturas digitales de las entradas
    if(stop_button==LOW){ // STOP
        Serial.println("STOP EMERGE");
        digitalWrite(LedOn,LOW);
        digitalWrite(LedStopOn,HIGH);
        MotorStop();
        delay(250);}
    Lecturas_Digitales();
    if(home_button==HIGH){ // STOP
        Serial.println("SET HOME");
        digitalWrite(LedOn,LOW);
        digitalWrite(LedStopOn,HIGH);
        MotorStop();
        Home();
        delay(250);
    }
    Comparacion(); // Se manda llamar la funcion
de comparacion
}
ultimo_cambio = millis();
}
////////////////////// FUNCION DE INICIO////////////////////////////////////
void Inicio(){
    Serial.println("Buscando punto cero..."); // Se muestra en pantalla
el estado de la funcion
    delay(2000); // Delay de seguridad
para que no haga cambios subitos de giro // Ciclo do while para
do{ // Ciclo do while para
calibrar el set point
    Lecturas_Digitales();
    MotorCW(); // Se manda llamar la
funcion para girar sentido antihorario al motor
}while(lsmla==HIGH && stop_button==HIGH);
digitalWrite(LedStopOn,HIGH);
MotorStop(); // Se manda llamar la
funcion para detener el motor
    Serial.println("Motor en posicion"); // Se muestra en pantalla
el estado de la funcion

```



```

//CALCULOS PARA OBTENER HORA SOLAR//
LSTM=15*TUTC;
// Cálculo de la hora local solar del meridiano
B=(6.28319/365)*(DAY-81);
// Cálculo de la variable B para calcular la ecuación del tiempo
E=0.172263997*sin(2*B)-0.131423293*cos(B)-0.0261799388*sin(B);
// Cálculo de la ecuación del tiempo
E=E*(180/M_PI);
// Conversión de radianes a grados de la ecuación del tiempo
TC=4*(Longitud-LSTM)+E;
// Cálculo del factor de corrección
LST=LT+(TC/60);
// Cálculo de la hora local solar

//CALCULOS DE ANGULOS//
angH=15*(LST-12);
// Cálculo para el ángulo horario solar en grados
angH=angH*(3.1416/180);
// Conversión de grados a radianes
angDec= (0.40927971)*sin(6.28319*(284+DAY)/365);
// Cálculo para la declinación
angAS=asin((sin(angDec))*sin(LATT))+(
cos(angDec))*(cos(LATT))*(cos(angH)); // Cálculo para el ángulo de
altitud solar
angC= 1.5708-angAS;
// Cálculo para el ángulo cenital
angAz= asin((cos(angDec)*sin(angH))/cos(angAS));
// Cálculo del ángulo azimutal

//Condiciones especiales para el ángulo azimutal//
if(angDec>=0){
alt_sol_M=90-LATT+angDec;
// Altura solar a las 12 de ese día
phi_a=angDec;
A_R=cos(phi_a); O_R = sin(phi_a);
A_Rx=A_R*cos(angH);
phi_AX=atan(O_R/A_Rx);
if(abs(phi_AX)>=LATT){
if(angH>=0){
angAz=180-angAz;}
if(angH<0){
angAz=-1*(180+angAz);
}
}
}
//////////////////////ECUACIONES CORRECCION PARA CCP//////////////////////
Z_ref = sin(angAS);
X_ref = cos(angAS)*cos(angAz);
Y_ref = cos(angAS)*sin(angAz);

A_NS = 0;

```

```

if (X_ref < 0){
    A_NS = 3.1416;}

ns = atan(Z_ref/X_ref) + A_NS;
eo = (atan(Y_ref/Z_ref) + (3.1416/2));

/*Z_ref = sind(A_Hsun);
X_ref = cosd(A_Hsun)*cosd(A_Az);
Y_ref = cosd(A_Hsun)*sind(A_Az);
A_NS = 0;
if (X_ref < 0)
    A_NS = 180;end
if (Y_ref < 0)
    A_EO = 180;end

