

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INNOVACIÓN E INVESTIGACIÓN EN
ENERGÍAS RENOVABLES.
INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TESIS

“EVALUACIÓN TÉRMICA DE UNA ESTUFA SOLAR
INDIRECTA CON CIRCULACIÓN FORZADA”

Que para obtener el grado de:
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presenta:
C. JONATHAN RUIZ PINEDA

Directora de tesis:
DRA. GUADALUPE LÓPEZ MORALES.

Junio, 2024.





Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
 Dirección de Servicios Escolares
 Departamento de Certificación Escolar
 Autorización de impresión



Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
 Fecha: 7 de agosto del 2024

C. Jonathan Ruíz Pineda

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Evaluación térmica de una estufa solar indirecta con circulación forzada.

En la modalidad de: Tesis profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera

Dra. Aracely López Grijalva

Dr. Héber Vilchis Bravo

Firmas:

Cop. Expediente

“La ciencia no es sino una perversión de sí misma, a menos que tenga como objetivo final el mejoramiento de la humanidad.

Nikola Tesla (1856-1943).

DEDICATORIA

A mis padres, Laura Elena Pineda López y Fidel Ruiz Aquino, por su apoyo y comprensión incondicional en cada etapa de mi vida. Por el ejemplo de fortaleza y dedicación que ha sido la fuerza impulsora detrás de mis logros.

A mi hermana Laura, por ser un pilar en cada proceso y por motivarme a seguir adelante en cada proceso de mi vida; por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, por darme la razón del por qué luchar.

A mi abuela Francisca por demostrarme que hay que saber luchar por nuestras metas, por ser mi faro en la tormenta, iluminando mi camino con sabiduría, paciencia y amor inquebrantable.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme la vida, por darme la oportunidad de cumplir con éxito esta etapa enriquecedora en mi formación profesional y humana.

A mi madre, por el sacrificio de sacarme adelante, por los consejos, el amor incondicional y por estar detrás de cada proyecto como muestra de apoyo, regalándome sabiduría.

A mi familia, por ser el pilar en cada uno de los procesos de mi vida, por darme fuerza y motivación, por estar en los momentos difíciles.

A Xiomara Nataren, Oswaldo Reyes, Ariel López, mis colegas y amigos, con quienes tuve la fortuna de conocer y compartir un sinfín de aventuras durante la carrera y además por ser parte de esta nueva etapa.

A Jennifer Diaz, por ser mi fuente constante de apoyo, paciencia y amor incondicional. Cada logro y cada paso en este viaje académico, tu aliento, tu motivación y comprensión en esta etapa.

A mis directores de tesis, Dr. Heber Vilchis Bravo y la Dra. Guadalupe López Morales, por su guía, apoyo y paciencia en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los revisores de esta tesis, que con sus comentarios y sugerencias enriquecieron y mejoraron la comprensión de este trabajo.

Al instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, por darme la oportunidad de colaborar en esta institución y su apoyo para llevar a cabo este proyecto.

Índice

<i>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</i>	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.4 JUSTIFICACIÓN	5
1.5 OBJETIVOS GENERALES	6
1.5.1 Objetivos Particulares	6
 <i>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO</i>	 7
2.1 RADIACIÓN SOLAR	7
2.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	9
2.3 RADIACIÓN SOLAR Y TEMPERATURA PROMEDIO EN MÉXICO	11
2.4 ESTUFA SOLAR	12
2.5 TIPOS DE ESTUFAS SOLARES	13
2.6 COLECTORES SOLARES	21
2.6.1 Colectores solares planos	22
2.6.2 Colectores solares de tubos de vacío	23
2.7 INTERCAMBIADOR DE CALOR	255
2.7.1 Intercambiador de calor directo	25
2.7.2 Intercambiador de calor indirecto	26
 <i>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA</i>	 288
3.1 DISEÑO ESTRUCTURAL DE SISTEMA	28
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	31
3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA	35

<i>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES</i>	38
4.1 EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DENTRO DEL TUBO AL VACÍO DE ALTA Y BAJA PRESIÓN.	38
4.2 CALENTAMIENTO DEL AGUA POR TUBO AL VACÍO DE ALTA Y BAJA PRESIÓN. ..	41
4.3 CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO USANDO UN DISPENSADOR DE AGUA.	44
4.4 EVALUACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA USANDO UN SISTEMA DE BOMBEO.	45
4.4.1 Prueba realizada en un día nublado.	45
4.4.2 Prueba realizada en un día despejado	45
 <i>CONCLUSIONES</i>	53
<i>TRABAJO A FUTURO</i>	54
<i>REFERENCIAS</i>	55
<i>ANEXO: PRODUCTIVIDAD ACADÉMICA</i>	55

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Diseño del primer prototipo	3
Ilustración 2. Prototipo experimental de la estufa solar.	4
Ilustración 3. Imagen termográfica del serpentín	4
Ilustración 4. Distribución del espectro de la radiación solar sobre la atmósfera y del mar	7
Ilustración 5. Dispersión del espectro de la radiación.....	8
Ilustración 6. Piranómetro Blanco y Negro Eppley	10
Ilustración 7. Diagrama y fotografía de un Pirheliómetro	10
Ilustración 8. Radiación solar en México.....	11
Ilustración 9. Temperatura en México.	12
Ilustración 10. Estufa solar tipo caja	14
Ilustración 11. Estufa solar directa tipo panel	14
Ilustración 12. Estufa solar directa tipo panel con material reciclado.....	17
Ilustración 13. Aplicación de la estufa solar tipo panel	15
Ilustración 14. Estufa solar tipo parabólica.....	16
Ilustración 15. Variación de una estufa solar directa	17
Ilustración 16. Estufa solar directa tipo cilíndrico parabólica.....	17
Ilustración 17. Estufa solar indirecta con colector plano	19
Ilustración 18. Diagrama de funcionamiento de estufa solar indirecta	19
Ilustración 19. Diagrama (izquierda) y fotografía (derecha) de una estufa solar tipo Scheffler.	28
Ilustración 20. Colector solar plano.	28
Ilustración 21. Tubo al vacío de vidrio de baja presión.	29
Ilustración 22. Tubo al vacío de vidrio de alta presión (heat pipe).	304
Ilustración 23. Intercambiador de calor de contacto directo fluido-fluido.....	25

Ilustración 24. Intercambiador de calor de placas.....	26
Ilustración 25. Intercambiador de calor de tubos y carcasa.	27
Ilustración 26. Diagrama general de la metodología desarrollada.....	28
Ilustración 27. Diagrama del diseño de la estufa solar indirecta.....	29
Ilustración 28. Diseño del colector solar (a) y serpentín metálico (b)	30
Ilustración 29. Esquema del sistema de cocción solar propuesto	31
Ilustración 30. Construcción del colector solar: (a) cobre dobla en forma de U y (b) cobre dentro del tubo al vacío	32
Ilustración 31. (a) Geometría del serpentín y (b) acople de serpentín con colector solar	33
Ilustración 32. Bomba de agua (a) y Sensor de flujo Modelo YF-S201 (b)	33
Ilustración 33. Contenedor de agua (a) y acople de adaptador de cobre (b)	34
Ilustración 34. Metodología de la evaluación térmica de la estufa solar indirecta.	35
Ilustración 35. Termómetro digital de inmersión.....	35
Ilustración 36. Dispositivo de medición de temperatura con termopares (a) y el software DAQAmi (b).	36
Ilustración 37. Camara Infraroja Flir E60	37
Ilustración 38. Posicionamiento de termopares en el sistema.....	39
Ilustración 39. Grafica de la medición de temperaturas de tubos al vacío de alta y baja presión..	40
Ilustración 40. Gráfica de la medición de la temperatura del cobre.....	41
Ilustración 41. Sistema de calentamiento de agua.....	41
Ilustración 42. Gráfica de la medición de la temperatura del agua.	42
Ilustración 43. Sistema de calentamiento de agua usando un tubo al vacío de baja presión.	43
Ilustración 44. Gráfica de la temperatura del agua calentada con tubo al vacío de baja presión. ...	44
Ilustración 45. Gráfica de la medición del caudal.	45

Ilustración 46. Sistema completo de la estufa solar indirecta (a) y monitoreo de la temperatura al inicio (arriba) y final (abajo) de la prueba (b).	46
Ilustración 47. Temperatura monitoreada en el serpentín y en el interior del tubo al vacío (a) y la irradiación solar promedio durante el día nublado (b)..	47
Ilustración 48. Medición de temperatura con nubosidad.	48
Ilustración 49. Temperatura en la estufa solar agregando un concentrador solar en un día con nubosidad.	48
Ilustración 50. Temperatura inicial (a) y final (b) en la estufa solar con concentrador en el colector en un día con nubosidad.	48
Ilustración 51. Medición de temperatura del sistema solar térmico con la integración de un concentrador reflejante en día despejado.	48
Ilustración 52. Temperatura monitoreada en el sistema con concentrador solar (a) y la irradiación solar promedio durante el día soleado.	48
Ilustración 53. Imagen termográfica de la temperatura de serpentín en día soleado.	48

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño, la construcción y la evaluación térmica de una estufa solar indirecta con circulación forzada. Este dispositivo consta de un serpentín de cobre, que por medio de transferencia de calor calentará los alimentos, y de un colector solar, encargado de transformar la radiación solar en energía térmica para calentar agua. Por medio de una bomba de agua se hizo circular el fluido (agua) a través de un sistema hidráulico de cobre y con un sensor de caudal se monitoreó la velocidad de circulación del agua. Adicionalmente, se acopló un concentrador solar en forma cilíndrica parabólica para obtener una mayor concentración de la radiación solar a lo largo del colector solar. Se compararon las temperaturas obtenidas de la estufa usando el colector con y sin concentrador solar, bajo condiciones de un día soleado y día nublado. El sistema propuesto logró calentar el fluido a una temperatura de hasta 120 °C y a su vez calentar el serpentín a 48.6 °C, teniendo una temperatura ambiente de 29 °C. Los resultados discutidos en este trabajo de tesis corresponden a las primeras evaluaciones térmicas de una estufa solar indirecta con circulación forzada propuesta, los cuales fungen como fundamento para proponer mejoras al sistema que permitan obtener temperaturas mayores a 65 °C. La ventaja de esta estufa solar indirecta es que permite la cocción de alimentos dentro del hogar, sin la necesidad de que el usuario esté expuesto al sol durante este proceso. Por tal motivo, puede ser implementado en zonas del estado de Chiapas, en donde la población tiene un alto nivel de marginación, ya que no requiere de un gasto para adquirir combustible para su funcionamiento. Adicionalmente, su uso concientizará en el aprovechamiento de energías limpias y sustentables, y contribuirá en llevar una alimentación sana, nutritiva y suficiente a la población de acuerdo con el Objetivo 2 de los ODS: Hambre cero.

Palabras clave: Estufa Solar, Radiación solar, sistema solar térmico.

ABSTRACT

This work presents the design, construction and thermal evaluation of an indirect solar stove with forced circulation. This device consists of a copper coil, which will heat the food through heat transfer, and a solar collector, responsible for transforming solar radiation into thermal energy to heat the water. Using a water pump, the fluid (water) was circulated through a copper hydraulic system and the circulation rate of the water was monitored with a flow sensor. Additionally, a parabolic cylindrical solar concentrator was attached to obtain a greater concentration of solar radiation along the solar collector. The temperatures obtained from the stove using the collector with and without a solar concentrator were compared, under conditions of a sunny day and a cloudy day. The proposed system managed to heat the fluid to a temperature of up to 120 °C and in turn heat the coil to 48.6 °C, having an ambient temperature of 29 °C. The results discussed in this thesis correspond to the first thermal evaluations of a proposal for an indirect solar stove with forced circulation, which provide the necessary information to propose improvements to the system that allow obtaining higher temperatures. The advantage of this indirect solar stove is that it allows you to cook food inside the home, without the user needing to be exposed to the sun during this process. Therefore, it can be implemented in areas of the state of Chiapas, where the population has a high level of marginalization, since it does not require spending on the purchase of fuel for its operation. In addition, its use will raise awareness among the population about the use of clean and sustainable energy.

KEY WORDS: Solar stove, Solar radiation.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Para el aprovechamiento de las energías renovables, como lo es la energía solar, se requiere continuamente del desarrollo de nuevas tecnologías que tengan mayor eficiencia para beneficio de la sociedad. La cocción de alimentos es una de las necesidades primordiales del ser humano, la cual es usada como un método para la conservación de los alimentos manteniendo su sabor, hacerlos más digeribles y a su vez reducir el riesgo de una intoxicación alimentaria. Existen sistemas de cocción que emplean calor para transformar las propiedades organolépticas y fisicoquímicas de los alimentos para su consumo posterior. Los sistemas convencionales de cocción requieren de fuentes energéticas como la electricidad o combustibles fósiles que provocan un impacto negativo en el medio ambiente, por la quema de leña o uso de carbón que emiten gases tóxicos y perjudican la salud; a su vez su adquisición depende de la economía de los habitantes.

La mayor parte de la población a nivel nacional cocina sus alimentos con métodos milenarios como son los fogones de leña y lo más habitual las estufas de gas LP. De acuerdo con la Organización mundial de la salud (OMS), en el 2022 un aproximado de 2,600 millones de personas cocinaban con fogones de leña, carbón vegetal y carbón mineral, entre otros (Torres Muro et al, 2019). El uso de una estufa solar es una alternativa sustentable para mitigar los casos de personas con enfermedades pulmonares y disminuir el porcentaje de muertes por enfermedades respiratorias.

El estado de Chiapas, México, se caracteriza por ser una región cálida, en donde los meses de marzo y mayo presenta radiaciones solares de 5.920 kWh/m^2 promedio mensual diario, siendo abril como el mes con mayor captación de radiación al día con 6.150 kWh/m^2 . A pesar de las características climáticas de este estado, Chiapas carece de proyectos de investigación para lograr el acceso universal a una alimentación sana, nutritiva y suficiente, de acuerdo al Objetivo 2 de los ODS: Hambre cero (Naciones Unidas, s.f.-a). En este trabajo de tesis se presenta una alternativa sostenible y ecológica para la cocción de alimentos que consiste en el desarrollo y la evaluación de un sistema solar térmico, en caso particular una estufa solar indirecta de circulación forzada que aproveche la radiación obtenida por el Sol. El sistema propuesto es capaz de alcanzar temperatura de hasta $99 \text{ }^\circ\text{C}$ en el líquido y en el serpentín a $48.5 \text{ }^\circ\text{C}$ teniendo la temperatura ambiente de $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Los resultados discutidos en este trabajo de tesis corresponden a las primeras evaluaciones térmicas de una estufa solar indirecta con circulación forzada propuesta, los cuales fungen como fundamento para proponer mejoras al sistema que permitan obtener mayores temperaturas, como la evaluación térmica usando otros fluidos, así como la integración de una etapa de control y automatización en el sistema de flujo de agua.

1.2 ANTECEDENTES

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas configuraciones y tipos de estufas solares con la intención de mejorar su eficiencia para sustituir aquellas que requieren de combustibles fósiles o energía eléctrica. La principal diferencia de cada configuración de diseño depende del mecanismo del efecto invernadero, la conducción, la convección, el material absorbedor y el uso de materiales aislantes adecuados y las fuentes externas necesarias para el correcto funcionamiento de cada sistema.

La evolución que ha presentado el diseño de una estufa solar data desde finales de siglo XVII cuando E. W. Von Tschirnhausen construyó un horno solar que concentraba la radiación solar con un espejo cóncavo de 1.6 m de diámetro para la elaboración de cerámica. Otro diseño que planteó el uso de un colector plano fue propuesto por Horace de Saussure en 1767, que consistió en una caja negra con tapa de vidrio capaz de alcanzar una temperatura en su interior de 85 °C. Años más tarde, en 1878, el científico Auguste Mouchot desarrolló una estufa solar que utilizaba un colector en forma de cono truncado de 2,2 m de diámetro (Terra Fundación, 2017). Actualmente existe una diversidad de modelos y tipos de estufas solares, que dependiendo de la época y del desarrollo de nuevos materiales absorbedores o con alta reflectividad, se han modificado con la intención de presentar una mayor eficiencia y optimizar los tiempos de cocción. Las primeras estufas solares usadas en México fueron a mediados de 1995 cuando la universidad de Wisconsin donó estufas solares a zonas rurales del país. A partir de esto, se despertó el interés de científicos mexicanos en desarrollar nuevos modelos usando diferentes geometrías del colector de rayos solares (González-Áviles & Servín Campuzano, 2015).

Recientemente, el grupo de Investigación de Térmica Solar del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER-UNICACH) desarrolló un prototipo térmico solar para calentar alimentos, el cual funge como referencia y antecedente para este proyecto de tesis. Los

resultados fueron presentados en el Congreso Nacional de Secado, Cocción y Refrigeración Solar de Alimentos 2022 (Castellanos-Betanzos et al, 2022). El funcionamiento de la estufa solar mostrada en la Ilustración 1 está basado en un sistema solar térmico con circulación forzada. Con la ayuda de una bomba eléctrica se hace circular agua previamente calentada por un calentador solar de agua. El agua circula hasta pasar por un serpentín de cobre, el cual desemboca en un tanque 2 en donde el líquido es almacenado.

