

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

TESIS

DISEÑO Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UNA ESTUFA SOLAR CON CONCENTRADOR PARABÓLICO PARA SU USO EN ZONAS ECOTURISTICAS DEL ESTADO DE CHIAPAS

PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA

PEDRO LARRÍNAGA GONZÁLEZ

DIRECTOR

DR. HÉBER VILCHIS BRAVO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Agosto 2024



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA GENERAL

DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez; Chiapas.

Fecha: 06 de junio de 2024

C. Pedro Larrínaga González

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

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

Diseño y Evaluación Térmica de una Estufa Solar con Concentrador Parabólico para su uso en

Zonas Ecoturísticas del Estado de Chiapas.

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. Eduardo Rincón Mejía

Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz

Dra. Guadalupe López Morales

Firmas:

E. Rincón
J. Conde
G. López

DEDICATORIA

A: Pedro y Patricia, gracias por todo su esfuerzo y cariño. Quienes me apoyaron en todo momento, dejando en prioridad mi estudio, dejando a un lado cualquier otra cuestión y atendiendo cualquier inconveniente o necesidad que me surgía durante mi estancia en la universidad.

AGRADECIMIENTO

A Dios:

Gracias por ser mí guía en todo el camino andado y por permitirme recorrer mi vida; por las bendiciones y ser ese juez en mis decisiones, viendo siempre por mi bien y el de los demás.

A mis padres:

Gracias por ser el ejemplo que siempre seguiré, por inculcarme buenos valores, enseñarme la importancia de ser dedicado a lo que hago y ser agradecido con todos.

A mis hermanos:

Por su apoyo incondicional, por velar por mi salud y bienestar; además de ser quienes me ayudaban a olvidar problemas y hacerme sonreír.

A mi novia:

Gracias por ser ese pilar extra que me dio ánimos cuando más lo necesitaba, por acompañarme en los desvelos y estar a mi lado.

A mi abuela:

Gracias por siempre estar al pendiente de mí y de darme los mejores consejos, al mismo tiempo en corregirme cuando estaba equivocado y no me daba cuenta.

A mis asesores:

Gracias por el apoyo en todo momento antes y durante el desarrollo de este trabajo; por ser parte fundamental en mi formación académica y por compartir sus conocimientos, experiencias; además de motivarme a seguir saliendo adelante.

Semillas Papalotla:

Gracias al Ing. Augusto Mantilla Loisell por la aceptación tan gentil y el apoyo en todo momento durante el tiempo que residí; además de cobijar mis necesidades estudiantiles prestándome las instalaciones con el apoyo del personal capacitado: C. José Lázaro Morales Pérez, C. Martín Toledo Sol, C. Jorge Pérez Gutiérrez y C. Rafael Galdámez Hernández, del área de taller dentro de la planta, para lograr terminar el proyecto presentado.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

Resumen	2
1.1.Introducción.....	3
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Planteamiento del problema.....	7
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1 General.	7
1.4.2 Específicos.....	7
1.5. Justificación.....	8
1.6. Metas.....	11

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Energía solar o recurso solar.....	13
2.2. Energía solar térmica.....	14
2.3. Tipos de radiación solar.....	15
2.4. Geometría solar.....	15
2.5. Fenómenos que afectan la trayectoria solar.....	17
2.5.1. Dispersión.....	18
2.5.2. Reflexión.....	19
2.5.3. Transmisión.....	19
2.5.4. Absorción por moléculas de gases.....	19
2.6. Estufas solares.....	20
2.6.1. Tipo caja.....	20
2.6.2. Tipo concentradoras.....	21
2.6.3. De colectores de placa plana.....	21