N_S_ref = atand(Z_ref/X_ref) + A_NS;
E_O_ref = (atand(Y_ref/Z_ref) + A_EO) -90 ;*/
////////////////////////////////////
//CONVERSION DE VARIABLES//
angH=angH*(180/3.1416);
angDec= angDec*(180/3.1416);
// Conversión de radianes a grados
angC= angC*(180/3.1416);
// Conversión de radianes a grados
angAS= angAS*(180/3.1416);
// Conversión de radianes a grados
angAz= angAz*(180/3.1416);
// Conversión de radianes a grados
ns=ns*(180/3.1416);
Serial.println(ns);
eo=eo*(180/3.1416);
Serial.println(eo);
}
////////////////////////////////////FUNCION ENVIO DE DATOS////////////////////////////////////
void Envio(){
Wire.beginTransmission(8);           // Inicie de comunicacion
I2C con el esclavo #8
Wire.print(s);                       // Se envia el string por
I2C
Wire.endTransmission();              // Se finaliza la
comunicacion enviando los datos en cola
}

////////////////////////////////////FUNCION RECEPCION DE DATOS////////////////////////////////////
void Recepcion(){
    Wire.requestFrom(8, 8);           // Funcion para solicitar
datos 4 bytes al esclavo 8
    do {                               // Inicio del ciclo para
recibir los caracteres
        char c = Wire.read();         // Recibe un byte como
caracter

```

```

    string = string + c; // Va guardando caracter
a caracter
} while (Wire.available()); // Fin de la condición
para que se arme el string mientras el esclavo tenga bytes disponibles
    value = string.toFloat(); // Guardamos en value la
conversión de string a float
    DEBUG(value); // Depura la variable value
    string.remove(0,8); // Limpia la variable
string
//Serial.println(value);}

////////////////////FUNCION COMPARACIÓN DE DATOS////////////////////
void Comparacion() {
    dif1A = AngPul - value;
    Serial.println(dif1A);
    if(abs(dif1A) <= AngPulthreshold) {
// Comparacion entre el valor recibido y enviado con un umbral
AngPulthreshold
        Serial.println("a");
        digitalWrite(LedOn, LOW);
        digitalWrite(LedStopOn, HIGH);
        MotorStop();}
// Se manda llamar la funcion para detener el motor
    if((abs(dif1A) > AngPulthreshold) && (dif1A < 0) && (value != 0)) {
// Comparacion entre el valor recibido y enviado con un umbral
AngPulthreshold
        if(lsmla == HIGH) {
            Serial.println("b");
            digitalWrite(LedOn, HIGH);
            digitalWrite(LedStopOn, LOW);
            MotorCW();}
// Se manada llamar la funcion para girar sentido horario el motor
        if(lsmla == LOW) {
            Serial.println("c");
            digitalWrite(LedOn, LOW);
            digitalWrite(LedStopOn, HIGH);
            MotorStop();}}
    if((abs(dif1A) > AngPulthreshold) && (dif1A > 0) && (value == 0)) {
// Comparacion entre el valor recibido y enviado con un umbral
AngPulthreshold
        if(lsmla == HIGH) {
            Serial.println("d");
            digitalWrite(LedOn, HIGH);
            digitalWrite(LedStopOn, LOW);
            MotorCCW();}
        if(lsmla == LOW) {
            Serial.println("e");
            digitalWrite(LedOn, LOW);
            digitalWrite(LedStopOn, HIGH);
            MotorStop();}}
// Se manada llamar la funcion para girar sentido horario el motor

```

```

    if((abs(diflA)> AngPulthreshold) && (diflA > 0) && (value !=0)){
// Comparacion entre el valor recibido y enviado con un umbral
AngPulthreshold
    if(lsm1b == HIGH){
        Serial.println("f");
        digitalWrite(LedOn,HIGH);
        digitalWrite(LedStopOn,LOW);
        MotorCCW();}
    if(lsm1b ==LOW){
        Serial.println("g");
        digitalWrite(LedOn,LOW);
        digitalWrite(LedStopOn,HIGH);
        MotorStop();}
    }
// Se
manda llamar la funcion para girar sentido antihoraio el motor
    if(abs(diflA)> AngPulthreshold && diflA < 0 && value ==0){
// Comparacion entre el valor recibido y enviado con un umbral
AngPulthreshold
    if(lsm1a == HIGH){
        Serial.println("h");
        digitalWrite(LedOn,HIGH);
        digitalWrite(LedStopOn,LOW);
        MotorCW();}
    if(lsm1b == LOW){
        Serial.println("i");
        digitalWrite(LedOn,LOW);
        digitalWrite(LedStopOn,HIGH);
        MotorStop();}}
// Se manda llamar la funcion para girar sentido antihoraio el motor