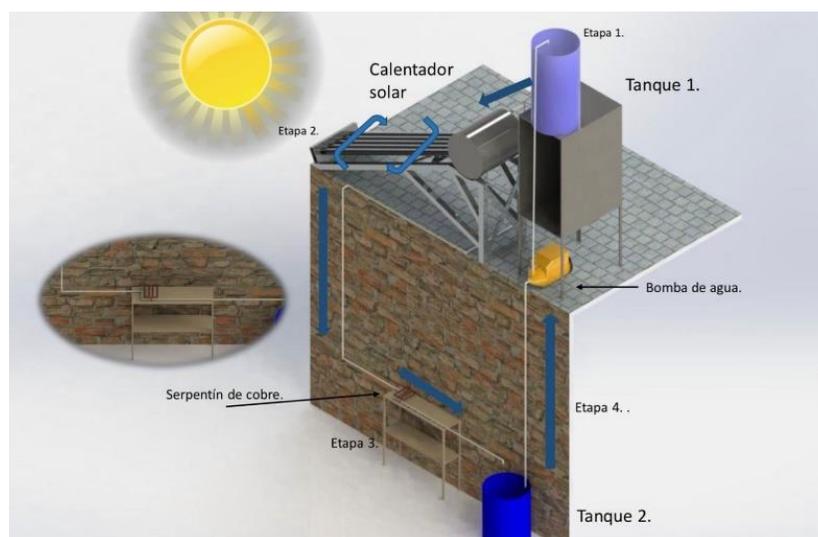


Ilustración 1. Diseño del primer prototipo

La construcción y evaluación del sistema se realizó a un costado de la plataforma de prototipos del IIIER ubicado en la zona norte de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. En la Ilustración 2 se observa una fotografía del prototipo construido.

Las evaluaciones constaron en monitorear y comparar la temperatura del agua en la entrada y a la salida del serpentín de cobre. En la Ilustración 3 se presenta la imagen capturada por una cámara termográfica del serpentín del cobre al hacerle circular agua caliente. Aunque las pruebas se realizaron en condiciones de nubosidad, se observó un aumento de temperatura de hasta 36.9 °C.



Ilustración 2. Prototipo experimental de la estufa solar

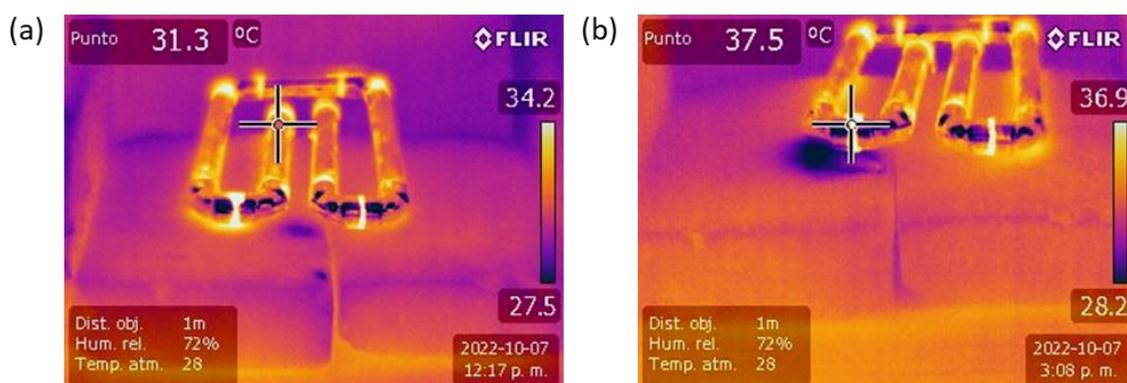


Ilustración 3. Imagen termográfica del serpentín

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los combustibles fósiles o la electricidad son las fuentes de energía que típicamente usan los sistemas de cocción de alimentos instalados en los hogares. El consumo del petróleo, carbón o gas natural se encuentra en un 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial, según las Naciones Unidas (Naciones Unidas, s. f.-b). El gran porcentaje de gases contaminantes de efecto invernadero en la atmósfera actúan como una plataforma de cristal que atrapa el calor del sol e impide que salgan al espacio, ocasionado el calentamiento global que contribuye al cambio

climático. Además, la presencia de altos niveles de contaminantes causa problemáticas a largo plazo en la población, como enfermedades de sistema respiratorio, que influye de manera negativa en la salud de las personas. Es importante mencionar que el 80% de las enfermedades respiratorias son producidas por el humo generado por la quema de leña dentro del interior de los hogares. Por último, la extracción de leña para el uso en cocinas rurales causa una deforestación importante que tiene como consecuencia la alteración del ciclo del agua, daños al ecosistema, pérdida de biodiversidad y aridez en el terreno, que en conjunto aceleran el calentamiento global y el cambio climático de nuestro planeta.

Aunque actualmente existe una gran variedad de estufas solares, el uso de ellas requiere que el usuario este expuesto al sol para verificar la correcta cocción del alimento.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El uso de una estufa solar tiene un amplio beneficio ante el interés socioeconómico del país, ya que la implementación de este dispositivo en zonas con mayor marginación del país disminuiría la problemática que presenta familias de escasos recursos económicos, que no pueden adquirir gas o electricidad.

El diseño de este sistema termo solar para la cocción de alimentos dentro de los hogares está basado en varios aspectos importantes, que incluyen, la eficiencia energética, la sustentabilidad ambiental y beneficios económicos. Las estufas solares aprovechan la energía del sol, que es un recurso natural duradera, inagotable y abundante. El impacto que se puede generar al utilizar una estufa solar, en lugar de una estufa convencional que funcione con gas o electricidad, es alta debido a que reduce significativamente el consumo de energía.

La sostenibilidad ambiental de las estufas solares tiene como principal impacto la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como minimizar la dependencia de combustibles fósiles. Emplear una estufa solar evitará la emisión de humo y conservará la calidad del aire, lo que contribuye a la salud y seguridad de las personas que la utilizan. De esta forma, se garantiza la mitigación del cambio climático para preservar el medio ambiente.

En muchas zonas o regiones rurales del estado de Chiapas puede haber dificultades para acceder a redes de energía convencionales. Las estufas solares proporcionan soluciones rentables y

sostenibles para cocinar y calentar alimentos en las comunidades, sin dependencia de una red de energía tradicional. Los beneficios ambientales, económicos y sociales que brinda el uso de una estufa solar son varios, por lo que resulta ser una alternativa ecológica para mitigar las problemáticas socioambientales. Además, también ayudará a promover socialmente el uso de estas tecnologías limpias y sustentables.

1.5 OBJETIVOS GENERALES

Diseñar y construir un sistema solar térmico indirecto con circulación forzada capaz de calentar alimentos.

1.5.1 Objetivos Particulares

- Evaluar el sistema solar térmico mediante el monitoreo de la temperatura del fluido.
- Maximizar la captación y retención de la energía solar, para su posterior conversión en energía térmica capaz de calentar líquidos de manera rápida.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se aborda los fundamentos de la radiación solar, así como las partes fundamentales que componen una estufa solar. En específico se expone la importancia de un colector solar. Además, se describe información sobre el diseño de los concentradores hasta las distintas configuraciones de una estufa solar. Cada componente desempeña un papel esencial en la captura y utilización eficiente de la radiación solar para la cocción de alimentos.

2.1 RADIACIÓN SOLAR

Conocer las características de la radiación solar permite diseñar nuevas tecnologías que aprovechen esta fuente de energía para satisfacer las necesidades de la población. La radiación solar es la energía electromagnética emitida por el sol, dentro del rango de longitud de onda de entre 150 nm y 2500 nm. En la Ilustración 4 se presenta la distribución del espectro de la radiación solar sobre la atmósfera y a nivel del mar (Ordoñez García, 2021). La proporción de esta radiación en las distintas regiones del espectro electromagnético es aproximadamente: 7% de ultravioleta (UV), 43 % de luz visible, 49% de Infrarrojo (IR) y el resto 1%. La energía recibida por la Tierra en un año es de aproximadamente $5,46 \times 10^{24}$ vatios (W), ya que su distribución espectral es muy similar a la del cuerpo negro para el rango de longitudes de onda típico de los procesos térmicos.

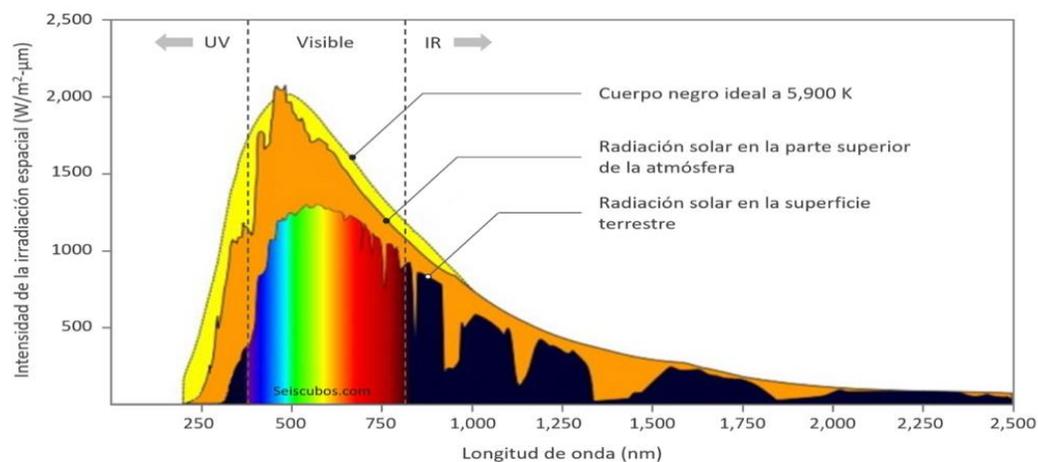


Ilustración 4. Distribución del espectro de la radiación solar sobre la atmósfera y del mar (Seis cubos, 2021)

Ilustración obtenida de <https://www.seiscubos.com/conocimiento/efecto-de-la-radiacionsolar-en-latierra>

La cantidad de radiación puede estar expresada en términos de irradiación, que es una medida del flujo de radiación que incide durante un periodo de tiempo en una determinada área, cuya unidad es Wh/m^2 o J/m^2 (Ordoñez García, 2021).

La constante solar describe la cantidad de energía solar, por unidad de superficie, que incide sobre la superficie de la atmósfera de manera perpendicular a los rayos incidentes. Su valor medio es de 1367.7 kW/m^2 . Al llegar la radiación solar a la superficie de la Tierra, el flujo de dicha radiación disminuye debido a la absorción y dispersión que sufre al interactuar con la atmósfera terrestre, llegando a tener un valor medio de 800 a 900 kWh/m^2 (Varas, 2010).

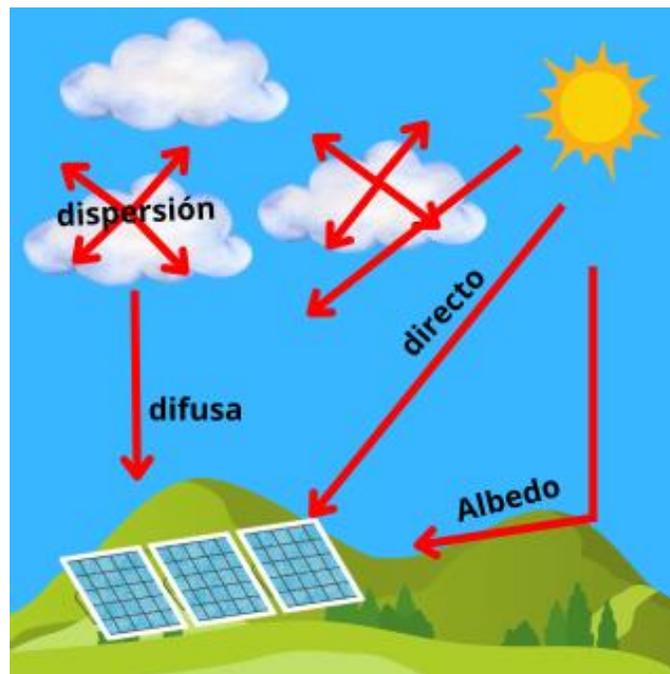


Ilustración 5. Dispersión del espectro de la radiación

La Ilustración 5 muestra los diferentes tipos de dispersión que sufre la radiación solar al llegar a la Tierra, los cuales se describen a continuación (Agencia Estatal de Meteorología, 2008):

- Radiación solar directa: Es aquella radiación que no es dispersada ni absorbida por la atmósfera terrestre, es decir los rayos del sol no sufren algún cambio de dirección. Se

compone principalmente de luz visible y radiación ultravioleta (UV), pero también incluye una pequeña cantidad de radiación infrarroja (IR).

- Radiación solar difusa: Esta radiación es dispersada en la atmósfera y llega a la superficie terrestre desde todas partes, sin seguir una trayectoria directa desde el sol. Esta dispersión es provocada por las partículas atmosféricas, moléculas de aire y nubes.
- Radiación global: Es la suma de la radiación solar directa y difusa que llega a la superficie terrestre. Es decir, es la energía directamente transmitida desde el sol, incluida la energía dispersada por la atmósfera y las nubes.
- Radiación solar por reflexión (Albedo): Es la capacidad de reflexión o la fracción de la radiación reflejada sobre una superficie en la Tierra o cualquier otra superficie.

2.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Los instrumentos de medición para la radiación solar dependen del tipo de radiación detectada, ya sea global, directa o difusa.

Los piranómetros miden la radiación solar global, es decir, la contribución de la radiación semiesférica directa y difusa que cae sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180°. Este instrumento detecta la diferencia de temperatura de dos sectores pintados en color negro y blanco de un disco pequeño. Al incidir radiación solar, la sección en color negro presenta mayor temperatura ya que absorbe una mayor radiación. Esta diferencia de temperatura es detectada por una resistencia térmica, la cual es convertida en una señal eléctrica. La Ilustración 6 muestra un piranómetro termoelectrónico Blanco y Negro Eppley modelo 8-48 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, s.f.).



Ilustración 6. Piranómetro Blanco y Negro Eppley

Ilustración obtenida de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>.

Los pirheliómetros detectan la cantidad de radiación directa que incide en la Tierra. Estos instrumentos utilizan generalmente termopilas como detectores (Seven Sensor, 2022). La radiación solar que incide en la ventana de vidrio de este dispositivo viaja hasta llegar a una termopila, el cual convierte el calor en una señal eléctrica. La Ilustración 7 corresponde un diagrama general (a) y la fotografía (b) de un ejemplar de pirheliómetro.

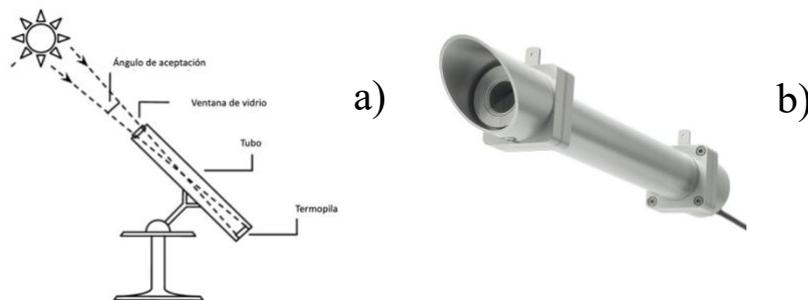


Ilustración 7. Diagrama y fotografía de un Pirheliómetro

Ilustración obtenida de <https://www.sevensensor.com/es/que-es-un-piranometro-y-comomide-la-irradiancia>

2.3 RADIACIÓN SOLAR Y TEMPERATURA PROMEDIO EN MÉXICO

En México se presenta un rango de irradiación solar anual promedio de entre 5.66 KWh/m² y 6.16 KWh/m² al día, lo que comprueba que es un país idóneo para la implementación de sistemas termo solares (Insumos energía renovable fotovoltaica en México y su proyección al 2020, 2012). De acuerdo con el mapa de la Ilustración 8 se observa que la región Norte-Occidente presenta la mayor radiación solar. Sin embargo, en la región Sur, Centro y Centro-Occidente existen zonas con alta radiación solar (Global Solar Atlas, s. f.).



Ilustración 8. Radiación solar en México

Ilustración obtenida de <https://globalsolaratlas.info/download/mexico>

En la Ilustración 9 se presenta la información gráfica de las temperaturas máximas promedio en rango de siete días en México. Las temperaturas pueden variar significativamente en diferentes regiones de México, ya que el país cuenta con una geografía diversa y varios tipos de climas, desde desiertos hasta selvas tropicales. La temperatura promedio al Sur del país varía de los 30°C hasta 40°C y en el norte de 35°C hasta 45°C (Servicio Meteorológico Nacional, s. f.).

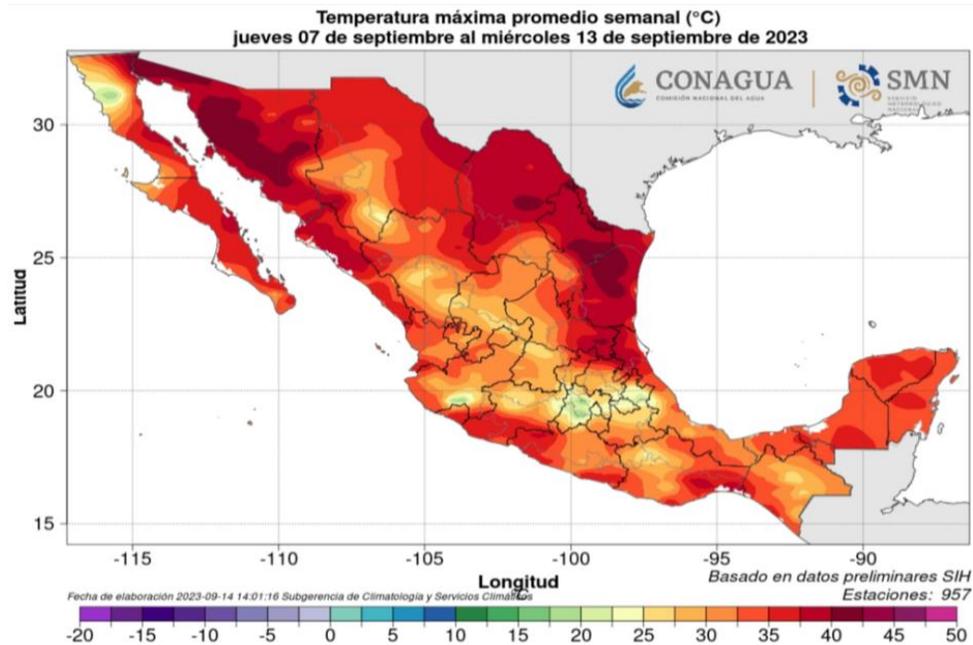


Ilustración 9. Temperatura en México

Ilustración obtenida de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/mapas-diarios-de-temperatura-y-lluvia>

2.4 ESTUFA SOLAR

Este sistema solar térmico permite la cocción de alimentos utilizando la radiación solar, que lo hace un dispositivo sustentable, que no requiere de ningún combustible ni energía eléctrica. La principal diferencia entre una estufa solar y una estufa de uso convencional es que la estufa solar utiliza un recurso renovable y no contaminante como es la energía solar. Estos dispositivos aprovechan la radiación solar directa y la convierten en calor que es útil para calentar y cocinar alimentos (Cifuentes, 2016).