2.7. Concentradores de energía solar.....	22
2.7.1. Canales parabólicos.....	22
2.7.2. Sistemas de concentradores lineales de Fresnel (LFR).	23
2.7.3. Sistemas de receptor central o torre central.	24
2.7.4. Sistemas de disco parabólico.....	24
2.8. Propiedades ópticas de los materiales.....	25
2.9. Formación de imágenes en espejos.....	27
2.9.1. Leyes de reflexión.	27
2.9.2. Reflexión especular y difusa.	28
2.10. Función matemática parabólica.....	29
2.11. Fórmula de cálculo de la longitud de arco por la notación de Leibniz.	30
2.12. SolTrace: Herramienta para el modelado óptico	30

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTUFA SOLAR

3.1. Cálculos para elaboración de concentrador solar.	33
3.2. Simulación de propagación de la radiación solar usando SolTrace.	35
3.3. Proceso de fabricación de estufa solar.....	38
3.3.1. Construcción del concentrador semicilíndrico (prototipo 1).....	38
3.3.2. Construcción de concentrador cilíndrico parabólico (prototipo 2)	39

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización óptica de materiales reflejantes.	48
4.2. Evaluación de la estufa solar cilíndrica (prototipo 1)	50
4.3. Evaluación de la estufa solar parabólica (prototipo 2).....	52
4.3.1. Simulación en SolTrace.	52
4.4. Comparación entre las dos estufas solares.	54
4.5. Pruebas de estufa solar en condiciones reales.....	56

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Conclusiones	58
Referencias	61
ANEXOS	64

Índice de imágenes.

Imagen 1. Objetivos del desarrollo sostenible dictado por la ONU.	9
Imagen 2. Radiación solar en México (Global solar Atlas).	10
Imagen 3. Radiación promedio mensual en el estado de Chiapas.	11
Imagen 4. Estructura del Sol y espectro electromagnético.	13
Imagen 5. Representación de la altura solar “h”.	16
Imagen 6. Trayectoria solar y analema solar.	16
Imagen 7. Esquema representativo para cálculo de ángulo horario.	17
Imagen 8. Distribución de la radiación en la atmosfera.	18
Imagen 9. Ejemplo de estufas solares tipo caja.	20
Imagen 10. Representación de estufa solar de concentración.	21
Imagen 11. Representación de estufa con colectores de placa plana.	22
Imagen 12. Ejemplo de sistema de canales parabólicos.	23
Imagen 13. Ejemplo de concentradores lineales de Fresnel.	23
Imagen 14. Ejemplo de sistema de receptor central o torre central.	24
Imagen 15. Ejemplo de sistema de disco parabólico.	25
Imagen 16. Representación de las propiedades ópticas de los materiales.	26
Imagen 17. Representación de las leyes de reflexión.	28
Imagen 18. Representación de reflexión especular.	28
Imagen 19. Representación de reflexión difusa.	29
Imagen 20. Representación geométrica en 3D (a) y el corte trasversal de una superficie cilíndrica parabólica.	29
Imagen 21. Representación de la curva parabólica utilizada para el desarrollo del prototipo.	33
Imagen 22. Apartado SUN de software SolTrace.	36
Imagen 23. Apartado OPTICS de software SolTrace.	36
Imagen 24. Apartado GEOMETRY del software SolTrace.	37
Imagen 25. Representación de apartados TRACE Y INTERSECTIONS del software SolTrace.	37
Imagen 26. Pasos de proceso de construcción.	38
Imagen 27. Diseño de estufa solar (a) y dimensiones de la sección trasversal del concentrador semicilíndrico (b).	39
Imagen 28. Parábola graficada con los datos de la Tabla 3.	40
Imagen 29. Diseño de la estufa solar.	41
Imagen 30. Elaboración de parábola.	42
Imagen 31. Armado de estructura del concentrador.	43
Imagen 32. Elaboración de bases que sostienen el concentrador y el tubo al vacío.	43
Imagen 33. Perforación de bases para el armado de toda la estufa.	44
Imagen 34. Elaboración de soportes del tubo al vacío.	44
Imagen 35. Estructura completa sin (a) y con superficie reflectora (b).	45
Imagen 36. Espectrómetro de UV-VIS-IR.	46
Imagen 37. (a) Materiales metálicos a prueba y (b) colocación del material dentro del espectrofotómetro.	48
Imagen 38. Porcentajes de reflectividad de materiales propuestos.	49
Imagen 39. Estufa solar cilíndrica fabricada.	50