//////////FUNCION CONVERTIR FLOAT TO STRING//////////
String convertFloatToString(float valor){
char temp[10]; // Cadena de caracteres
temporal
String tempAsString; // String donde se
guardara la cadena temporal
dtostrf(valor,8,2,temp); // Funcion para conertir
de float a string
tempAsString = String(temp); // Funcion para crear el
string que se usara
return tempAsString;
delay(2000);} // Se retorna el valor convertido
//-----
//////////**FUNCION MOTOR UNO STOP**//////////
void MotorStop(){
Serial.println("stop");
digitalWrite(M1A, LOW); // Configura la señal M1
del motor como encendido
digitalWrite(M1B, LOW); // Configura la señal M2
del motor como apagado
delay(5000);}

```

```

/////////////////////////////////////////FUNCION MOTOR UNO CCW/////////////////////////////////////////
void MotorCW(){
  Serial.println("CW");
  digitalWrite(M1A, LOW); // Configura la señal M1
  del motor como encendido
  digitalWrite(M1B, HIGH);} // Configura la señal
M2 del motor como apagado
/////////////////////////////////////////FUNCION MOTOR UNO
CW/////////////////////////////////////////
void MotorCCW(){
  Serial.println("CCW");
  digitalWrite(M1A, HIGH); // Configura la señal
M1 del motor como apagado
  digitalWrite(M1B, LOW); // Configura la señal M2
  del motor como encendido

void Lecturas_Digitales(){
  stop_button = digitalRead(STOP_BUTTON);
  select_button = digitalRead(SELECT_BUTTON);
  lsmlb = digitalRead(LSM1B);
  if(lsmlb ==LOW){
    digitalWrite(LedSW1, HIGH);}
  if(lsmlb ==HIGH){
    digitalWrite(LedSW1, LOW);}
  lsmla = digitalRead(LSM1A);
  if(lsmla==LOW){
    digitalWrite(LedSW2, HIGH);}
  if(lsmla==HIGH){
    digitalWrite(LedSW2, LOW);}
  home_button = digitalRead(HOME_BUTTON);
  if(home_button==HIGH){
    banhome=true;}
  if(home_button==LOW){
    banhome=false;}
}

//-----SLAVE CONTADOR-----
///////////////////////////////////////// DEFINICION DE VARIABLES GLOBALES/////////////////////////////////////////
#include<Wire.h> // Se incluye la librería pra
comunicacion I2C
#define DEBUG(a) // Función para depurar la
conversión string a flotante
float value=0; // Valor del flotante una vez
convertido
String s =""; // String donde se almacena el
float para su envío
int canalA=2; // Inicialización de la señal
A del encoder como el pin 2
int canalB=3; // Inicialización de la señal
B del encoder como el pin 3

```

```

double TotalPasos=0; // Variable para guardar el
total de pasos dado por el motor
int F=0; // Contador para aumentar o
disminuir el valor de pasos del motor

////////// CONFIGURACION PRINCIPAL//////////
void setup() {
Wire.begin(8); // Se conecta al bus I2C como
el esclavo #10
pinMode(canalA,INPUT); // Configura la señal A del
encoder como entrada
pinMode(canalB,INPUT); // Configura la señal B del
encoder como entrada
Wire.onRequest(EventoMandar); // Evento de envío de datos
I2C
Wire.onReceive(EventoRecibir); // Evento de recepción de
datos I2C
Serial.begin(9600); // Se activa la comunicación
serial
Serial.println("En espera de pulsos...");}

void loop() {
if(digitalRead(canalA)==HIGH){ // Condicional para entrar al
ciclo do while cada que haya un flanco de subida
do{ // Inicio del ciclo do while
if(digitalRead(canalB)==HIGH){ // Condicional por si la señal
B adelanta a la señal A
F=-1;} // Si se cumple el motor irá
en sentido antihorario y el contador tomará el valor de -1
if(digitalRead(canalB)==LOW){ // Condicional por si la señal
A adelanta a la señal B
F=1;} // Si se cumple el motor irá
en sentido horario y el contador tomará el valor de +1
}while(digitalRead(canalA)==HIGH); // Se hará el ciclo mientras
sea un flanco de subida
TotalPasos=TotalPasos+F;} // El total de pasos del motor
se actualizará sumándole el contador
}
//////////FUNCION RECEPCION DE DATOS//////////
void EventoRecibir(){
String string; // String donde se almacenan
los datos recibidos
do { // Inicio del ciclo para
recibir los caracteres
char c = Wire.read(); // Recibe un byte como
caracter
string = string + c; // Va guardando caracter a
caracter
} while (Wire.available()); // Fin de la condición para
que se arme el string mientras el esclavo tenga bytes disponibles

```