Las estufas solares pueden tener diferentes configuraciones dependiendo del tipo de reflector o concentrador solar, así como el sistema de captación y conversión de energía para optimizar la eficiencia de estos dispositivos. El uso de esta alternativa ecológica y sustentable implica un ahorro en la compra de combustibles convencionales que se usa para cocinar alimentos, además de minimizar la emisión de contaminantes dañinos para la salud y el medio ambiente, que a su vez combate al calentamiento global.

El principio de funcionamiento de una estufa solar se basa en la captación y concentración de la luz solar para transformarla en calor. Esta energía calorífica se usa para la cocción de alimentos, incluido el hervir líquidos, asar, hornear o deshidratar, de una forma eficiente utilizando la energía solar. Gracias a ello no es necesario el uso de combustibles fósiles u otras fuentes de energía.

El uso de una estufa solar no requiere gastos adicionales, ya que la energía utilizada es gratuita y renovable. Algunas ventajas de estas estufas es que son accesibles, ligeras y portátiles, lo cual lo hacen ideales para las actividades al aire libre. La seguridad suele ser eficiente, ya que no requieren de fuego abierto ni combustibles inflamables, no generan humos ni emisiones tóxicas.

2.5 TIPOS DE ESTUFAS SOLARES

Existen muchos tipos de estufas solares, cada uno con características específicas para adaptarse a diferentes necesidades y entornos. Desde las sencillas y económicas hasta las más avanzadas tecnológicamente, estas estufas ofrecen una gama de opciones para cocinar de forma limpia y eficiente.

A continuación, se describen algunos tipos de estufas solares, dependiendo su clasificación como estufas directas o indirecta (Misra et al., 2023). Las primeras se caracterizan por tener el recipiente, en donde se colocan los alimentos, en el punto focal de un reflector o se encuentran expuestos a la radiación solar (Almada et al., 2005). Por otro lado, las estufas solares indirectas aprovechan los rayos del Sol para calentar un fluido que se almacena en un depósito aislado, para su posterior uso. Cuando se requiere, este fluido se distribuye hacia el interior de una cocina convencional en donde se trasfiere el calor a una parrilla para calentar los alimentos.

- *Tipo caja.*

Este sistema solar térmico directo es el más común para la cocción de los alimentos, el cual consiste en aislar una caja con una cubierta transparente principalmente de vidrio o plástico, lo que permite que la radiación solar se introduzca al interior de la caja y se mantenga en su interior. En la Ilustración 10 se muestra los rayos del sol que inciden sobre las paredes internas (reflector plano interno) de la caja y a su vez en la olla (absorbedor que funge como cuerpo negro) en donde se

encuentran los alimentos para su cocción. El calor al interior de la caja se acumula creando el efecto invernadero, teniendo un rango de temperaturas de entre 80°C a 100°C (Unida, 1997).

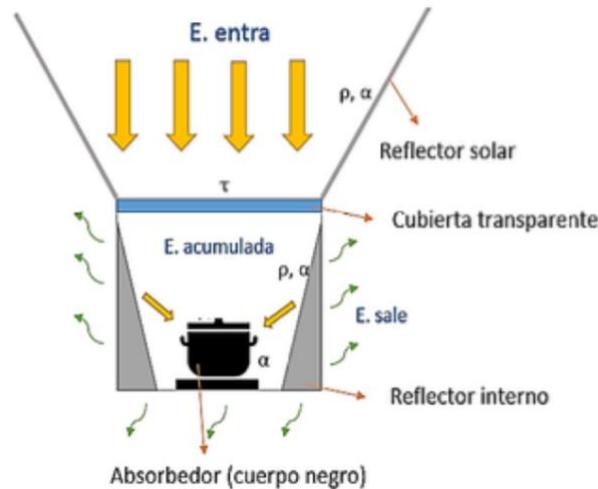


Ilustración 10. Estufa solar directo tipo caja

Ilustración obtenida de: <https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/COCINA%20SOLAR%20TIPO%20CAJA.pdf>

Se puede variar el diseño de esta estufa integrando al sistema, el uso de paneles reflectantes ajustables con el objetivo de optimizar el aprovechamiento de la radiación incidente y tener una mejor zona de captación solar en diferentes horas del día (ver Ilustración 11). Este tipo de estufa solar directa se le conoce como tipo panel, es el diseño más común por la facilidad de construcción y por ser de bajo costo.



Ilustración 11. Estufa solar directa tipo panel

El diseño de una estufa solar que sea fácil de armar y transportar es de suma importancia por varias razones. Por mencionar algunas, el simplificar el proceso de armado hace que la estufa solar sea accesible para un público más amplio, incluidas personas con poca experiencia en la construcción o en el uso de tecnología, facilitar el transporte permite llevar la estufa solar a áreas remotas donde el acceso a la energía convencional puede ser limitado o inexistente. Esto puede ser crucial en comunidades rurales o en situaciones de emergencia. Un modelo de una estufa solar directo con materiales reciclados se muestra en la Ilustración 12, la cual tiene unos reflectores de cartón cubiertos con papel reflejante (aluminio).



Ilustración 12. Estufa solar directo tipo panel con material reciclado



Ilustración 13. Aplicación de la estufa solar tipo panel.

Para cocinar los alimentos se debe colocar la olla dentro de una bolsa de plástico transparente y cerrarlo lo más hermético posible. La olla se coloca al centro de la estufa, como se muestra en la Ilustración 13.

- *Estufa solar directa tipo parabólica.*

Este tipo de estufa solar, mostrado en la Ilustración 14, utiliza un reflector de material reflejante en forma parabólica, el cual concentra toda la radiación solar incidente en un solo punto, llamado punto focal (Ahmed et al., 2020). En esta zona es donde se coloca un recipiente para la cocción de alimentos. Por su geometría, este diseño alcanza altas temperaturas en corto tiempo en el punto focal. Generalmente se complementa este sistema con un seguidor solar para mejorar la recepción de la radiación solar.

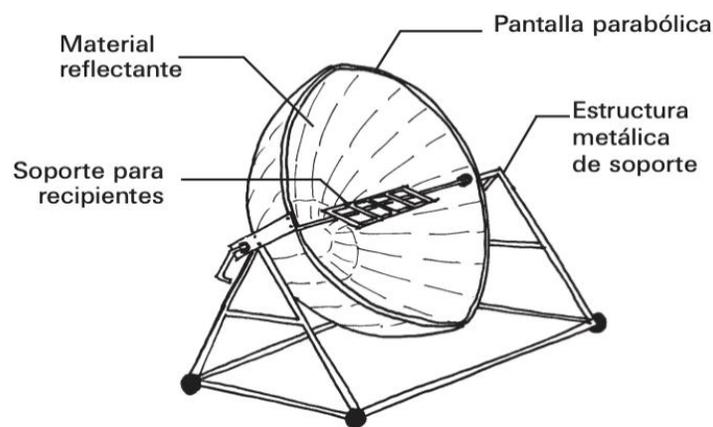


Ilustración 14. Estufa solar directa tipo parabólica

Ilustración obtenida de <https://www.yo-reciclo.org/cocinas-solares-cthdv>

Otro modelo de una estufa solar parabólica es el prototipo basado en diseño del libro “Cooking with the sun: How yo build and use solar cookers” (Halacy & Halacy, 1992), que consta de un reflector formado con 24 trozos de cartón colocados en forma radial cada 15 grados (ver Ilustración 15). Este diseño implica un mejoramiento en la eficiencia y el rango de temperatura logrado.



Ilustración 15. Variación de una estufa solar directa

Ilustración obtenida de: <https://www.cienciafacil.com/prototipos.html>

Un caso particular es la estufa solar directa con un concentrador en forma cilíndrica parabólica, el cual concentra la radiación solar a lo largo del eje focal de la parábola. Como colector de dicha radiación, se emplea un tubo de vidrio que en su interior tiene un material absorbente capaz de transformar la energía solar en energía térmica. Este tubo colector es colocado en la distancia focal de la parábola para obtener una máxima temperatura. Los alimentos son cocinados dentro del tubo.



Ilustración 16. Estufa solar directa tipo cilíndrico parabólica

En la Ilustración 16 se muestra una estufa solar diseñada y construida por estudiantes del IIIER que tiene un concentrador reflejante con geometría cilíndrica parabólica y un colector de tubo de vacío usado en calentadores solares de agua (Toledo et al, 2022).

Las estufas antes mencionadas requieren que el usuario este expuesto a la radiación solar mientras opera el sistema solar térmico. A continuación, se describe las estufas solares indirectas.

- *Cocinas solares indirectas.*

Estos sistemas aprovechan la energía solar para calentar un fluido de transferencia de calor, como aceites térmicos y sales fundidas, mediante el uso de colectores solares que tienen un punto focal. Luego, este calor se transporta para almacenarlo en un depósito aislado para su posterior uso (Misra et al, 2023). Con esto, se logra calentar recipientes de una forma indirecta, al hacer circular este fluido hacia una cocina convencional ubicada en el interior de un hogar, en donde se trasfiere el calor a una parrilla para calentar los alimentos. Por tanto, para las cocinas solares indirectas, las secciones de recolección de calor y cocción están separadas. La unidad de captación de calor se coloca en el exterior o en el techo, mientras que la unidad de cocción se encuentra en el interior o en la cocina. Los colectores solares modulares que tienen la finalidad de captar la energía, para luego llevarla al área de cocina mediante tuberías. Estas estufas solares son usadas principalmente para el calentamiento de agua en residencias particulares, así también para la cocción de alimentos (Monsalvo 2009).

La Ilustración 17 muestra una estufa solar indirecta, la cual consta de un colector plano que transforma la radiación solar en calor, y a su vez éste se trasfiere al agua que pasa a través de las tuberías. El agua caliente circula hasta llegar a un tanque de almacenamiento. El vapor generado es dirigido hacia un contenedor que sirve como comal para la cocción del alimento. La idea principal de este prototipo es poder cocinar de manera segura e higiénica, con cierta comodidad al momento de preparar tus alimentos.



Ilustración 17. Estufa solar indirecta con colector plano

Ilustración obtenida de <https://es.scribd.com/document/359572509/Cocinas-Solares-Indirectas>

Otro diseño se presenta en la Ilustración 18, que tiene reflectores planos, tubos de calor sin mecha, y un almacenamiento térmico hecho con materiales de cambio de fase (Hussein et al, 2008). Esta estufa solar indirecta es útil para cocinar alimentos al mediodía, la tarde y por la noche, y para mantener la comida caliente por la noche y temprano en la mañana.

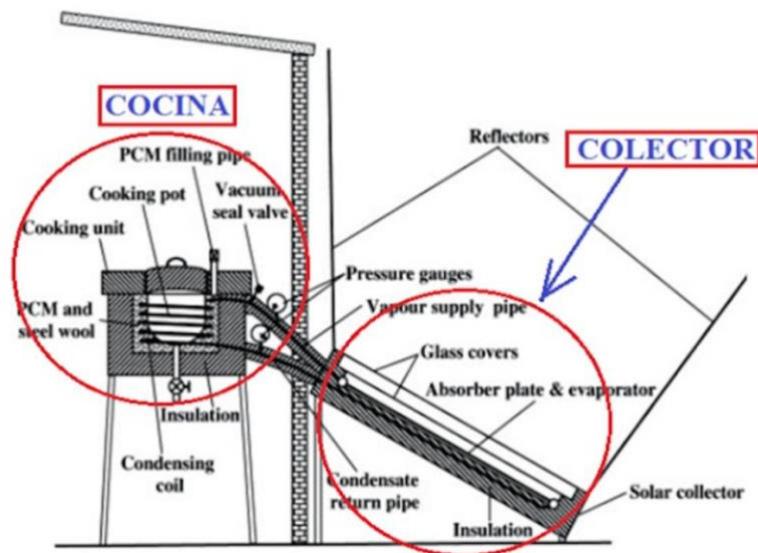


Ilustración 18. Diagrama de funcionamiento de estufa solar indirecta (Hussein et al, 2008)

Un buen diseño de una estufa solar indirecta permite evitar las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. Además, evitan el contacto directo del usuario con la energía solar y funcionan similarmente como las estufas convencionales de gas L.P.

- *Estufa solar tipo Scheffler*

Las estufas solares tipo Scheffler son dispositivos diseñados para aprovechar la energía solar para cocinar y otros usos térmicos. Su funcionamiento básico consiste en dirigir y enfocar los rayos del sol mediante superficies reflectantes para aumentar el calor en cierto punto. Estas estufas solares están constituidas por un reflector, que es un espejo parabólico que gira sincronizado con el sol alrededor de un eje paralelo al eje terrestre, manteniendo el punto focal, en donde se coloca una olla u otro recipiente para calentar (Agrawal & Yada, 2021). Estas estufas son eficientes y sostenibles, ya que no requieren combustibles fósiles y pueden utilizarse en áreas donde la electricidad es escasa. Su diseño permite cocinar alimentos de manera rápida y limpia, además de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las estufas solares tipo Scheffler tienen varias características distintivas:

1. **Espejo parabólico:** Utilizan un espejo parabólico grande y curvado para concentrar la luz solar en un punto focal. Algunas configuraciones están compuestas por paneles hechos de materiales como aluminio sobre cartón arrugado, estaño, hojas de metal pulidas o espejos.
2. **Alta eficiencia:** La forma parabólica del espejo permite concentrar los rayos solares en un área pequeña, lo que aumenta la eficiencia de la estufa.
3. **Versatilidad:** Pueden ser utilizados para cocinar alimentos, calentar agua, secar alimentos o realizar otras tareas que requieran calor.

4. Sostenibilidad: Funcionan completamente con energía solar, lo que las hace una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Otra ventaja de esta configuración es que permite la cocción de alimentos de manera indirecta, ya que todo el calor generado puede ser dirigido adentro de un hogar. La Ilustración 19 muestra el diagrama y una fotografía de la implementación de este tipo de estufa en una comunidad de Egipto (Solar cookers international, s.f.).

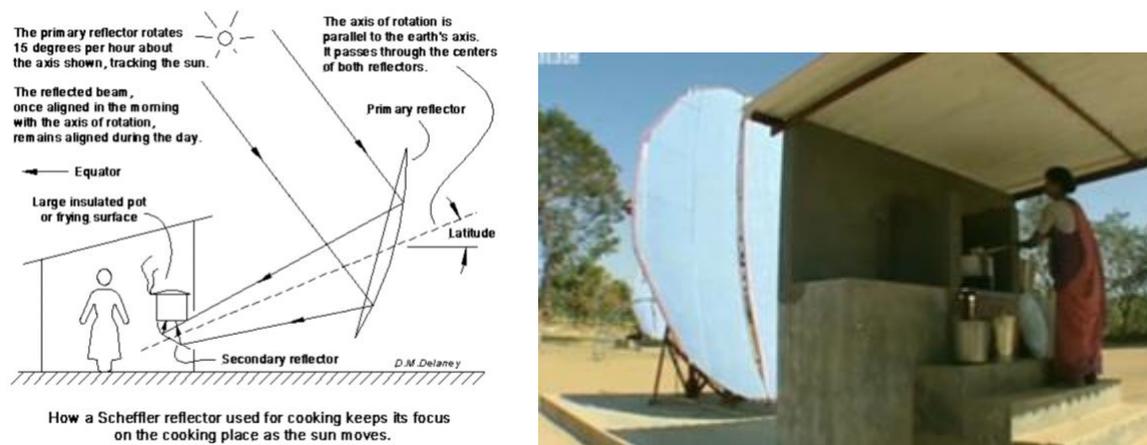


Ilustración 109. Diagrama (izquierda) y fotografía (derecha) de una estufa solar tipo Scheffler

Ilustración obtenida de: https://solarcooking.fandom.com/wiki/Scheffler_Community_Kitchen#cite_note-steamcooking-5

2.6 COLECTORES SOLARES.

Los colectores solares son dispositivos diseñados para captar la radiación solar que incide sobre su superficie y convertirla en energía térmica utilizable. El calor resultante de la convección térmica de la radiación solar se almacena en un depósito de acumulación, en donde las conexiones y la transferencia de calor entre el captador solar y el depósito se efectúan a través de un circuito hidráulico (Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia, 2019).

Los colectores solares se clasifican en función de su diseño y de la forma en que capturan y utilizan la radiación solar:

- Baja temperatura (30° C – 100°): Para este rango de temperatura se requiere de colectores que tienen aplicaciones para el calentamiento de aguas sanitarias, de piscinas, calefacción, deshidratación y cocción de alimentos.

- Media temperatura (100°C – 300°C): Estos colectores son concentradores puntuales que alcanzan este rango de temperaturas, como son los discos parabólicos y los campos de heliostatos o centrales de torre.
- Alta temperatura (400°C- 3000°C): Dichos concentradores son requeridos para producción de calor en procesos industriales o calefacción de agua a altas temperaturas.