Imagen 40. Temperatura medida durante la evaluación de prototipo 1 (a) y curva de radiación solar durante la medición (b).	51
Imagen 41. Vista horizontal de representación de prototipo 2 en software SolTrace.	52
Imagen 42. Vista frontal de representación de prototipo 2 en software SolTrace en el punto focal calculado.	53
Imagen 43. Vista frontal de representación de prototipo 2 en software SolTrace con la distancia máxima en el soporte.	53
Imagen 44. Pruebas de ambas estufas en el instituto de investigación e innovación en energías renovables en la UNICACH.	54
Imagen 45. Resultados de prueba con ambos prototipos.	55
Imagen 46. Prueba de la estufa solar en el parque ecoturístico “Joyyo Mayu”.....	56
Imagen 47. Cocción de alimentos durante la presentación en el parque ecoturístico “Joyyo Mayu”.	57

Índice de tablas.

Tabla 1. Relación entre hora y el ángulo horario.....	17
Tabla 2. Absorción diferencial de energía por los componentes de la atmosfera.	19
Tabla 3. Tabulación con los valores de (x,y) al evaluar la Ec. 3 para $a=9.37$	40
Tabla 4. Materiales utilizados para la construcción de prototipo 2.....	41
Tabla 5. Dimensiones de cortes de material.	42

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

En este capítulo se abordará el porqué y cuáles fueron las razones de interés para desarrollar este proyecto.

Resumen

El uso de las energías renovables y la conservación de zonas ecoturísticas están estrechamente relacionadas, siendo el objetivo primordial preservar y mejorar las condiciones del medio ambiente, evitando el cambio climático, el calentamiento global, y sus posibles consecuencias a largo plazo que afectan a la población. Las zonas ecoturísticas en México se caracterizan por su belleza natural y biodiversidad, lo que las convierte en lugares ideales para la generación de energía limpia y sostenible. Dentro de los recursos naturales que son utilizados para la generación de la energía, la radiación solar es el de mayor utilización para convertirla en calor mediante el uso de colectores solares. Una estufa solar indirecta es un sistema solar térmico que aprovecha esta energía calorífica para calentar o cocinar alimentos sin que el usuario tenga que estar expuesto al Sol durante su uso.

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y la construcción de una estufa solar con concentradores de geometría diferente, una en forma de semicilindro y otra en forma cilíndrica parabólica. Se presentan los cálculos matemáticos empleados para el diseño de este dispositivo térmico solar, así como la modelación de la estufa en el software SolTrace para determinar el rendimiento óptico de la estufa solar cilíndrica parabólica. Los resultados de la evaluación térmica de los sistemas muestran un desempeño adecuado, ya que fueron capaces de alcanzar temperaturas en el rango de 47 a 191 °C necesarias para cocinar correctamente vegetales y proteínas. La geometría de cada concentrador es un factor importante para optimizar la fracción de energía radiante que es reflejada a un tubo al vacío que tiene la función de transformar la energía solar en energía térmica. La portabilidad, su uso seguro y el bajo costo de este diseño lo hacen idóneo para su implementación en zonas ecoturísticas. La primera prueba fue realizada en el parque ecoturístico Joyyo Mayu ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

1.1. Introducción

La tendencia en el desarrollo de tecnologías sustentables para el aprovechamiento de las energías renovables es cada vez mayor. Ya que se ha convertido en una solución factible y asequible para preservar el medio ambiente y satisfacer las necesidades energéticas de los humanos, además de disminuir los contaminantes como los gases de efecto invernadero (GEI) generados por el uso de combustibles fósiles.