```
value = string.toFloat(); // Guardamos en value la
conversión de string a float
DEBUG(value); // Depura la variable value
TotalPasos=value;
string.remove(0,8);
}
////////////////////////////////EVENTO MANDAR////////////////////////////////
void EventoMandar(){
s=convertFloatToString(TotalPasos); // Función para convertir
flotantes a string
Wire.print(s); // Se envía el string por I2C
Serial.println(s);}

////////////////////////////////FUNCION CONVERTIR FLOAT TO STRING////////////////////////////////
String convertFloatToString(float valor){
char temp[10]; // Cadena de caracteres
temporal
String tempAsString; // String donde se guardará la
cadena temporal
dtostrf(valor,6,2,temp); // Función para conertir de
float a string
tempAsString = String(temp); // Función para crear el
string que se usara
return tempAsString;} // Se retorna el valor
convertido
```

4. Código del simulador

```
%---Universidad Autonoma del Estado de Baja California-----
%---Instituto de Ingenieria-----
%---Centro de Estudios de las Energías renovables-----
%---Dr.Saúl Islas Pereda-----
%---islass@uabc.edu.mx-----
%---Ing.José Daniel Gámez Avilez-----
%% SIMULADOR GEPOMETRIA SOLAR-COMPORTAMIENTO CCP
% Simulador que calcula la trayectoria solar, dimensionamiento de un CCP,
% eficiencia optica, termica, y presenta graficas de comportamientos del
% mismo
%% SIMULADOR DE LA TRAYECTORIA APARENTE DEL SOL
clc %Limpia la pantalla de comandos
clear all %Eliminacion de todos las variables remanentes
close all %Se cierran todas las pantallas desplegadas
format short g %Cambia el formato en el que muestran las operaciones
tic

" Bienvenido al Simulador trayectoria solar "
%---Fecha y lugar-----
latt = 32; % Latitud de la ubicacion geografica a evaluar
Hrsi = 7; % Hora inicial en formato 24 hrs + fracciones de hora
Hrsl = 19; % Hora final en formato 24 hrs + fracciones de hora
Dayi = 150; % Primer día-a a Evaluar;día-a juliano.Equinoxios[81,263]
SolsV[172,355]
Dayl = 150; % Ultimo día-a a evaluar
sample_time = 5*60/3600; % Tiempo de muestreo para el movimiento del
motor CAMBIAR A 3600 PARA EL MUESTREO 300/3600

%---Archivo climatologico solares-----
%Ib = 900; % Radiacion directa disponible, W/m2
Mx_Solar = xlsread('Radiaciones.xlsx','A3:F8762'); %Se toma el excel con
los datos
DNI_dir = 3; % address del vector DNI
TEMP_amb = 5;
%Ee = 0.268; % angulos subtendido del sol MEDIO
%---Incrementos y contadores-----
incr_hrs = 1/3600; % Incremento de horas en fraccion de horas
contA = 1; % contador para el vector de los parametros en
funcion del tiempo
contB = 1;
Day = Dayi; % contador de día-a
Hrs = Hrsi; % contador de horas
r_incr = 0.1; % Incremento de barrido del diametro del area de
apertura, m^2
d_incr = 0.1; % incremento de barrido del receptor,cm^2
E_solar = 0; % Variable para almacenar radiacion
%---Contador para step de motor-----
contEO = 0; % Contador de veces que se mueve el motor
EO_motor = 0; % grados
EO_step = 0; % grados
EO_OP = 0; % Contador de
%---Parametros del CCP-----
L = 8; % Longitud del colector en metros
P1 = 0.2650; % Medida del Foco lde la parabola en metros
e = 0.10; % Medida del excedente de la parabola en metros
der = 0.0158; % Diametro exterior del Receptor
dir = 0.0127; % Diametro interior del Receptor
dev = 0.04; % Diametro externo cubierta de vidrio
```