2.6.1 Colectores solares planos

Este tipo de colectores están compuestos por una placa metálica, generalmente una lámina de cobre, aluminio, fierro, etc. Esta superficie está pintada de color oscuro para mejorar la absorción de la radiación. Algunos diseños agregan una cubierta de vidrio sobre la cara expuesta al sol para mejorar la eficiencia del sistema (Carrión-Chamba et al, 2022). El agua o fluido circula dentro del sistema, mediante el mecanismo Termosifón, el cual se origina por la diferencia de temperatura que se genera en el agua debido al calentamiento proporcionado por el sol. Estos colectores llamados como colectores planos tienen la capacidad de transformar la energía solar en térmica a bajas temperaturas para aplicaciones residenciales, domésticos y comerciales, para calentar agua de uso doméstico o calefacción de espacios. La eficiencia de estos colectores disminuye significativamente en condiciones climáticas no favorables, es decir en días nublados o fríos.

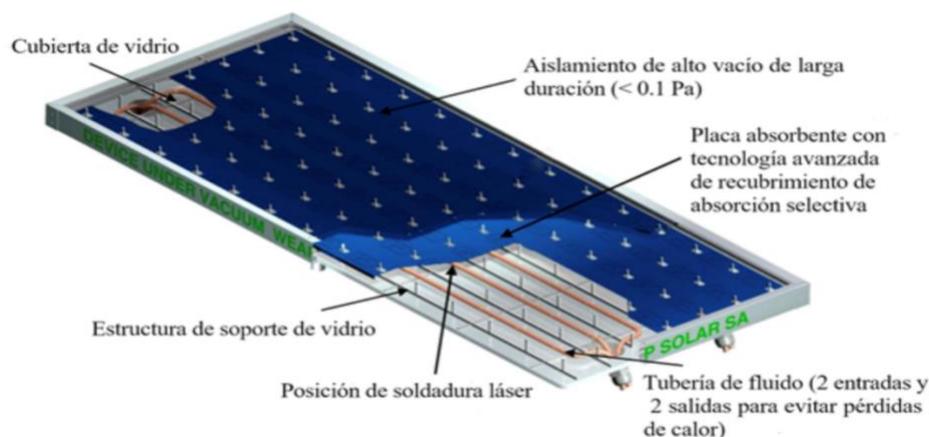


Ilustración 20. Colector solar plano

Ilustración obtenida de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=51390-860X2022000100059

La Ilustración 20 muestra un colector solar plano que está compuesto por una lámina transparente (en la parte exterior), generalmente de vidrio, que permite la transmisión de la energía solar a una segunda lámina, que tiene la finalidad de captar toda la radiación y de transferirla por los ductos en forma de calor.

2.6.2 Colectores solares de tubos de vacío

A diferencia del colector plano, el uso de un tubo de vacío evita las pérdidas de energía por convección y reduce las pérdidas generadas en días con un clima no favorable. Estos tubos absorbedores son componentes clave en los colectores solares térmicos, que se utilizan para capturar y convertir la energía solar en calor, haciéndolo efectivos para aplicaciones de calefacciones de agua y calefacción de espacios en climas frío debido a su alto rendimiento y capacidad para operar en temperaturas bajas (García & Pilatowsky, 2017).

Los colectores solares de tubo al vacío pueden variar dependiendo de la cantidad de capas de vidrio en el tubo, así como el método de calentamiento del fluido, directamente o mediante un heat pipe o tubo de calor.

A continuación, se describe dos tipos de tubos al vacío:

- *Tubos al vacío de baja presión*

Este tubo de vacío está fabricado a partir de dos tubos de vidrio concéntricos hechos de borosilicato transparente, de tal forma que entre ellos exista una cámara de aislamiento térmico (extracción del aire entre ellos) para evitar las pérdidas de calor por conducción y convección (Rondán & Rebaza, 2016). El diámetro exterior del tubo de vacío es de 58 mm y el interior de 47 mm. En el tubo interior se tiene una cubierta de una película delgada de nitrato de aluminio que tiene una gran capacidad de absorber la energía solar y minimizar las propiedades de reflexión (ver Ilustración 21). El calor generado calienta el fluido o el material que está presente dentro del tubo.

Este colector se caracteriza principalmente por presentar una baja presión interna en comparación con la presión atmosférica normal. Los tubos de baja presión principalmente son utilizados en sistemas domésticos por el alcance de temperaturas de 60°C a 70°C.

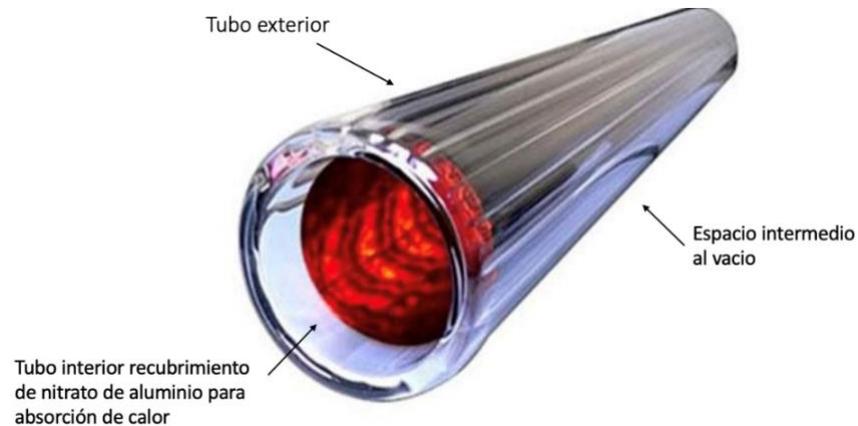


Ilustración 21. Tubo al vacío de vidrio de baja presión

- *Tubos al vacío de alta presión*

El método de calentamiento del fluido para estos tubos es directamente o mediante un *heat pipe* o tubo de calor con el objetivo de ser más resistentes a problemas de sobrecalentamiento. Consiste en un tubo al vacío de baja presión que internamente tiene un tubo de calor hueco cerrado por ambos extremos con una pequeña cantidad de flujo vaporizante en su interior. A su vez, este tubo de calor está cubierto por una lámina de aluminio, como se observa en la Ilustración 22. La combinación de los tubos al vacío y el sistema de tubo de calor mejora la eficiencia y el rendimiento de los colectores solares (Rondán & Rebaza, 2016).



Ilustración 22. Tubo al vacío de vidrio de alta presión (*heat pipe*)

2.7 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Algunos diseños de estufa solar requieren de un intercambiador de calor para transferir la radiación proveniente de la energía solar y entregarlo en forma de calor a los alimentos. Esto ayuda a elevar la temperatura y provocar los cambios químicos propios del proceso de cocción. Un intercambiador de calor es un dispositivo capaz de transferir o intercambiar calor de manera continua entre dos medios al estar en contacto. Los medios pueden ser dos fluidos o un fluido y un sólido que tienen diferentes temperaturas. Dependiendo del tipo de contacto entre los medios, los intercambiadores de calor se clasifican en intercambiadores directos e indirectos. El calor solo se puede transferir en una sola dirección, del medio con alta temperatura, al medio con menor temperatura (Jaramillo, 2007). Estos sistemas son utilizados principalmente en procesos industriales y comerciales, así como en sistemas de calefacción, refrigeración y su uso en hogares.

2.7.1 Intercambiador de calor directo

Un intercambiador directo transfiere el calor cuando ambos medios se encuentran en contacto uno del otro, es decir se mezclan entre sí. Esto puede generar la contaminación debido a la propia mezcla de un fluido en malas condiciones, con el otro.

En la ilustración 23 se observa un intercambiador de calor de contacto directo (fluido-fluido), en el cual las corrientes de los fluidos se encuentran en una con otra. La temperatura de la corriente más caliente cede su calor a la corriente más fría (Jaramillo, 2007). Un ejemplo son las torres de enfriamiento de agua con flujo de aire que puede ser forzado o natural.

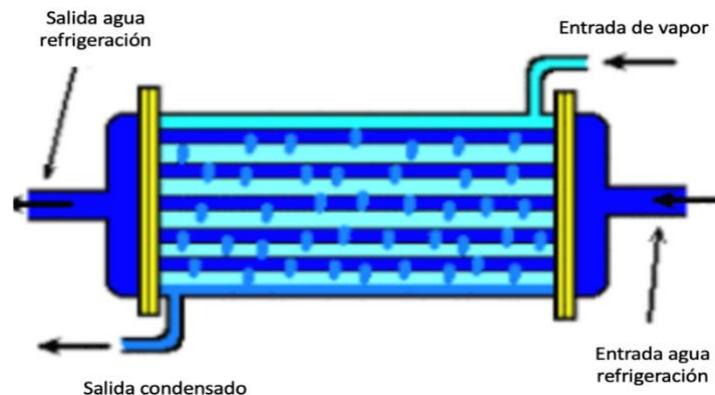


Ilustración 23. Intercambiador de calor de contacto directo fluido-fluido

Ilustración obtenida de <http://dispositivosfeee.blogspot.com/2013/06/intercambiador-de-calor-contacto.html>

2.7.2 Intercambiador de calor indirecto

A diferencia de los intercambiadores de calor directo, los dos fluidos o medios nunca se mezclan físicamente, ya que están separados por una pared donde sucede la transferencia de calor. Este principio de funcionamiento es fundamental en muchas aplicaciones donde se requiere evitar la contaminación o la mezcla de los fluidos. Según su construcción, los intercambiadores indirectos se pueden dividir en intercambiadores de placas, de carcaza y tubos, que se describen a continuación:

- *Intercambiador de calor de placas*

Son dispositivos que transfieren calor entre dos fluidos que fluyen en canales separados, pero en contacto cercano a través de placas metálicas o de otro material conductor, como se observa en la Ilustración 24. Estas placas tienen canales para el flujo de los dos fluidos involucrados, generalmente llamados fluidos caliente y fluido frío. El material de las placas varía dependiendo de la aplicación de estas; por ejemplo, el titanio se utiliza en fluidos altamente corrosivos, las aleaciones de aluminio se usan cuando el peso es un factor importante, pero principalmente el acero inoxidable es el más común debido a su resistencia, a la corrosión y durabilidad (Córdoba-Almario, 2019) Este tipo de intercambiadores son capaces de transferir mucho más calor en comparación del intercambiador de carcaza y tubos, esto es debido a que las placas proporcionan una mayor área que la de los tubos.

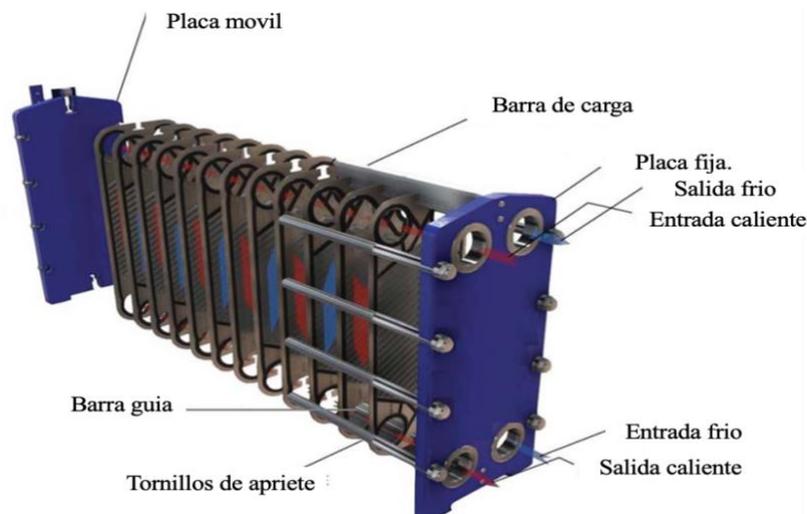


Ilustración 24. Intercambiador de calor de placas

Ilustración obtenida de <https://blog.froztec.com/como-opera-un-intercambiador-de-calor-alfa-laval-alfano>

- *Intercambiadores de calor de tubos y carcasa*

Estos intercambiadores de calor constan de un conjunto de tubos de cobre ubicados dentro de una carcasa de acero inoxidable, como se observa en la Ilustración 25. Uno de los fluidos fluye a través de los tubos, mientras que el otro fluido circula a su alrededor de los tubos en la carcasa. Por tanto, el calor se transfiere a través de las paredes de los tubos hacia el fluido circundante. Estos sistemas son utilizados para enfriar y calentar diversos fluidos en procesos de refinación de petróleo y petroquímicos, incluyendo la condensación de vapores, el enfriamiento de aceites y la transferencia de calor en reactores químicos, igual que en centrales eléctricas estos se utilizan para enfriar fluidos en las turbinas de vapor (Herrera Echevarría, 2015).

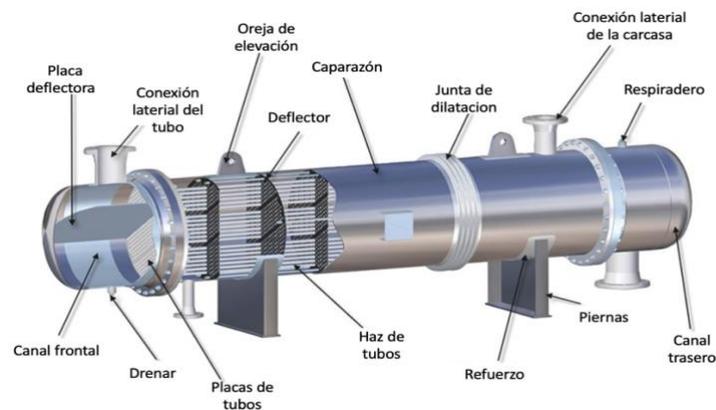


Ilustración 25. Intercambiador de calor de tubos y carcasa

Ilustración obtenida de <https://thermofin.net/es/productos/caleos-intercambiadores-de-carcasa-y-tubos/>

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo y evaluación térmica de la estufa solar indirecta con circulación forzada. En el diagrama de la Ilustración 26 se representa las etapas realizadas, que consistieron en el diseño estructural, la construcción y la evaluación del desempeño térmico del sistema final. En la primera etapa se describe el diagrama de las partes que constituye el diseño estructural: el colector solar que recibe la radiación solar y lo transforma en calor, el serpentín que está acoplado a un tubo metálico por el que circula un fluido calentado, y el sistema de bombeo para hacer circular el fluido a temperatura ambiente. Además, se describe las características de los materiales utilizados. En la segunda etapa se explica los pasos realizados para la construcción de cada parte del sistema solar térmico. La última etapa consistió en la evaluación térmica del sistema, en donde se monitoreó las temperaturas alcanzadas por el sistema en diferentes condiciones climáticas.



Ilustración 26. Diagrama general de la metodología desarrollada

3.1 DISEÑO ESTRUCTURAL DE SISTEMA

El objetivo de este diseño es proponer un prototipo solar térmico capaz de aumentar la temperatura de un serpentín metálico, que puede ser usado como comal para calentar alimentos, sin la necesidad que el usuario este expuesto a la radiación solar mientras lo esté operando. Por tanto, se diseñó un sistema de concentración solar que refleje los rayos del Sol sobre la superficie de un tubo colector, para aumentar la temperatura en su interior. Dentro de este tubo, se coloca un tubo metálico en

forma de U, que está conectado en un extremo a una bomba eléctrica que hace circular el agua, y en el otro extremo se acopla un serpentín que está dentro de una casa. Cuando se activa la bomba, empieza a circular el agua que se calienta al pasar por el tubo que está dentro un colector solar y llega hasta el serpentín. Con esto se logra elevar la temperatura de la superficie del serpentín por la transferencia de calor del agua caliente.

En la Ilustración 27 se muestra los parámetros utilizados para realizar el diseño del sistema solar térmico. Se consideraron las características del recurso solar de la región geográfica en donde se implementará la estufa solar, así como el flujo del agua que circulará por el sistema. Las variables por monitorear fueron las temperaturas deseadas en el fluido y en el serpentín, en función de las condiciones climáticas de la región. Por otro lado, se registró la cantidad de agua por unidad de tiempo necesaria para mantener una temperatura determinada en el serpentín. Las partes fundamentales del sistema solar térmico son el colector solar, el serpentín y el sistema de bombeo, los cuales se describen a continuación.

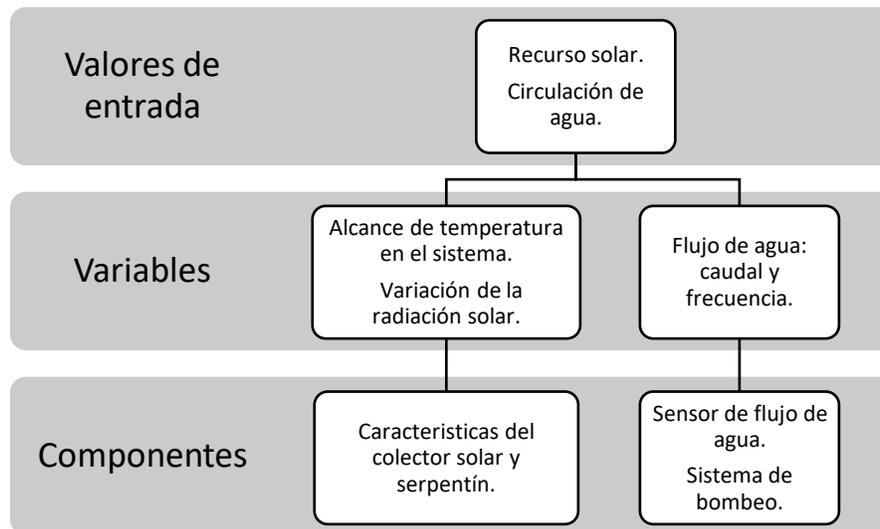


Ilustración 27. Diagrama del diseño de la estufa solar indirecta

El colector solar, es decir la zona de captación de la radiación solar que se muestra en la Ilustración 28(a). El cual está constituida por un tubo de vidrio al vacío de baja presión, que convierte la radiación solar en calor, y que en su interior se encuentra un tubo metálico tipo U por el cual circulará el fluido a calentar. Un extremo de este tubo está conectado a una bomba de agua

y el otro se acopla al serpentín. Para aumentar la temperatura dentro del tubo de vidrio se puede añadir un concentrador reflejante en forma de semicilindro, el cual aumenta la cantidad de rayos del Sol que incide sobre la superficie del tubo al vacío. La geometría del serpentín metálico se muestra en la Ilustración 28(b). Las dimensiones para su diseño dependieron del área de cocción deseada. Para la circulación del líquido se propuso una pequeña bomba que normalmente usan los dispensadores de agua, ya que no se requiere de una gran velocidad de flujo del líquido. Su principal función es mantener el flujo constante del fluido a través del sistema, asegurando una distribución eficiente del calor o del agua caliente. Un sensor de flujo de agua fue útil para monitorear las características del caudal.