La energía más abundante en nuestro planeta es la radiación solar, que es emitida por la estrella que se encuentra en el centro del sistema planetario llamada Sol. Esta energía tiene potenciales aplicaciones para el beneficio humano después de ser transformada en energía eléctrica o térmica. El sol tiene una temperatura superficial aproximadamente de 5500°K (Kalogirou S., 2014).

La energía solar térmica, se define como el aprovechamiento de la radiación solar para poder transmitirla o almacenarla en procesos que necesiten una temperatura mayor a la temperatura promedio de los materiales. Dichos procesos se dividen en 3 tipos: (a) Baja temperatura, que se encuentra por debajo de los 100 °C, (b) Media temperatura, se encuentran en el rango entre los 100 °C y 400 °C y (c) Alta temperatura cuando es superior a 400°C. (SEDIGAS, 2013)

Dentro de las diversas aplicaciones de la energía solar térmica, se ha logrado el desarrollo y optimización de dispositivos de cocción y secado usando la radiación solar como fuente de energía. Una estufa solar es un aparato que transforma la energía solar a energía térmica para cocinar alimentos, esto implica un ahorro económico a los usuarios ya que no requiere de la adquisición de materia prima para su funcionamiento a diferencia de los demás aparatos de cocción convencionales. Por la utilidad de estas estufas solares, estas pueden ser instaladas para uso doméstico y en restaurantes ecológicos. Sin embargo, tiene cabida también su implementación en zonas naturales que buscan fomentar el ecoturismo. Es importante mencionar que la Organización Mundial del Turismo busca que se salvaguarden los recursos naturales, bajo un concepto de desarrollo sustentable, para que futuras generaciones puedan aprovecharlos, mientras se fomenta un crecimiento social, cultural y económico de la población local, entre otras. (Bien, 2007)

El estado de Chiapas se caracteriza por albergar una gran cantidad de bellezas naturales como ríos, cascadas, lagos, playas, grutas, montañas, entre otros paisajes y reservas naturales, que anualmente tienen una gran afluencia de turistas nacionales y extranjeros que buscan conocer y disfrutar de experiencias alternas al turismo convencional. Además, algunos estatutos gubernamentales incentivan al uso de tecnologías ecológicas con el propósito de salvaguardar y proteger la conservación del medio ambiente que garanticen el derecho a toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar. La lucha contra problemas ambientales actuales, tales como la mitigación del cambio climático y la reducción de GEI han llevado a este cambio de perspectiva al sector turístico. Que se está dando sobre todo en el turismo rural o en comunidades donde se oferta un turismo ecológico y sustentable con naturaleza.

La pobreza en Chiapas, México, fomenta el uso de estufas solares debido a varios factores. La falta de acceso a recursos energéticos convencionales y la dependencia de la leña como combustible contribuyen a la deforestación y la degradación del medio ambiente, afectando la seguridad alimenticia y la salud de la población. Las estufas solares ofrecen una alternativa sostenible y económica, reduciendo los costos de consumo de combustible y las emisiones de carbono, mejorando así la calidad de vida de las comunidades. Esta tecnología promueve la autonomía energética y la preservación de los recursos naturales en un entorno de escasos recursos.

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y la construcción de una estufa solar con concentradores de geometría diferente, una en forma de semicilindro y otra en forma cilíndrica parabólica. Se presentan los cálculos matemáticos empleados para el diseño de este dispositivo térmico solar, así como la modelación de la estufa en el software SolTrace para determinar el rendimiento óptico de la estufa solar cilíndrica parabólica. Los resultados de la evaluación térmica de los sistemas muestran un desempeño adecuado, ya que fueron capaces de alcanzar temperaturas en el rango de 47 a 191 °C necesarias para cocinar correctamente vegetales y proteínas. La geometría de cada concentrador es un factor importante para optimizar la fracción de energía radiante que es reflejada a un tubo al vacío que tiene la función de transformar la energía solar en energía térmica. La portabilidad, su uso seguro y el bajo costo de este diseño lo hacen idóneo para su implementación en zonas ecoturísticas.