```

div = 0.034;           % Diametro interno cubierta de vidrio
%---Variables termicas y factores de materiales-----
fw = 4.7;             % Flujo del agua
dw = 1000;           % Densidad del agua en kg/m3
cp = 4187;           % Calor especifico del agua
%Valores iniciales
xa = 0;
xb = 90;
xm = (xb+xa)/2;
% xe = 0;
ti = 25;
Tcalculada = 0;
% m = 0.078;
% cp =4187;
%tamb = 45;
% Pcos = 1;
% Pext = 1;
%--Variables del ciclo desenfoque-----
%-
% Datos del Concentrador Cilindro Parabolico
p = 0.2650;
Drecep = 0.0381;
% Datos del ángulo incidente
sigma = 90;
Theta_i = -90;
incr_Theta_i = 0.001;
Theta_i_last = 90;
% Datos de barrido
yb = 0.584;
ya = -0.584;%-yb;

% ciclo del receptor
incr_receptor = 0.00001;
z_receptor = [p-Drecep/2:incr_receptor:p+Drecep/2];
Error_recept = 0.005;
[factor_focal_vec,Theta_i_vec] = Barrido_Enfoque(p,Drecep,ya,yb);
% contadores y banderas

while ( Day <= Day1)
%% Geometria Solar-----
[A_Hsun,A_Az] = Reloj_Solar(Hrs,Day,latt);

Z_ref = sind(A_Hsun);
X_ref = cosd(A_Hsun)*cosd(A_Az);
Y_ref = cosd(A_Hsun)*sind(A_Az);
A_NS = 0;
if (X_ref < 0)
    A_NS = 180;end
if (Y_ref < 0)
    A_EO = 180;end

N_S_ref = atand(Z_ref/X_ref) + A_NS;
E_O_ref = (atand(Y_ref/Z_ref) + A_EO) -90;

% Recurso solar disponible del archivo climatologico -----
Mx_day = Day*24 - 24;
Mx_Hrs = Hrs + Mx_day;
    %vectores para la interpolacion

```



```

%-----(_Consideraciones CCP_)-----
Pa = P1 + e; % Altura total del colector
% x1 = (sqrt((Pa+e)*(4*Pa))); % Apertura de la parabola 1
x1 = 1.168; % Longitud del ancho del colector
Ap1 = (L)*(x1); % Formula para pbtener el area de apertura
S/P
Ac = (L)*(dev); % Formula para obtener el area del absorbedor
fc = Ap1/Ac; % Formula para obtener el factor de
concentracion
%-----(_4_)-----
if ((L-Pa*tand(90-E_O_ref))< 0) % Condicional para angulos menores al
angulo imax
    Pext1= 0; % Variable Pext1 = 0
else
    Pext1= ((L-Pa*tand(90-E_O_ref))/L); % Variable calculada pérdidas en
los extremos
end
%-----(_Pérdidas por desenfoque_)-----
-----
diffd = E_O_ref - EO_motor;
if( diffd< 0)
    diffd = 0;
end

Vec_theta_i = Theta_i_vec* 1000; % subrutina
Vec_Fac_foc = factor_focal_vec; % subrutina

th_i_calculada = diffd; % cambio de variable
casilla_mitad = 1 + length(Vec_theta_i)/2;
th_i_casilla_2 = round(th_i_calculada*1000 + casilla_mitad + 0.5);
th_i_casilla_1 = th_i_casilla_2 - 1;

th_i_valor_2 = Theta_i_vec(th_i_casilla_2);
th_i_valor_1 = Theta_i_vec(th_i_casilla_1);
Fac_foc_casilla_2 = Vec_Fac_foc(th_i_casilla_2);
Fac_foc_casilla_1 = Vec_Fac_foc(th_i_casilla_1);

AA_theta_i = [th_i_valor_1, th_i_valor_2];
BB_Fac_foc = [Fac_foc_casilla_1, Fac_foc_casilla_2];
Constantes_Fac_foc = polyfit(AA_theta_i, BB_Fac_foc,1);
Fac_calculada = Constantes_Fac_foc(1,1)*th_i_calculada +
Constantes_Fac_foc(1,2);
Pdes = Fac_calculada;