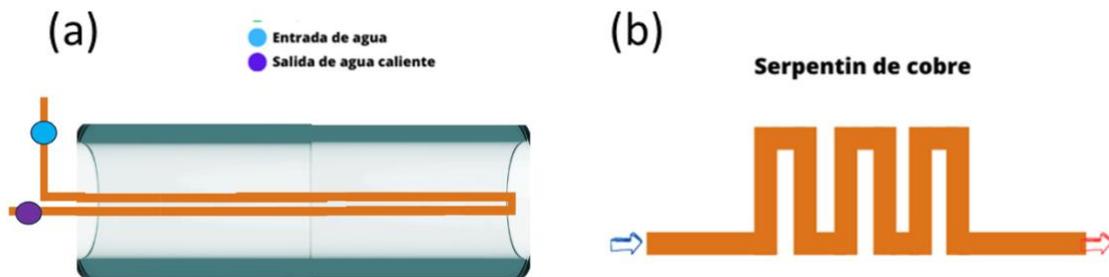


Ilustración 28. Diseño del colector solar (a) y serpentín metálico (b)

El proceso para el funcionamiento de la estufa solar mostrado en la Ilustración 29 consiste en hacer pasar agua a temperatura ambiente en la entrada del tubo de cobre colocado dentro del tubo al vacío con la ayuda de la bomba de agua. El sensor de caudal da información de la velocidad del flujo de agua. El fluido es calentado al pasar por el colector solar y circulará hacia el serpentín metálico. Por transferencia de calor del fluido caliente hacia la superficie del tubo del serpentín, se logra obtener un aumento de la temperatura en el exterior del tubo de cobre que será aprovechado para calentar alimentos. Este sistema permite colocar el serpentín dentro del hogar, para que el usuario no tenga que estar expuesto a la radiación solar.

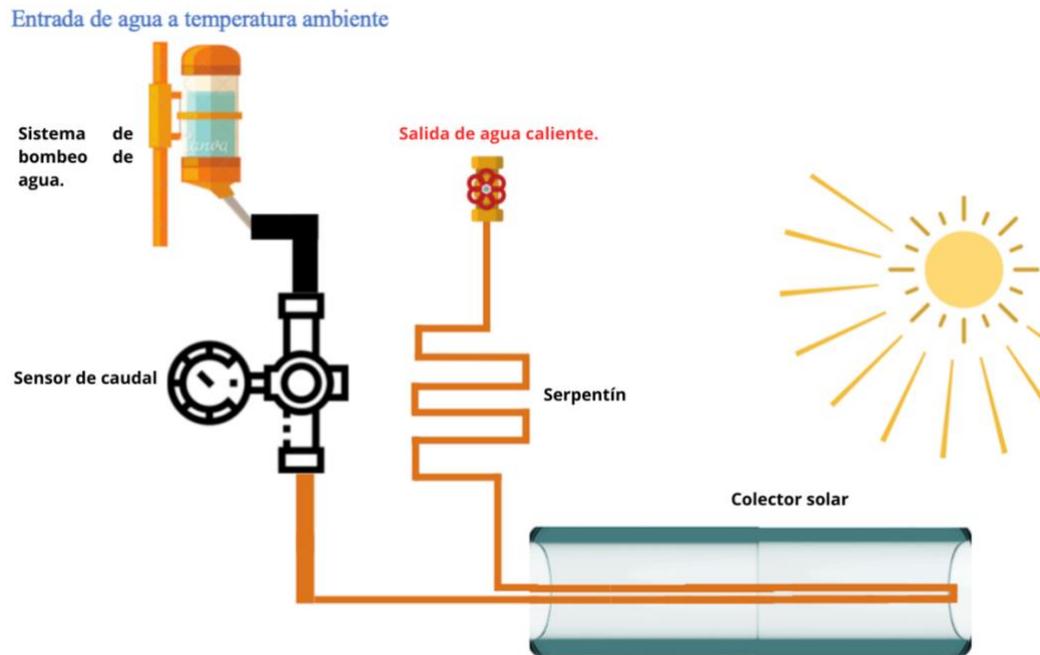


Ilustración 29. Esquema del sistema de cocción solar propuesto

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Los materiales utilizados para la construcción de la estufa solar de circulación forzada se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de materiales para la construcción de la estufa solar indirecta.

<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>
Tubo al vacío de baja presión	1 unidad
Tubería de cobre de ¼ de pulgada.	6 metros
Concentrador solar con geometría de semicilindro	1 unidad
Bomba de dispensador de agua	1 unidad
Sensor de caudal	1 unidad
Llave de paso	1 unidad

El colector solar es un sistema de tubo de cobre tipo U dentro de un tubo al vacío con diámetro interior de 47 mm. Las características técnicas del tubo al vacío mencionan que tiene una alta absorción de hasta el 95 % y que puede llegar a temperatura máxima de 300 °C, dependiendo de las condiciones climáticas. Un tubo de cobre de longitud de 4 metros y de diámetro de ¼ de pulgada fue doblado a la mitad en forma de U, de tal forma que pueda caber dentro del tubo de vidrio, como se muestra en la Ilustración 30(a). Posteriormente, se introdujo dentro del tubo al vacío (Ilustración 30(b)). En un extremo del tubo metálico ingresará el agua a temperatura ambiente almacenado en un contenedor y el otro extremo será conectado a la entrada del serpentín.

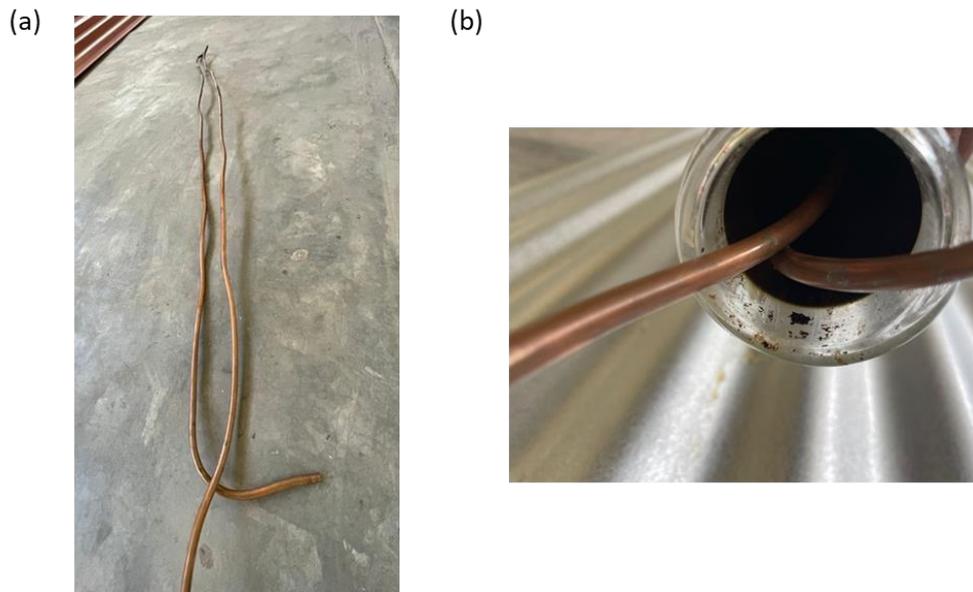


Ilustración 30. Construcción del colector solar: (a) cobre dobla en forma de U y (b) cobre dentro del tubo al vacío

Para la construcción del serpentín se utilizó 2 metros de cobre de ¼ de pulgada. Se moldeó en forma horizontal de dimensiones de 30 cm por 17 cm con separación entre cuerdas de 5 cm, como se observa en la Ilustración 31(a). En un extremo del serpentín se ajustó una llave de paso para controlar el flujo de agua en la salida del sistema. El otro extremo, con la ayuda de un cople de cobre de ¼ x ¼, se empalmó con un extremo del tubo de cobre del colector solar (ver Ilustración 31(b)).

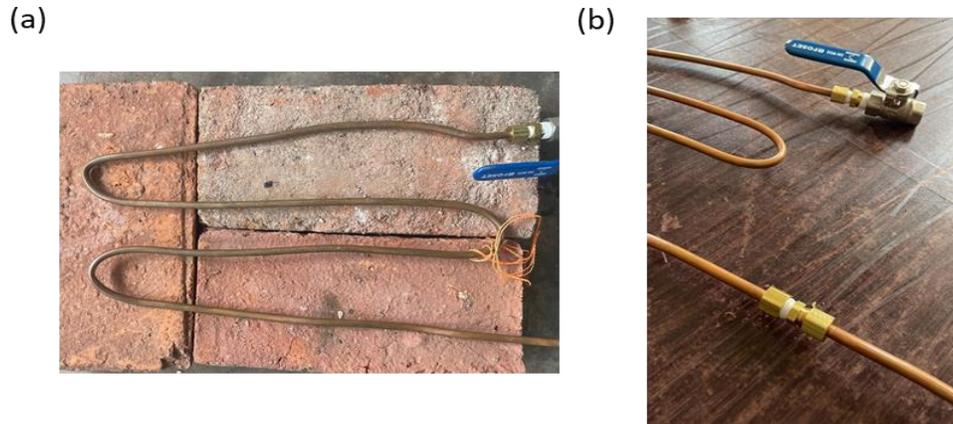


Ilustración 31. (a) Geometría del serpentín y (b) acople de serpentín con colector solar

El sistema de bombeo consistió en un dispensador de agua comercial como el que se muestra en la Ilustración 32(a). El agua almacenada en un contenedor es extraída por la bomba del dispensador y la salida de éste fue conectado a la entrada del sensor de flujo de agua mostrado en la Ilustración 32(b). Este sensor de flujo de agua, modelo YF-S201, es un caudalímetro electrónico que mide la cantidad de líquido o fluido (volumen) que circula a través de una tubería por unidad de tiempo (L/h). Por medio de un rotor interno que se activa por efecto hall, este sensor envía pulsos por cada rotación ocasionado por el flujo de agua (Hetpro, s. f.).

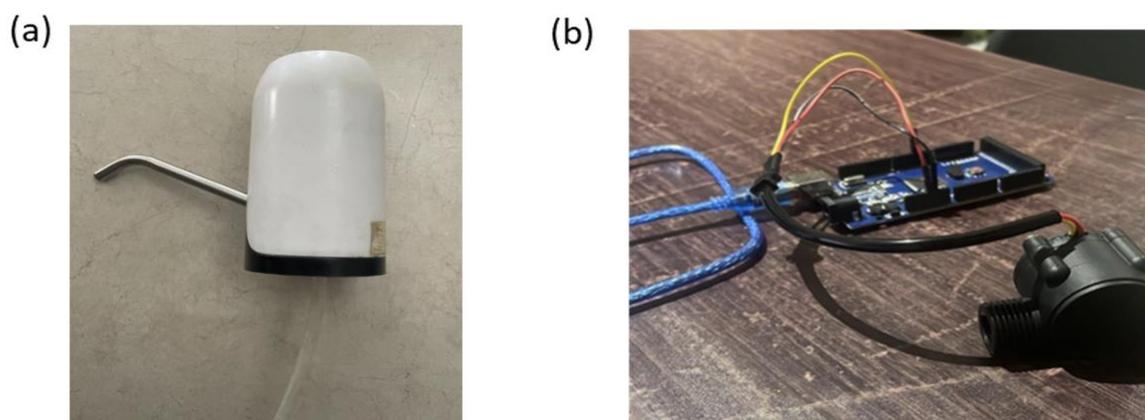


Ilustración 32. Bomba de agua (a) y Sensor de flujo Modelo YF-S201 (b)

La salida del sensor se conectó a una entrada de la placa de Arduino Mega 2560 para poder monitorear en tiempo real en una computadora los parámetros de velocidad del flujo y la frecuencia del caudal que se genera con la bomba de agua. Fue necesario adaptar dos reductores de ½ de pulgada a ¼ de pulgada para ajustar el sistema de tubería de cobre a la entrada y salida del sensor de ½ pulgada, esto con el fin de tener un solo diámetro para la circulación de agua.

Una olla de aluminio con capacidad de 9 litros sirvió como un contenedor de agua, en donde se almacenó el líquido caliente o frío. Como se muestra en la Ilustración 33(a), se realizó una perforación de 58 mm y se colocó un anillo de sellado de silicona para sujetar el tubo al vacío y evitar fugas de agua. El contenedor se pintó de un color oscuro para captar una mayor radiación solar y también para disminuir las pérdidas de temperatura del agua. Adicionalmente, se realizó una segunda perforación del lado opuesto a la primera (Ilustración 33(b)), con la intención de tener una salida de agua por si se requiere usar el agua caliente del contenedor. En este orificio se soldó un adaptador de cobre de ½ pulgada.

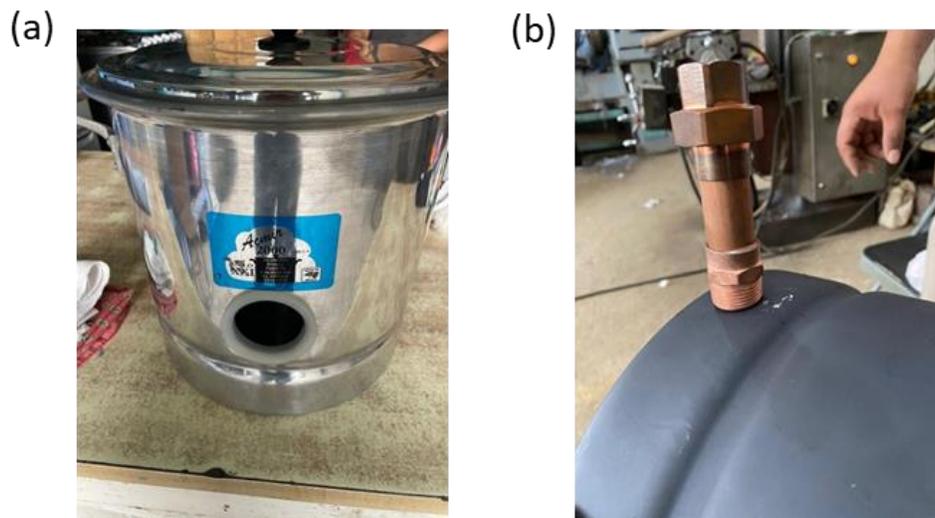


Ilustración 33. Contenedor de agua (a) y acople de adaptador de cobre (b)

Teniendo fabricados el colector solar, el serpentín y el sistema de bombeo se procedió a ensamblar y a realizar pruebas del sistema completo para verificar que no existiera alguna fuga de agua durante la circulación del fluido.

3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA

En el diagrama de la Ilustración 34 se describe la metodología que se utilizó para evaluar las características térmicas del sistema. El principal parámetro fue la medición de la temperatura alcanzada en el agua y en el serpentín bajo diferentes condiciones.

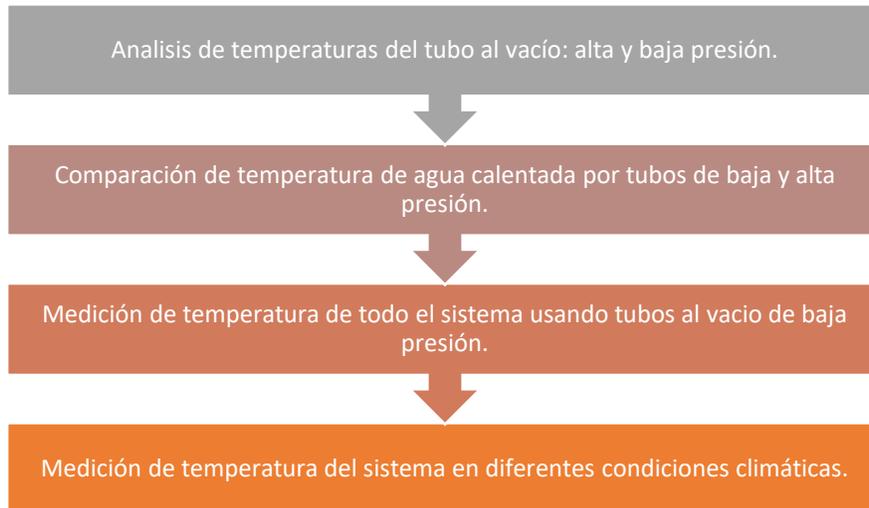


Ilustración 34. Metodología de la evaluación térmica de la estufa solar indirecta

Para el monitoreo de la temperatura del agua se utilizó un termómetro digital de contacto/inmersión, modelo TE-1300, que se muestra en la Ilustración 35. Este instrumento de medición industrial tiene su rango de medición es de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ usando un sensor termopar tipo K, con resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una razón de muestreo de 2.5 muestras por segundo.



Ilustración 35. Termómetro digital de inmersión

En el caso del monitoreo de la temperatura dentro del tubo de vacío o en el serpentín, se utilizó un dispositivo de medición de temperatura del proveedor Measurement Computing, Modelo USB-TEMP-AI, mostrado en la Ilustración 36(a). Este sistema de detección consiste en una tarjeta de adquisición de datos que cuenta con ocho entradas analógicas de 24 bits para mediciones precisas de termopares con una frecuencia de muestreo de 2 muestras por segundo. Tiene cuatro canales que puede medir temperatura de sensores de termopar, RTD, termistor y semiconductores (MCC USB-TEMP and TC Series: Temperature and Voltage Measurement USB DAQ devices, s. f.). Adicionalmente, tiene 4 canales para medir voltaje con rango de entrada de ± 10 , ± 5 , ± 2.5 , and ± 1.25 V, y también tiene 8 Entradas/Salidas digitales.