La primera prueba fue realizada en el parque ecoturístico Joyyo Mayu ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

1.2. Antecedentes

La evolución y el interés en el diseño de un artefacto útil para la cocción de alimentos ha sido el impulsor del desarrollo de nuevas estufas ecológicas y térmico-solares. Sin embargo, hoy en día, un porcentaje significativo de la sociedad desconoce las ventajas de estas tecnologías alternas a las cocinas tradicionales.

A lo largo de los años, diferentes configuraciones y diseños de estufas solares han basado su principio de funcionamiento en la concentración de la radiación solar en un área mínima, como una alternativa sustentable y eficiente para la cocción de alimentos (Khatri R., 2021). Una estufa solar está constituida principalmente por un concentrador de rayos solares y un colector de radiación solar. El concentrador puede presentar diferentes geometrías, ya sea en forma de caja, parabólica o cilíndrica, que dependiendo de la calidad del material del que este elaborado, la reflexión de la radiación solar será mayor y enfocará al centro o a lo largo de su eje longitudinal del colector. El colector absorbente encargado de transformar la energía solar en energía térmica, puede ser un contenedor o tubo metálico. La evolución de estufas solares inició en 1767 cuando Horace de Saussure construyó la primera estufa solar similar a una caja negra con tapa de vidrio, que fue capaz de cocinar frutas a temperatura de 85 °C. Posteriormente se derivó otras configuraciones según la geometría del concentrador de los rayos de sol como lo es tipo panel, de caja y parabólicas. El científico Ducarla mejoró su sistema agregando espejos en la caja para mejorar la eficiencia en la reflexión de rayos solares, con esto se pudo cocinar proteínas en un lapso de una hora. Actualmente el desarrollo de estufas solares ha crecido exponencialmente ya que es una alternativa ecológica, pero se ha buscado aumentar la eficiencia de ellas para alcanzar mayores temperaturas y disminuir el tiempo de cocción de alimentos.

Respecto al desarrollo de las primeras estufas solares en México, se tiene registro que en el año de 1955 se implementaron estufas solares tipo sombrilla invertida con superficie aluminizada en varias zonas rurales del país. Posteriormente se han desarrollado las estufas tipo caja, las cuales consisten en cámaras térmicamente aisladas, con espejos en su interior. Otro diseño de estufa tipo horno solar consistió en una estructura de madera aislada

térmicamente, con sus paredes interiores hechas de lámina de aluminio y una cubierta doble de vidrio con reflector doble de madera forrado con lámina de acero inoxidable. Los diferentes tipos de modelos descritos anteriormente tienen la necesidad de reubicar la orientación del dispositivo de acuerdo con la trayectoria del Sol. Un diseño particular son las estufas con concentradores del tipo CPC (Concentrador Parabólico Compuesto) que tienen la capacidad de reflejar al receptor todos los rayos que se encuentran dentro del ángulo de aceptación, con la ventaja de que no necesitan de la ayuda de un sistema de seguimiento solar. Una variación de estos concentradores es la que emplea un concentrador en forma de lente de Fresnel hecho por acrílico para captar la máxima radiación en un punto y alcanzar temperaturas hasta por 200 °C (Zhao Y. et al., 2018), este dispositivo presenta grandes dimensiones lo que provoca que este no se considere portable.

También existen estufas solares en donde la geometría del captador es cilíndrico parabólico, en este caso se emplea como colector de la radiación solar reflejada por el captador a un tubo metálico o un tubo al vacío recubierto por un material absorbente. Dicho tubo está formado por dos tubos de borosilicato concéntricos, recubierto por un material altamente absorbente y que entre ellos existe un vacío de aislamiento térmico que le permite obtener una alta eficiencia. Algunos diseños de estufas solares contienen dos tubos al vacío que funcionan como colector de la radiación solar que es reflejado por un concentrador parabólico, y que en el interior del tubo es donde se cocinan los alimentos (García D., Lupian V., Marroquín. Á. y Hernández J., 2016). De igual forma, se ha estudiado de manera analítica el diseño de una estufa solar portátil que consta de un pequeño tubo al vacío y un tanque de acero inoxidable (Hosseinzadeh M., Fazian A., Mahdi S., y Zamani H., 2020) La intención de estos diseños es mejorar la eficiencia térmica para disminuir los tiempos de cocción de alimentos.