%-----(_7_)-----
mw = (fw*(1/60)*(1/1000)); % Flujo de masa a partir del flujo de agua

if (Ib > 0)
    xa = 0;
    xb = 90;
    xm = (xb + xa)/2;
    diffa = 1;
    err = 0.00001;
    while (abs(diffa)>= err)
        t0a = xa;
        t0b = xb;
        t0m = xm;

        tma = (t0a + ti)/2;
        Qwa = Ib*Ap1*Pext1*Pcos*Pdes;
    end
end

```

```

ethacola = 0;
if (Ib >= 50)
    ethacola = 0.3 - 0.2660*(tma-tamb)/Qwa;
end
Qua = Qwa * ethacola;
fxa = mw*cp*(t0a-ti) - Qua;

tmb = (t0b + ti)/2;
Qwb = Ib*Ap1*Pext1*Pcos*Pdes;
ethacolb = 0;
if (Ib >= 50)
    ethacolb = 0.3 - 0.2660*(tmb-tamb)/Qwb;
end
Qub = Qwb * ethacolb;
fxb = mw*cp*(t0b-ti) - Qub;

diffa = fxa;
[xa,xb,xm,fxa,fxb];
if (fxa*fxb<0)
    %"SI"
    xm = (xb+xa)/2;
    xe = xb;
    xa = xa;
    xb = xm;
end

if (fxa*fxb > 0)
    % "NO"
    xb = xe;
    xa = xm;
    xm = (xb+xa)/2;
end
%pause(1)
end
end
    % "Respuesta";
to = xa;
%-----(_7.1_)-----
--
masa = mw;%12760;
k2 = 0.0000793;
k1 = -0.36771.*(1-exp(-(masa-5906).*k2))+0.36871;
Tinicial = ti;
Tfinal = to;
t = 0.1;%incr_hrs;
Tcalculada = (Tfinal- Tinicial).*(1- exp(-k1.*t)) + Tinicial;
%-----(_9_)-----
eta_th = Qua/Qwa;                % Eficiencia termica

%-----(_Consumo del motor_)-----
v_motor = 24;
i_motor = 0.22;
t_motor = contEO;
wh = v_motor * i_motor * (t_motor/3600);
%-----
[Day, Hrs, Ib, A_Hsun, A_Az];
Day_VEC(contA,1) = Day;
Hrs_VEC(contA,1) = Hrs;
Ib_VEC(contA,1) = Ib;
A_Hsun_VEC(contA,1) = A_Hsun;

```

```

A_Az_VEC(contA,1) = A_Az;
Z_refVEC(contA,1) = Z_ref;
X_refVEC(contA,1) = X_ref;
Y_refVEC(contA,1) = Y_ref;
N_S_refVEC(contA,1) = N_S_ref;
E_O_refVEC (contA,1)= E_O_ref;
Energia_solar_VEC(contA,1)= Ib*incr_hrs;
Pcos_VEC(contA,1)=Pcos;
Pext1_VEC(contA,1)=Pext1;
Pdes_VEC(contA,1)=Pdes;
diffd_VEC(contA,1)=diffd;
Qwa_VEC(contA,1)=Qwa;
Qua_VEC(contA,1)=Qua;
ti_VEC(contA,1)= ti;
xa_VEC(contA,1)= xa;
to_VEC(contA,1)= to;
EO_motorVEC(contA,1)=EO_motor;
EO_stepVEC(contA,1)=EO_step;
contEO_VEC(contA,1)=contEO;
wh_VEC(contA,1)=wh;
tamb_VEC(contA,1)= tamb;
Tcalculada_VEC(contA,1)=Tcalculada;
contA = contA + 1;

Hrs = Hrs + incr_hrs;

if( Hrs >= Hrs1)
    Hrs = Hrs1;
    Day = Day + 1;
    wh_VEC(1,contB)=wh;
    contB = contB + 1;
end

end

sumita = sum(Energia_solar_VEC);
%-----Funcion de promedios-----
esc = Ib_VEC*incr_hrs;
sum = sum(esc);
kh = sum/1000;
%-----
[Day_VEC, Hrs_VEC, Ib_VEC, A_Hsun_VEC, A_Az_VEC,X_refVEC, Y_refVEC,
Z_refVEC];

% %-----Radiacion/Horas-----
% figure(1)
% plot(Hrs_VEC,Ib_VEC,"b--")
% xlabel("Hrs del dia")
% ylabel("Watts")
% title("Radiacion")
% grid on
% grid minor
% %-----Altura solar/Horas-----
% figure(2)
% plot(Hrs_VEC,A_Hsun_VEC)
% hold on
% plot(Hrs_VEC,A_Az_VEC)
% figure(2)
% plot(Hrs_VEC,N_S_refVEC)
% hold on

```