Para la medición de la temperatura se usaron 4 termopares tipo K, los cuales se colocaron en diferentes partes del sistema termo solar. El dispositivo de medición se conectó a una computadora por medio de una USB y en el software DAQAmi (ver Ilustración 36(b)), propio del dispositivo, se visualizó la temperatura medida en tiempo real y al final de cada prueba se registraron los datos experimentales en un archivo para su posterior análisis.

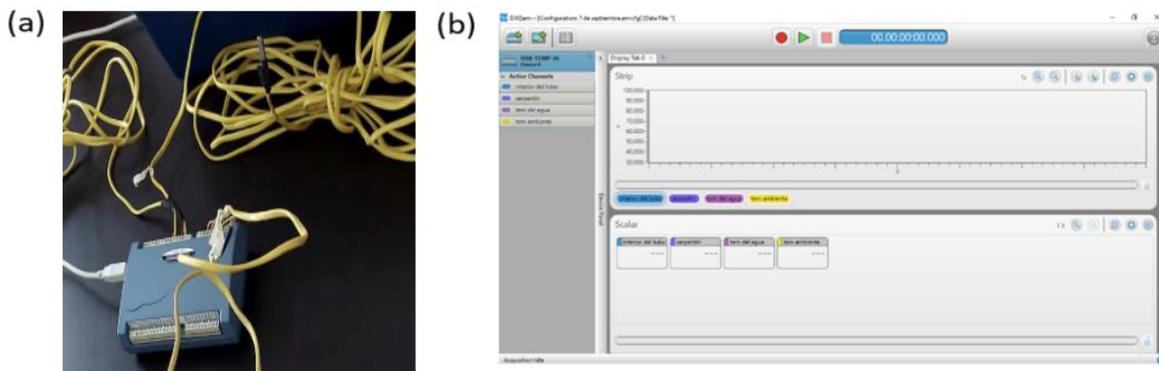


Ilustración 36. Dispositivo de medición de temperatura con termopares (a) y el software DAQAmi (b)

Para medir la temperatura del serpentín se utilizó una cámara termográfica (Flir, modelo E-60), que por medio de la detección de radiación infrarroja que emite el objeto bajo estudio genera una imagen con una resolución de 320 x240 pixeles por cada fotografía (Melgosa, 2011). Este dispositivo permite medir la temperatura en tres puntos dentro de la imagen (ver Ilustración 37).



Ilustración 37. Camara Infraroja Flir E60

Ilustración obtenida de: <https://equiposmedida.com/camara-termografica/flir-e60>

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se presentan los resultados de la metodología utilizada para el diseño y construcción de una estufa solar indirecta con circulación forzada. Se describe el análisis de la temperatura lograda en el colector solar usando un tubo al vacío de baja y alta presión, además se discute la inclusión de un concentrador solar para aumentar la incidencia de los rayos del Sol sobre el tubo colector. A su vez, se presenta un análisis sobre el cambio en las temperaturas obtenidas en el serpentín, dependiendo de las variaciones de frecuencia y caudal del sistema de bombeo. Las pruebas se realizaron en el mes de junio de 2023 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en un rango de 5 horas de sol pico con la intención de obtener una máxima temperatura en el sistema. Los resultados de estas primeras pruebas experimentales demostraron que la temperatura logra aumentar utilizando agua como fluido circulante en el serpentín; por tanto, esto da pauta para proponer mejoras en el sistema solar térmico.

4.1 EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DENTRO DEL TUBO AL VACÍO DE ALTA Y BAJA PRESIÓN.

Como se mencionó en la sección 2.6.2, los tubos al vacío ofrecen muchas ventajas al ser un colector solar que presenta pérdidas menores de calor y pueden ser funcionales inclusive en condiciones de clima fríos o nublados. La primera prueba consistió en evaluar la temperatura máxima alcanzada dentro de un tubo al vacío de baja o alta presión, con el objetivo de elegir la opción más viable para el colector solar. Los cambios y las variaciones de temperatura en la capital chiapaneca en el mes de junio maximizan el alcance que pueden tener los colectores solares debido al porcentaje de radiación directa y difusa presente durante esa época del año.

La Ilustración 38 muestra la ubicación de 4 termopares tipo K para medir la temperatura alcanzada dentro del tubo al vacío de baja presión (punto rojo) y de alta presión (punto gris), la temperatura del tubo de cobre que calentará el agua (punto naranja) y como referencia la temperatura del ambiente (punto verde). Para mantener la temperatura dentro de ambos tubos al vacío se cubrió la salida con papel aluminio.



Ilustración 38. Posicionamiento de termopares en el sistema

La temperatura monitoreada durante aproximadamente 4 horas en el horario de 10 hr a 14 hr se muestra en la Ilustración 39. Durante la prueba, la temperatura del ambiente osciló entre 38 °C a 43°C, de manera casi constante. El tubo al vacío de baja presión presentó un aumento de temperatura de 65 °C a 110 °C en un tiempo de 40 minutos en cielo despejado. Después se mantuvo constante en el rango de 130 °C hasta 140 °C. Se observó una disminución de temperatura cuando el cielo se nubló; sin embargo, la temperatura mínima fue de alrededor de 100 °C. Por otro lado, la temperatura dentro del tubo al vacío de alta presión inicialmente aumentó hasta 110 °C. Tiempo después la temperatura osciló en el rango de 120 °C hasta que disminuyó a 80 °C debido a que se presentó nubosidad en la parte final de la prueba. En esta medición hubo una pérdida de calor debido a que se modificaron las condiciones del tubo al vacío para poder introducir el termopar dentro del tubo. Por último, se monitoreó la temperatura del tubo de cobre que sobresale del tubo al vacío de alta presión, el cual alcanzó una temperatura de 50 °C hasta 75 °C, debido a que existieron pérdidas de calor al estar expuesto al ambiente. Cubrir este extremo de tubo de cobre con algún material térmico sería una alternativa para mejorar este resultado. Fue importante monitorear la temperatura de este tubo de cobre ya que es el que se encargará de calentar el agua del contenedor.

Estos resultados muestran que el tubo de baja presión alcanzó una temperatura mayor de 20 °C comparado a la de alta presión. Esto se debió a que se tuvo que abrir la cubierta de plástico para introducir el termopar al interior del tubo de alta presión.

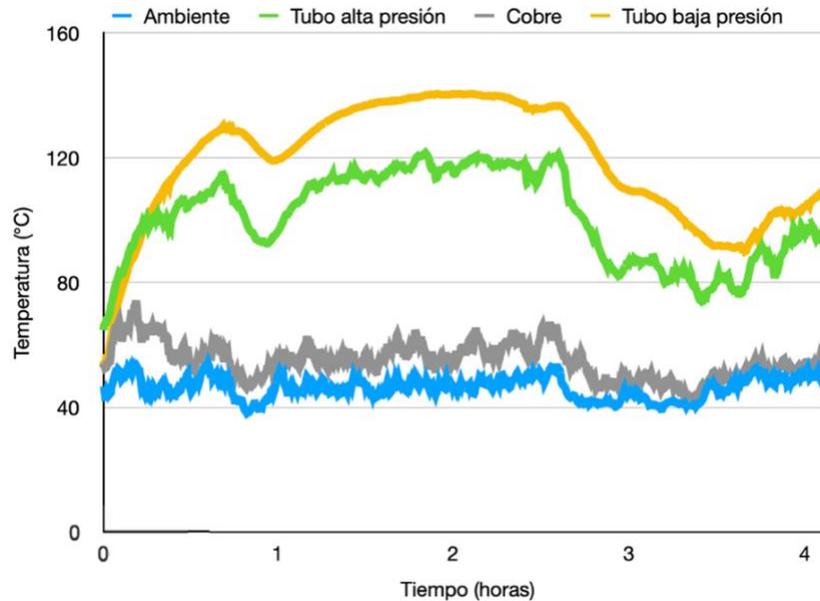


Ilustración 39. Gráfica de la medición de temperaturas de los tubos al vacío de alta y baja presión

Como siguiente paso, se repitió la prueba anterior usando el tubo de alta presión. Con la diferencia de que se mantuvo tapado el extremo del tubo para evitar pérdidas de calor y únicamente se monitoreó la temperatura del tubo de cobre.

Con los datos de la Ilustración 39 se puede comparar el aumento de temperatura de hasta 120 °C cuando la temperatura ambiente en promedio es de 35 °C. Los resultados de la Ilustración 39 y 40 evidencian que ambos tubos al vacío logran alcanzar temperatura superior a los 100 °C. Además, se comprobó que, al abrir el sistema de tuberías de calor se produjeron pérdidas significativas de calor. Por tanto, es importante mantener sellado o cubierto el extremo abierto del tubo al vacío para almacenar e incrementar la temperatura en el interior del tubo.

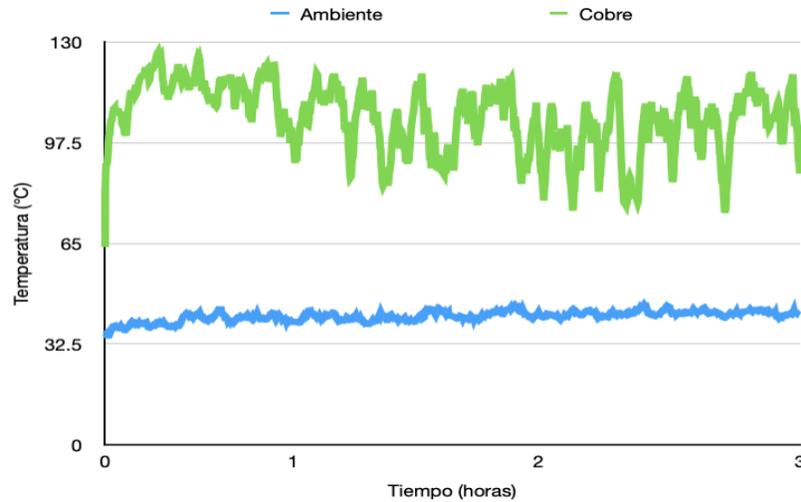


Ilustración 40. Gráfica de la medición de la temperatura del cobre

4.2 CALENTAMIENTO DEL AGUA POR TUBO AL VACÍO DE ALTA Y BAJA PRESIÓN.

Esta prueba consistió en evaluar la temperatura máxima alcanzada del agua al ser calentada por ambos sistemas, uno formado por tubos al vacío de baja y alta presión.

Para el primer caso, se introdujo el tubo al vacío de alta presión en el contenedor de agua a temperatura ambiente, como se observa en la Ilustración 41. Asegurando que el tubo de cobre estuviera en contacto con el agua. La prueba tuvo una duración 3 horas y 20 minutos.



Ilustración 41. Sistema de calentamiento de agua

La grafica de la Ilustración 42 presenta la temperatura medida en el agua y en el medio ambiente. Se observa que la temperatura del agua aumentó gradualmente en función del tiempo desde 30 °C hasta 46 °C en 3 horas. La funcionalidad del tubo de cobre es similar a la de una resistencia eléctrica. A pesar de que el recurso solar que se obtuvo durante el día de esta prueba, donde el clima estuvo parcialmente nublado con algunas rachas de sol y poca nubosidad, se logró obtener un importante avance en el calentamiento del agua usando este sistema.

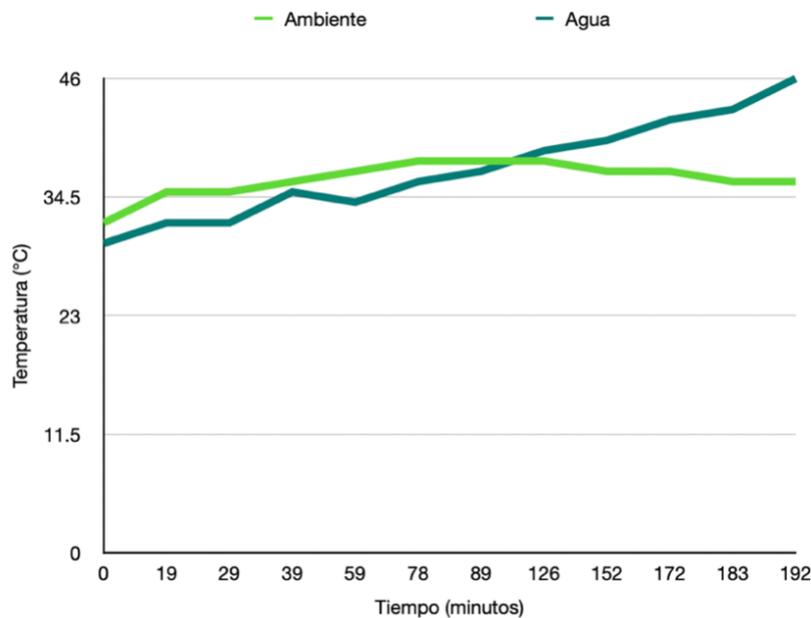


Ilustración 42. Gráfica de la medición de la temperatura del agua

En el segundo caso, se modificó el sistema utilizando un tubo de vacío de baja presión. Para esto, se insertó una tubería de cobre de 1/4 de pulgada en forma de U, simulando un sistema de tubería de calor en tipo U, como se muestra en la Ilustración 43.



Ilustración 43. Sistema de calentamiento de agua usando un tubo al vacío de baja presión

La temperatura inicial del agua fue de 29 °C. Con la ayuda de un dispensador de agua, se hizo circular el fluido a temperatura ambiente a través del tubo de cobre. En las primeras pruebas se percató que la velocidad del flujo era rápida, alrededor de 1.5 litros por segundo y no permitía que el agua se calentara lo suficiente, notando solo un aumento de temperatura de 1 o 2 °C. Sin embargo, después de 20 minutos se observó que la temperatura del agua aumentó hasta 63 °C. Esto se debió a que se requiere de un determinado tiempo para que la temperatura en el interior del tubo al vacío sea alta. En la Tabla 2 se presenta los datos de la temperatura medida del agua en la salida del sistema de calentamiento. Se puede notar que al paso de 2 horas la temperatura aumentó un 300 % en comparación a la temperatura ambiente, pasando de 29 °C hasta llegar a 93 °C.

Tabla 2. Temperatura medida en la salida del sistema de calentamiento con tubo al vacío de baja presión.

Medición de temperatura del agua		
Temperatura ambiente	Temperatura del agua en salida del sistema	Hora
29 °C	29 °C	10:50 am
29 °C	31 °C	10:55 am
30 °C	42 °C	11:05 am

30 °C	63 °C	11:11 am
31 °C	63 °C	11:25 am
31 °C	89 °C	11:35 am
31 °C	92 °C	11:48 am
32 °C	91 °C	12:25 pm
32 °C	93 °C	01:02 pm

En la Ilustración 44 se muestra la gráfica con los datos de la Tabla 2. Se observa un aumento de temperatura al hacer circular agua ($T_{\text{inicial}}=29\text{ °C}$) por el sistema hasta 40 °C a partir del minuto 15, llegando a 63 °C al paso de 30 minutos y hasta 90 °C a partir de 45 minutos. Este resultado indica que este sistema de calentamiento usando un tubo de baja presión es funcional para lograr temperaturas altas en comparación al del medio ambiente en menos de una hora.

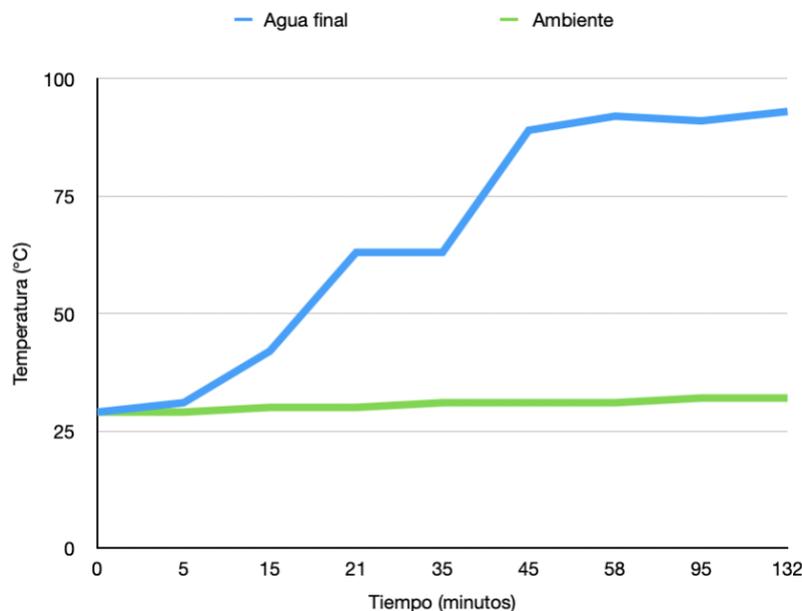


Ilustración 44. Gráfica de la temperatura del agua calentada con tubo al vacío de baja presión

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO USANDO UN DISPENSADOR DE AGUA.

Con la intención de relacionar la temperatura alcanzada por el tubo al vacío en función de la velocidad del flujo de agua se empleó el sensor de flujo YF-S201. La primera prueba consistió en

conocer el caudal teniendo una circulación constante de agua dentro del sistema usando el dispensador de agua.