La aplicación de esta tecnología solar es viable en México y otros países, en donde un gran porcentaje de su territorio presenta una radiación solar alta durante la mayor parte del año. Una potencial aplicación es la implementación de una estufa solar amigable con el medio ambiente para la cocción de alimentos al aire libre, es decir en zonas ecoturísticas en donde la afluencia de turistas nacionales e internacionales es alta en todo el año.

1.3. Planteamiento del problema

México se caracteriza por poseer grandes atractivos naturales que son visitados por turistas nacionales y extranjeros gracias a su entorno físico. Particularmente el estado de Chiapas cuenta con una gran variedad de ecosistemas en donde alberga más de 40 centros ecoturísticos que acogen múltiples complejidades por la constante demanda turística, haciendo adaptaciones sostenibles para satisfacer las necesidades del turista (Turismo, 2024). Algunos de estos centros ofrecen actividades como la de camping que implica la cocción de alimentos, para lo que normalmente se emplea las estufas de leña. La desventaja de esas estufas es que emiten humo que contiene muchos contaminantes del aire los cuales son nocivos, tóxicos y repercuten directamente a la salud, además de fomentar la tala de árboles que impacta de manera negativa a la conservación del medio ambiente.

Esto genera la necesidad de desarrollar tecnología sustentable para la cocción de vegetales y proteínas que no requiera de fuentes energéticas como el gas, biomasa o electricidad para su funcionamiento. Debido a que en algunas áreas ecoturísticas está prohibido encender fogatas o quemar algún tipo de residuo que afecte la salud de los habitantes y el ambiente, el uso de un artefacto amigable con el medio ambiente y la salud no infracciona alguna ley ambiental.

1.4. Objetivos

1.4.1 General

Diseñar y desarrollar una estufa solar cilíndrica parabólica para su uso en zonas ecoturísticas.

1.4.2 Específicos

- Proponer el diseño de una estufa solar con concentrador en forma cilíndrica parabólica con base a cálculos matemáticos para mejorar la acumulación de la energía solar.
- Modelar la concentración de la radiación solar en la estufa solar en el software SolTrace.
- Fabricar y evaluar el desempeño de cocción de alimentos de la estufa solar.

1.5. Justificación

El desarrollo y la implementación de una estufa solar en zonas ecoturísticas es una alternativa sustentable, ya que se puede utilizar como fuente de energía a la radiación del Sol. Además, este tipo de energía es generada de forma natural sin tener que intervenir o usar máquinas que lo produzcan; por lo tanto, se considera como una fuente de energía natural y sin contaminantes.

Chiapas es un estado en donde un 54 % de su territorio tiene un clima cálido húmedo, el 40% un clima cálido subhúmedo, el 3 % temperado húmedo y el ultimo 3% templado subhúmedo (INEGI, 2023), con una temperatura anual promedio máxima de 30°C y una mínima de 17.5°C. Otra de las características importantes climatológicas son las lluvias, en donde en la región norte del estado se presentan lluvias todo el año, mientras que en el resto de la entidad solo se presenta lluvias en verano. Esto es un indicativo de que el correcto funcionamiento de una estufa solar no será afectado para la cocción de alimentos. Por otro lado, el turismo en Chiapas se caracteriza por su amplia diversidad de atractivos naturales, zonas arqueológicas, arquitecturas coloniales, playas y costas, las cuales definen el potencial turístico de esta región, siendo beneficiaria la comunidad que vive del turismo. La implementación de estas estufas solares en zonas ecoturísticas causará un impacto social, económico y ambiental en el estado de Chiapas debido a que concientizará a la población el uso de energías limpias y sustentables y promueve la conservación del medio ambiente y de las riquezas naturales del estado. (Chiapas, 2020)