```

% plot(Hrs_VEC,E_O_refVEC)
% %-----Pérdidas coseno/Horas-----
% figure(3)
% plot(Hrs_VEC,Pérdidas_Cos_VEC)
% xlabel("Hrs del dia")
% ylabel("Factor")
% title("Pérdidas coseno")
% grid on
% grid minor
% %-----Pérdidas extremos/Horas-----
% figure(4)
% plot(Hrs_VEC,Pérdidas_Ext_VEC1)
% xlabel("Hrs del dia")
% ylabel("Factor")
% title("Pérdidas Extremos")
% grid on
% grid minor
% legend('Pext')
% %-----Watts colector/Horas-----
% figure(5)
% plot(Hrs_VEC,W_VEC1)
% xlabel("Hrs del dia")
% ylabel("Watts")
% title("Watts en el colector")
% grid on
% grid minor
% legend('Altura Foco = 1')
% %-----Ti-To/Horas-----
% figure(6)
% plot(Hrs_VEC,ti_VEC)
% hold on
% plot(Hrs_VEC,to_VEC)
% xlabel("Hrs del dia")
% ylabel("Temperatura")
% title("Temperatura del fluido de trabajo")
% grid on
% grid minor
% legend('Temp Entrasa','Temp Salida')
% %-----Eficiencia del colector/Horas-----
% figure(7)
% plot(Hrs_VEC,n_VEC)
% hold on
% %plot(Hrs_VEC,n2_VEC)
% xlabel("Hrs del dia")
% ylabel("Eficiencia")
% title("Eficiencia del colector")
% grid on
% grid minor
%-----Funcion Step dato-----
figure(8)
plot(Hrs_VEC,E_O_refVEC)
%plot(Hrs_VEC,iyz_VEC)
hold on
plot(Hrs_VEC,EO_motorVEC)
hold on
plot(Hrs_VEC,EO_stepVEC)
xlabel("Hrs del dia")
ylabel("Angulo")
title("Step angulos")
grid on
grid minor

```

```

legend('Angulo ref','Angulo motor','Step Motor')
%-----Watts/Calor-----
% figure(9)
% plot (Hrs_VEC,w_abs_VEC)
% hold on
% plot (Hrs_VEC,w_des_VEC)
% hold on
% plot (Hrs_VEC,q3_VEC)
% hold on
% plot (Hrs_VEC,q4_VEC)
% hold on
% plot (Hrs_VEC,q4_VEC)
% hold on
% plot (Hrs_VEC,q5_VEC)
% hold on
% plot (Hrs_VEC,q6_VEC)
% xlabel("Hrs del día")
% ylabel("Watts")
% title("Watts en el sistema")
% grid on
% grid minor
% legend('Angulo Full','Angulo DES')
%-----Angulo de referencia para el CCP-----
%-----
% figure(10)
% plot (iyz_VEC,tau_VEC)
% xlabel("angulo")
% ylabel("Factor Transmitancia")
% title("Transmitancia")
% grid on
% grid minor
% legend('Angulo referencia CCP')
%-----Angulo de referencia para el CCP-----
%-----
% figure(11)
% plot (Hrs_VEC,iyz_VEC)
% xlabel("Hrs del día")
% ylabel("Angulo comp")
% title("Angulo CCP")
% grid on
% grid minor
% legend('Angulo referencia CCP')
%-----Angulo de referencia para el CCP-----
%-----
% figure(12)
% plot (eff_ter_VEC,eta_opt,'k*')
% xlabel("Eff Opt")
% ylabel("(Tm-Tamb)/Ib")
% title("Eficiencia instantanea")
% grid on
% grid minor
% % legend('Angulo referencia CCP')
%-----temperatura ambiente-----
%-----
figure(13)
plot (Hrs_VEC,Tcalculada_VEC)
hold on
plot (Hrs_VEC,tamb_VEC)
xlabel("Hrs del día")
ylabel("Temperatura salida del colector")
title("Temperatura")

```

```

grid on
grid minor
hold off
legend('Temperatura de salida','Temperatura ambiente')
% %-----Pérdidas por desenfoque-----
-----
figure(14)
plot (Hrs_VEC,Pdes_VEC)
xlabel("Hrs del día")
ylabel("Eficiencia por desenfoque")
title("Desenfoque")
grid on
grid minor
%-----Pérdidas por desenfoque-----
-----
% figure(15)
% plot(A_Az_VEC,A_Hsun_VEC)
% xlabel("Azimutal")
% ylabel("Altura solar")
% title("Trayectoria aparente del sol")
% grid on
% grid minor
toc

```



3. Anexos