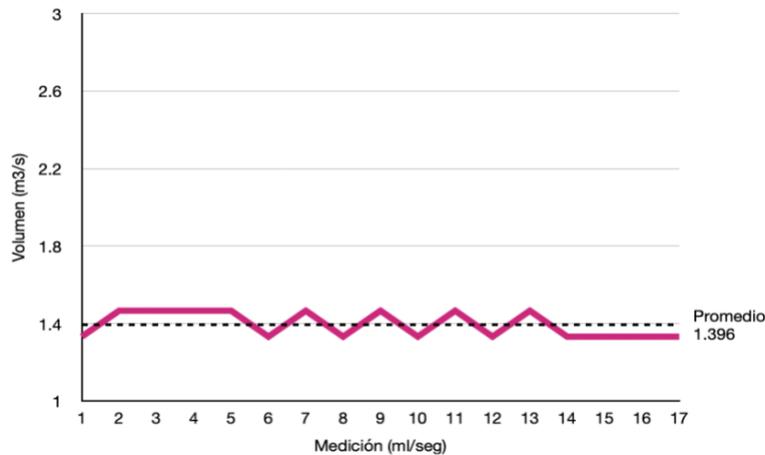


Ilustración 45. Gráfica de la medición del caudal

En la gráfica de la Ilustración 45 se muestra la cantidad de agua que pasa por el sistema de cobre en unidad de tiempo. Se observa que en promedio se tiene un caudal de 1.396 litros por minuto en el sistema. Esta información es útil para controlar y monitorear el consumo de agua. La precisión del sensor puede variar según las condiciones del caudal y otros factores ambientales.

4.4 EVALUACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA USANDO UN SISTEMA DE BOMBEO.

Con la intención de conocer la temperatura máxima alcanzada por el sistema de calentamiento de agua y la del serpentín, se realizaron pruebas bajo diferentes condiciones climáticas. A continuación, se describe los resultados obtenidos en un día nublado y un día soleado (sin nubosidad).

4.4.1 Prueba realizada en un día nublado

Se analizaron las fluctuaciones de temperatura en el sistema solar térmico bajo las condiciones de un día con nubosidad. En la Ilustración 46(a) se presenta la fotografía del sistema completo de la estufa solar con circulación forzada. En ella se puede observar los componentes que conforman a este sistema. El proceso de circulación del agua se describe a continuación. Inicialmente se

colocaron 3 litros de agua a temperatura ambiente en el contenedor, luego se activó la bomba de agua para que el agua circulara hacia el tubo de cobre que se encuentra dentro del tubo al vacío. Al salir del colector, la temperatura del agua aumenta y pasa a través del tubo de cobre que forma al serpentín. Finalmente, el agua es depositada de nuevo en el contenedor de agua. Este proceso se repitió en lapsos de 10 minutos hasta lograr que el agua almacenada logre una temperatura óptima para otras aplicaciones.

En la ilustración 46(b) se observa las temperaturas registradas por el termómetro digital de la temperatura del agua al inicio y al final de la prueba, de 34 °C y 67 °C, respectivamente, en un tiempo aproximado de 15 minutos.

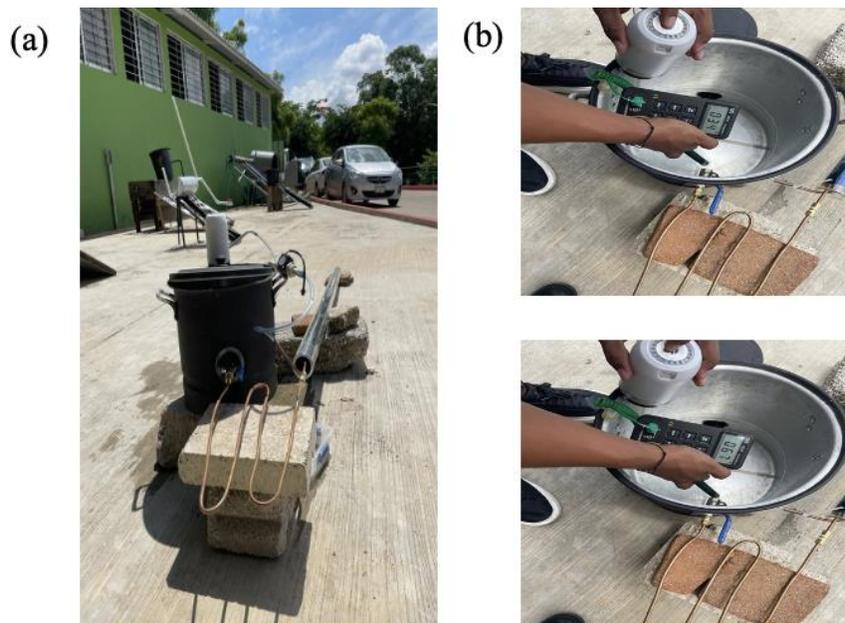


Ilustración 46. Sistema completo de la estufa solar indirecta (a) y monitoreo de la temperatura al inicio (arriba) y final (abajo) de la prueba (b).

En la gráfica de la Ilustración 47(a) se muestra la temperatura monitoreada durante esta prueba. La temperatura promedio en el interior del tubo al vacío fue de 73.6 °C con una temperatura máxima de 87.6 °C, mientras que en el serpentín se obtuvo una temperatura promedio de 37.5 °C con máximo de 43.6 °C. Estas máximas temperaturas se lograron en lapso de 13 minutos durante un día nublado. Además, se observa que la temperatura sufre un pequeño descenso debido a que al inicio de la prueba estaba nublado, pero minutos después el cielo se despejó ligeramente

permitiendo que la temperatura tanto en el serpentín como en el tubo al vacío se elevara. En la Ilustración 47(b) se presenta la irradiancia solar promedio durante el día de la prueba, teniendo un máximo valor de 2.38 KW/m² al medio día. La irradiación desciende considerablemente al pasar las horas. A pesar de que las condiciones climáticas no fueron la óptimas debido a que fue un día nublado, se logró obtener temperaturas deseadas para calentar alimentos en el serpentín. Además, el hecho de que el serpentín estuvo expuesto a la intemperie, se pueden atribuir una pérdida de calor importante. Esto puede resolverse cubriendo el serpentín con algún material térmico.

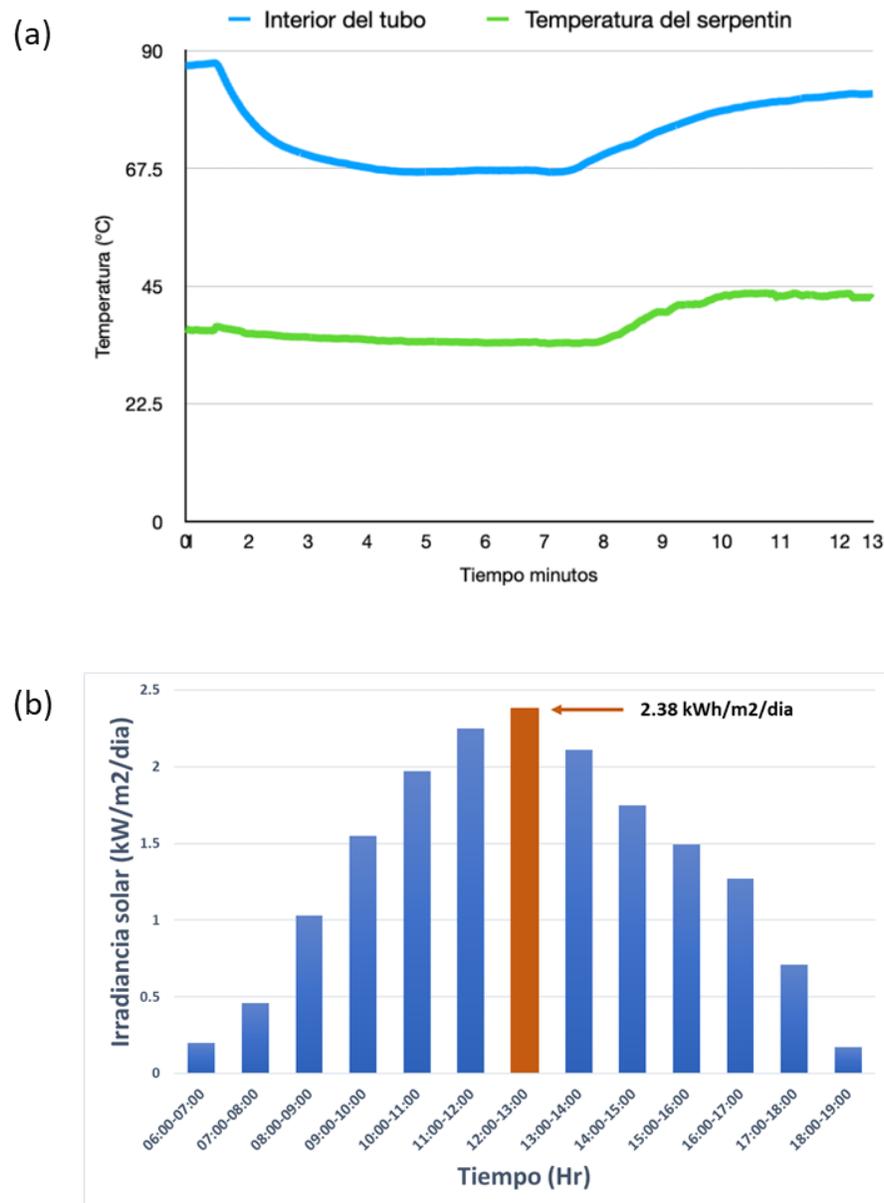


Ilustración 47. Temperatura monitoreada en el serpentín y en el interior del tubo al vacío (a) y la irradiancia solar promedio durante el día nublado (b).

Para aumentar la temperatura del serpentín, se agregó al sistema un concentrador solar con geometría de un semicilindro, como se observa en la Ilustración 48, con la intención de hacer incidir mayor radiación solar sobre el tubo al vacío.



Ilustración 48. Medición de temperatura con nubosidad.

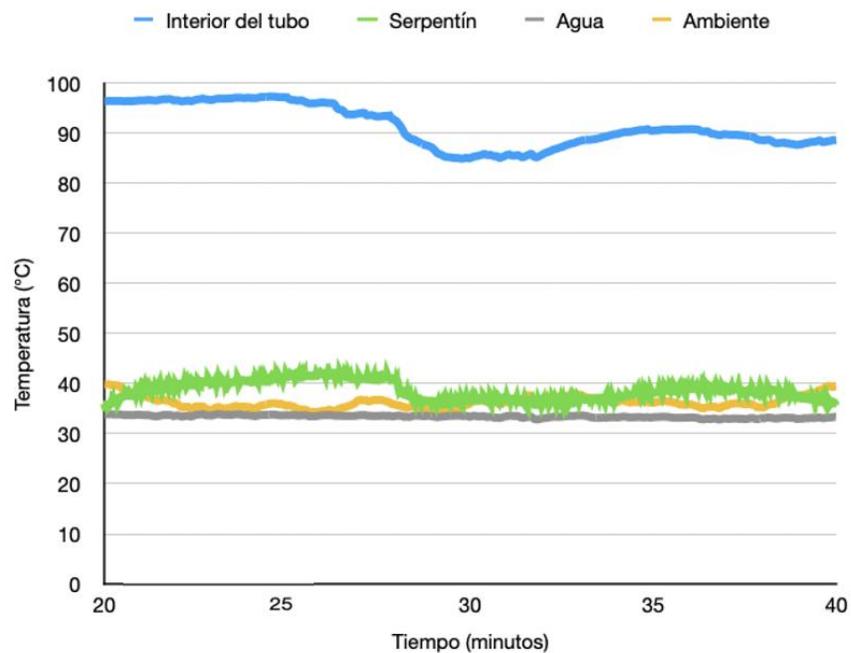


Ilustración 49. Temperatura en la estufa solar agregando un concentrador solar en un día con nubosidad

En la gráfica de la Ilustración 49 se presenta la temperatura medida en el sistema, teniendo 36 °C como temperatura ambiente promedio. Se observa que en el interior del tubo al vacío se obtuvo una temperatura promedio de 91 °C con un máximo de hasta 97 °C. La temperatura promedio del serpentín fue de 38.6 °C con un máximo de 42.8 °C. La temperatura del agua corresponde a la salida del serpentín alrededor de 33 °C. Debido al aumento de la cantidad de radiación concentrada en el colector, la temperatura en el serpentín aumentó, a pesar de ser un día nublado.

Adicionalmente, con la ayuda de una cámara termográfica se registró de manera espacial el gradiente de temperatura en el serpentín. La Ilustración 50(a) y 50(b) muestra las temperaturas al inicio y al final de la prueba, respectivamente. Es notable observar un aumento en la temperatura del serpentín de hasta un 60 %, a pesar de tratarse de un día nublado.

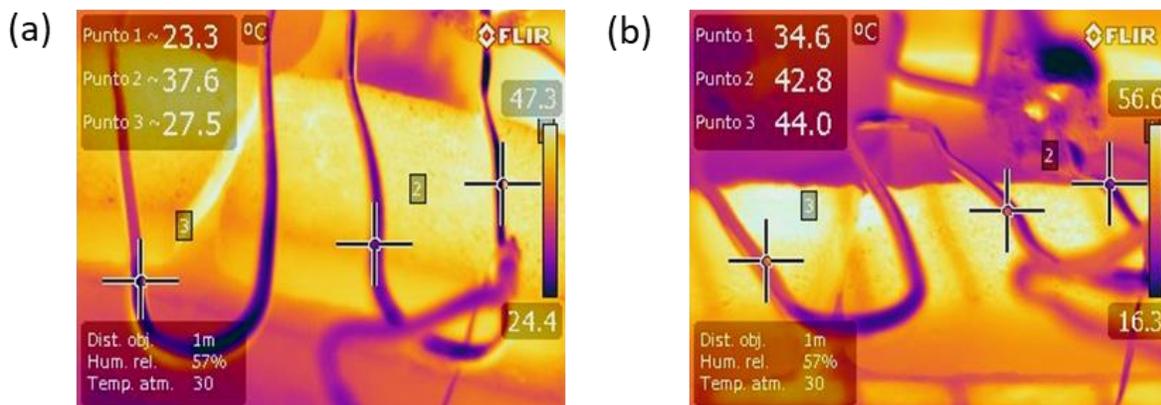


Ilustración 50. Temperatura inicial (a) y final (b) en la estufa solar con concentrador en el colector en un día con nubosidad

4.4.2 Prueba realizada en un día despejado

Considerando el aumento de temperatura después de adaptar al sistema a un colector solar con un concentrador reflejante, se repitió la prueba en condiciones de un día soleado con temperatura ambiente oscilante alrededor de los 30 °C. El experimento montado se presenta en la Ilustración 51, que consiste en la integración del concentrador solar para aumentar la temperatura dentro del tubo al vacío. Es importante mencionar que el serpentín se cubrió con una sombrilla para simular las condiciones dentro de una casa.



Ilustración 51. Medición de temperatura del sistema solar térmico con la integración de un concentrador reflejante en día despejado

En la gráfica de la Ilustración 52(a) se presentan los datos medidos de la temperatura dentro del interior del tubo, la del serpentín y la temperatura del agua al salir del serpentín. Se observa que la temperatura en el interior del tubo aumentó de 22 °C a una temperatura máxima de 137.7 °C en un lapso de 15 minutos. Con esto se comprueba que el uso de un concentrador solar mejora las condiciones térmicas del sistema. Respecto a la temperatura del serpentín, antes de iniciar la circulación del agua presentó una temperatura de 29 °C y después de 7 minutos de recirculación aumentó hasta 48 °C. La temperatura promedio del agua a la salida del serpentín fue de 36 °C.

La irradiación promedio durante el día de esta prueba, el cual estuvo despejado, se muestra en la Ilustración 52(b). En comparación con la máxima irradiación del día nublado, que fue de 2.38 kW/m² (Ilustración 47(b)), para el día despejado y soleado se tuvo un valor de 8.3 kW/m².

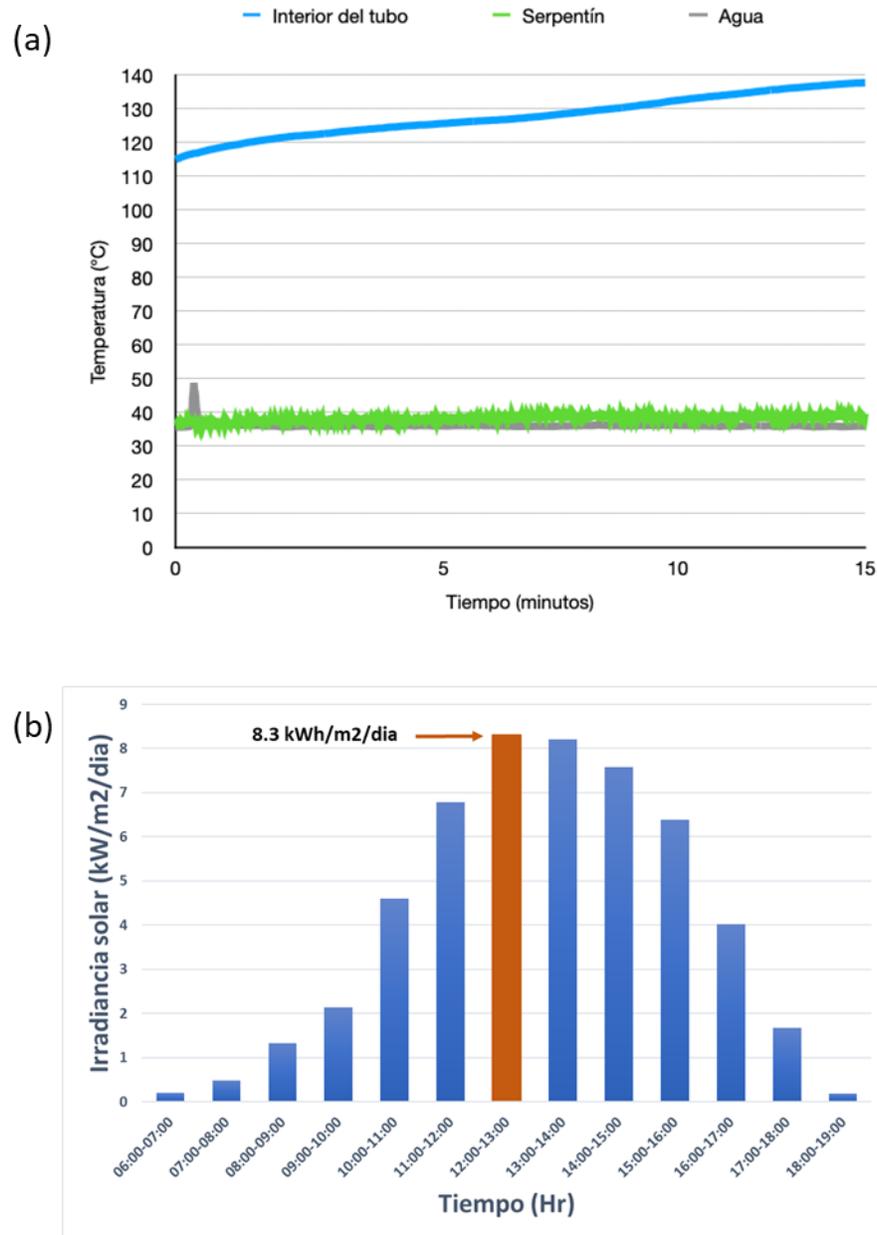


Ilustración 52. Temperatura monitoreada en el sistema con concentrador solar (a) y la irradiación solar promedio durante el día soleado

Por último, la imagen termográfica del serpentín se muestra en la Ilustración 53. Con los resultados mostrados se concluye que cuando se agrega al sistema un concentrador solar, con la finalidad de aumentar la temperatura en el colector (tubo al vacío más tubo de cobre en forma de U), se obtuvo una temperatura en el serpentín de hasta 48.6 °C. Esta temperatura es similar a lo que se midió con el termopar.

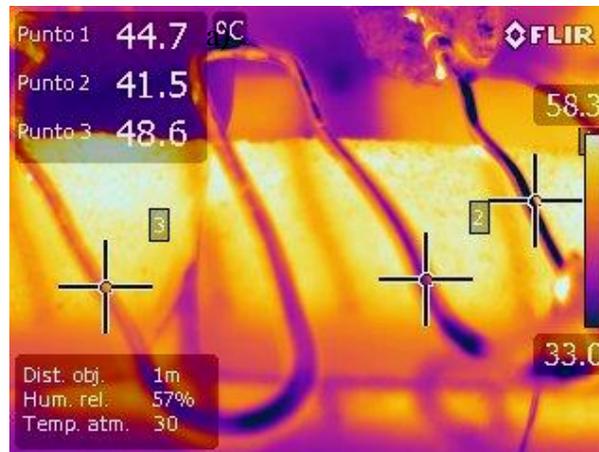


Ilustración 53. Imagen termográfica de la temperatura de serpentín en día soleado

CONCLUSIONES

Los resultados de la evaluación térmica confirmaron que el serpentín de la estufa solar indirecta es capaz alcanzar una temperatura máxima de 48.6 °C al hacer circular agua, como fluido. El incorporar un sistema que aumente la captación solar y concentre los rayos del Sol hacia el tubo evacuado permitió aumentar la temperatura en el tubo y en el serpentín.

A pesar de que se obtienen temperaturas superiores a los 100°C en el interior del tubo al vacío, las temperaturas del serpentín no superan los 50°C, esto se debe en gran medida al diseño del mismo, que tiene muchas pérdidas de calor. Para reducir dichas pérdidas y poder obtener mayores temperaturas se deberá modificar el serpentín o añadir materiales aislantes térmicos para contener la temperatura en el sistema hidráulico.

Con la ayuda de un sistema de recirculación formada por una bomba de baja potencia y un sensor de agua yf-s12, se mejoró la temperatura obtenida en el serpentín. Este sistema puede ser alimentado con una celda solar. La velocidad del caudal fue de 1.39 L por minutos. Sin embargo, al disminuir el caudal se espera que el serpentín alcance una mayor temperatura.

Realizando mejoras a este sistema para alcanzar temperaturas mayores a los 65 °C, esta estufa solar indirecta con circulación forzada puede ser implementada en zonas del estado de Chiapas en donde la población tiene un alto nivel de marginación, ya que no requiere de un gasto para adquirir el combustible para su funcionamiento. Debido a su configuración permitirá la cocción de alimentos de forma segura dentro de un hogar, sin la necesidad de estar expuestos al sol durante este proceso. Además, su uso concientizará a la población en la aplicación de energías limpias y sustentables, promoviendo la conservación del medio ambiente y de las riquezas naturales del estado.

El desarrollo de este proyecto de investigación al tratarse de un sistema energético sustentable que tiene un gran impacto social, cultural y ambiental en la sociedad, contribuye en llevar una alimentación sana, nutritiva y suficiente a la población de acuerdo con el Objetivo 2 de los ODS: Hambre cero.

TRABAJO A FUTURO

A partir de los resultados obtenidos, se enlistan algunas sugerencias y recomendaciones que podrían mejorar las características del sistema termo solar propuesto:

- Realizar un análisis de correspondencia entre la velocidad del fluido y la temperatura alcanzada en el serpentín.
- Incorporar materiales térmicos en el sistema hidráulico para evitar pérdidas de calor durante la circulación del agua.
- Mejorar el diseño del serpentín para evitar las pérdidas de calor.
- Realizar pruebas utilizando otros fluidos como aceites vegetales, anticongelantes de automóviles, etc, con el objetivo de elegir el que logre una mayor temperatura en el serpentín.
- Automatizar el control y monitoreo del flujo del sistema mediante la integración de un Controlador Lógico Programable.
- Agregar un sistema de seguimiento solar para un mejor posicionamiento del concentrador solar.

REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología (2008). *La radiación solar*. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. Recuperado 5 de octubre de 2023, de https://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf
- Agrawal, H., & Yadav, A. (2021). A Scheffler solar concentrator heat transfer model used in forced-circulation ice melting system at high-altitude regions. *Environment, Development and Sustainability*, 23(2), 1623-1645.
- Ahmed, S. M., Al-Amin, M. R., Ahammed, S., Ahmed, F., Saleque, A. M., & Rahman, M. A. (2020). Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp. *Solar Energy*, 205, 230-240.
- Almada, M., Stella Cáceres, M., Machaín-Singer, M. & Pulfer, J. C. (2005). Guía de uso de cocinas y hornos solares: Recetario solar. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Gu--a-de-uso-de-cocinas-y-hornos-solares.pdf>
- Carrión-Chamba, W., Murillo-Torres, W., & Montero-Izquierdo, A. (2022). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (27), 59-73. <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>
- Castellanos-Betanzos, I.C., Larrinaga-González P., Toledo-López B., Ruiz-Pineda J., Escobar Vera, A. Y., López-Morales, G. & Vilchis-Bravo, H. (2022, 21 de noviembre). *Desarrollo de un prototipo térmico solar para su implementación en zonas marginadas de Chiapas* [Poster]. 3° Congreso Nacional de Secado, Cocción y Refrigeración Solar de Alimentos. Campeche, México. <https://consycsa.aseerca.org/memorias>
- Cifuentes, J. I. (2016). *Estufas solares, Eficiencia energética*. Universidad de San Carlos de Guatemala, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2880.4087>
- Córdoba-Almarino, J. P. (2019). *Diseño térmico y mecánico de un intercambiador de calor de placas* [Tesis]. Universidad de Ibagué – Tolima. <https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/fc60036b-febf-4fec-b5bd-c137d42e228a/content>
- García, O., & Pilatowsky, I. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*.

Global Solar Atlas (s.f.). *Global horizontal irradiation*.
<https://globalsolaratlas.info/download/mexico>

González-Avilés, M., & Servín Campuzano, H. (2015). Modelo térmico para estimar la potencia de cocción estándar de cocinas solares. *Nova scientia*, 7(13), 48-65.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000100004&lng=es&tlng=es

Halacy, B., & Halacy, D. S. (1992). *Cooking with the Sun*. Morning Sun Press.

Herrera Echevarría, P. (2015). Diseño, modelización y cálculo de un intercambiador de calor de carcasa y tubo [Tesis]. Universidad de Cantabria, España.
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6176/373772.pdf>

Hetpro (s.f.). Sensor de Flujo YF-S201 para agua. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-flujo/>

Hussein, H. M. S., El-Ghetany, H. H., & Nada, S. A. (2008). *Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit*. *Energy conversion and management*, 49(8), 2237-2246.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.026>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s.f). *Características de la radiación solar*. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>

Insumos energía renovable fotovoltaica en México y su proyección al 2020. (2012). Gobierno de México. Recuperado 11 de octubre de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/58849/INSUMOS_DE_ENERG_A_RENOVABLE_FOTOVOLTAICA_Y_SU_PROYECCION_AL_2020_SEC.pdf

Jaramillo, O.A. (2007). *Intercambiadores de calor*. [PDF] Centro de Investigación en Energía.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=09eca1735a9252112a0b2e3e3cd24d2186e07d96>

MCC USB-TEMP and TC Series: Temperature and Voltage Measurement USB DAQ devices. (s.f.). Digilent. <https://digilent.com/shop/mcc-usb-temp-and-tc-series-temperature-and-voltage-measurement-usb-daq-devices/>

Melgosa Revillas, S. (2011). Guía de la termografía infrarroja-aplicaciones en ahorro y eficiencia energética. de <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-fenercom-2011.Pdf>

- Misra, N., Anand, A., Pandey, S., Kant, K., Shukla, A., & Sharma, A. (2023). Box-Type Solar Cookers: An Overview of Technological Advancement, Energy, Environmental, and Economic Benefits. *Energies*, 16(4), 1697.
- Monsalvo L. Hermando O. (2009). *Diseño de una cocció solar para actividades de camping o afines*. [Tesis de Licenciatura, Universidad EAFIT] Repositorio del departamento de ingeniería de diseño de producto.
- Naciones Unidas. (s. f.-a). Objetivo 2: Poner fin al hambre. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- Naciones Unidas. (s. f.-b). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético*. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible#:~:text=Todas%20las%20tecnolog%C3%ADas%20tienen%20una,emisiones%20globales%20de%20CO2.>
- Ordóñez García, A. (2021). *Efecto de la radiación solar en la Tierra*. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/efecto-de-la-radiacion-solar-en-la-tierra>
- Rondán-Morales, I. K. & Rebaza-Mariños, R. E. (2016). Determinación de la eficiencia de un tubo de vacío de baja presión y alta presión de un colector solar [Tesis]. Universidad Nacional del Santa: Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.14278/2638>
- Servicio Meteorológico Nacional (s. f.). *Mapas diarios de temperaturas y lluvia*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/mapas-diarios-de-temperatura-y-lluvia>
- Seven Sensor (2022). *¿Qué es un piranómetro y cómo mide la irradiancia?*. <https://www.sevensensor.com/es/que-es-un-piranometro-y-como-mide-la-irradiancia>
- Solar cookers international (s.f.). *Scheffler Community Kitchen*. https://solarcooking.fandom.com/wiki/Scheffler_Community_Kitchen
- Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia (2019). *Introducción a la energía solar térmica*. 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Gobierno de Energía, https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manual_introduccion_a_la_energia_solar_termica_final.pdf
- Terra Fundación (09 de febrero de 2017). *Historia de la cocina solar*. <https://www.terra.org/categorias/comunidad-cocina-solar/historia-de-la-cocina-solar>

- Toledo B., Larrinaga-González P., Escobar Vera, A. Y., López, Castellanos-Betanzos, I.C., Ruiz-Pineda J., López-Morales, G. & Vilchis-Bravo, H. (2022, 21 de noviembre). *Desarrollo de estufas solares parabólicas con tubo al vacío para su implementación en zonas ecoturísticas del estado de Chiapas*. [Poster]. 3° Congreso Nacional de Secado, Cocción y Refrigeración Solar de Alimentos. Campeche, México. <https://consycsa.aseerca.org/memorias> (Pag. 265).
- Torres Muro, H., Polo Bravo, C., & Milla Taco, B. (2019). Perspectiva Ambiental de las Cocinas Solares en la Zona Altoandina de Tacna. <https://doi.org/10.33326/26176033.2004.8.144>
- Unida (1997). *Aplicaciones térmicas (2): Cocinas tipo Caja*. Recuperado 5 de octubre de 2023, de <https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/COCINA%20SOLAR%20TIPO%20CAJA.pdf>
- Varas, E. (2010). *Radiación solar*. Pontificia Universidad Católica de Chile, curso Hidrología. Recuperado 5 de octubre de 2023. https://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_2/modulo2/radsol.pdf

ANEXO: PRODUCTIVIDAD ACADÉMICA.

1. Asistencia virtual al “Primer Congreso Transnacional de Sostenibilidad y Desarrollo Local en la Península de Yucatán 2022”. Universidad Autónoma de Yucatán; México. 21 al 23 de febrero del 2022.



2. Participación en el “Mini Verano de la Investigación Científica” Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; México. 13 al 24 de junio de 2022.



3. Reconocimiento por la participación en la Exposición de Proyectos científicos en el marco de la Semana de la Juventud, Ciencia, Arte, Cultura y Salud. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; México 12 de agosto 2022.



4. Constancia de asistencia al taller “Introducción a los sistemas de información geográficos” en la Semana de divulgación de la ciencia e ingeniería 2022. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; México del 29 de agosto al 01 de septiembre de 2022.



5. Reconocimiento por haber desarrollado y donado un dispositivo solar térmico para calentamiento de agua en beneficio de una familia. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.; México. Noviembre 2022.



6. Presentación de estufas solar parabólica en parque ecoturístico Joyyo Mayu (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas).

https://prensa.unicach.mx/note.php?v=MTI4Mw%3D%3D&title=Estudiantes%20desarrollan%20estufas%20solares%20parabólicas&fbclid=IwAR3xFU1kvDPu4hltzXFoR12ACmng21izVaFnEg3J4XCkRiXO4M-tk_6M2WI



7. Constancia de participación por la ponencia “Desarrollo de estufas solares cilindro parabólicas con tubos al vacío para su implementación en zonas ecoturísticas del Estado de Chiapas” en marco del 3ER Congreso Nacional de Secado, Cocción y Refrigeración solar de alimentos. San Francisco de Campeche, México. 21 al 25 de noviembre del 2022.



CONSTANCIA

Heber Vilchis Bravo, B. Toledo López, P. Larrinaga González, A. G. Escobar Vera, I. del Carmen Castellanos Betanzos y J. Ruiz Pineda, G. López Morales

Por su valiosa participación con la ponencia titulada:

Desarrollo de estufas solares parabólicas con tubos al vacío para su implementación en zonas ecoturísticas del Estado de Chiapas

Dr. Erick César López Vidaña
Presidente del CoNSyCSA 2022

Mtro. Francisco Javier Barrera Lao
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA UACAM

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa
PRESIDENTE DE ASEERCA



8. Constancia de participación por ponencia “Desarrollo y optimización de un sistema solar térmico para su implementación en zonas marginadas de Chiapas” en marco del 3ER Congreso Nacional de Secado, Cocción y Refrigeración solar de alimentos. San Francisco de Campeche, México. 21 al 25 de noviembre del 2022.



CONSTANCIA

Heber Vilchis Bravo, Jonathan Ruiz, Alessandra Gadira Escobar, Pedro Larrinaga, Braulio Toledo y Guadalupe López

Por su valiosa participación con la ponencia titulada:

Desarrollo y optimización de un sistema térmico solar para su implementación en zonas marginadas de Chiapas.

Dr. Erick César López Vidaña
Presidente del CoNSyCSA 2022

Mtro. Francisco Javier Barrera Lao
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA UACAM

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa
PRESIDENTE DE ASEERCA



9. Reconocimiento por participación en el taller “Diseño de Estufas Solares” en el marco del 1ER Congreso de Ciencias y Desarrollo Tecnológico y 2ND. International Material & Systems Congress for Renewable Energy Applications (IMSCREA 2023) Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez y Suchiapa, Chiapas; México.

LA **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DEL ESTADO DE CHIAPAS**
Y LA **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CHIAPAS**
OTORGAN EL PRESENTE



RECONOCIMIENTO A:

Jonathan Ruiz Pineda

POR SU PARTICIPACIÓN EN EL TALLER “**DISEÑO DE ESTUFAS SOLARES**”, REALIZADO EN EL MARCO DEL **1ER CONGRESO DE CIENCIAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO Y 2ND. INTERNATIONAL MATERIAL & SYSTEMS CONGRESS FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS**, DESARROLLADO EN TUXTLA GUTIÉRREZ Y SUCHIAPA, CHIAPAS; SEPTIEMBRE DE 2023.

DR. HÉBER VILCHIS BRAVO
COORDINADOR DEL CONGRESO IMSCREA
UNICACH

DRA. GABRIELA PALACIOS POLA
COORDINADOR DEL CONGRESO CDT
UPCHIAPAS

2ND INTERNATIONAL MATERIAL & SYSTEMS CONGRESS FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS
PRIMER CONGRESO DE CIENCIAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

2023

10. Reconocimiento por participación a 1ER Congreso de Ciencias y Desarrollo Tecnológico y 2ND. International Material & System Congress for Renewable Energy Applications (IMSCREA 2023) Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez y Suchiapa, Chiapas; México.

LA **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DEL ESTADO DE CHIAPAS**
Y LA **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CHIAPAS**
OTORGAN EL PRESENTE






RECONOCIMIENTO A:

Jonathan Ruiz Pineda

POR SU PARTICIPACIÓN EN LAS ACTIVIDADES DEL **1ER CONGRESO DE CIENCIAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO** Y **2ND. INTERNATIONAL MATERIAL & SYSTEMS CONGRESS FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS**, DESARROLLADO EN TUXTLA GUTIÉRREZ Y SUCHIAPA, CHIAPAS; SEPTIEMBRE DE 2023.



DR. HÉBER VILCHIS BRAVO
COORDINADOR DEL CONGRESO IMSCREA
UNICACH



DRA. GABRIELA PALACIOS POLA
COORDINADOR DEL CONGRESO CDT
UPCHIAPAS

2ND INTERNATIONAL MATERIAL & SYSTEMS CONGRESS FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS
PRIMER CONGRESO DE CIENCIAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

2023