Adicionalmente, el desarrollo de este proyecto es una alternativa para solucionar el problema ambiental presente hoy en día, ya que promueve la transición energética y el desarrollo sostenible. Las estufas solares, al ser un dispositivo para la cocción de alimentos que no necesita nada más que la energía proveniente del Sol, atienden a varios de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible mostrados en la Imagen 1 establecido por la ONU (Organización de las Naciones Unidas) como lo es: Hambre cero, Energía asequible y no contaminante, Industria, innovación e infraestructura, Acción por el clima y vida de ecosistemas terrestres (ONU, 2023).



Imagen 1. Objetivos del desarrollo sostenible dictado por la Organización de las naciones unidas (ONU, 2023).

La radiación solar en México es un recurso abundante y diverso debido a su extenso territorio y su variada geografía. La radiación solar se refiere a la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre en forma de radiación electromagnética, principalmente en forma de luz visible y radiación infrarroja. México experimenta una amplia gama de condiciones de radiación solar debido a su ubicación geográfica y su topografía variada, como se observa en la Imagen 2.

México es uno de los países con mayor irradiación solar en el mundo con 11 horas en invierno y de casi 13 horas en verano, dándonos una idea de las condiciones de habitabilidad de viviendas y edificios a lo largo del territorio nacional. Es importante mencionar que la cantidad de radiación solar depende de la elevación del terreno sobre el nivel del mar, el cual aumenta un 6% por cada 300 m de elevación.

En la Imagen 2 se ilustra la abundante radiación solar presente en México que ha impulsado el uso de sistemas de energía solar para la generación de electricidad, calentamiento de agua y otras aplicaciones. Muchas viviendas, empresas e industrias han adoptado sistemas fotovoltaicos, estufas y calentadores solares para aprovechar esta fuente de energía renovable y reducir su dependencia de los combustibles fósiles (Amevec, 2022).



Imagen 2. Radiación solar en México (Global Solar Atlas, 2023).

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, ubicada en Chiapas, México, posee un recurso solar abundante debido a su ubicación tropical y clima cálido. Esta región experimenta una radiación directa significativa, como se presenta en la Imagen 3, superando los 100 kWh/m^2 en la mayoría de los meses soleados que favorece la implementación de sistemas solares en esta zona. La duración diaria prolongada de la radiación solar ofrece una base sólida para proyectos a gran y pequeña escala. La topografía mayormente plana simplifica la instalación y el mantenimiento de paneles solares, mientras que la disponibilidad de terrenos adecuados impulsa el potencial de generación solar. Estas condiciones favorecen el desarrollo de energía limpia y renovable, promoviendo la sostenibilidad local (Global Solar Atlas, 2023).



Imagen 3. Radiación promedio mensual en el estado de Chiapas. (Global Solar Atlas, 2023)

1.6. Metas

- Implementación de tecnologías termo solar en sectores ecoturísticos locales y su aplicación en la transición energética del país, con el fin de promover el desarrollo sostenible en la región.
- Concientizar a la población en el uso de tecnologías solares para la cocción de alimentos para minimizar daño al medio ambiente y a la salud.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se describirán detalladamente cada tema relacionado al proyecto para poder comprender de mejor manera el funcionamiento y en base a qué principios se logró realizar.

2.1. Energía solar o recurso solar

La energía solar es la energía renovable proveniente del Sol en forma de radiación electromagnética. El Sol es una esfera de plasma que sostiene y da vida a la Tierra, de manera inagotable e ininterrumpida, que tiene en su composición un 75% de hidrógeno, 24% de helio y 1% de oxígeno, nitrógeno, carbón, silicio, magnesio y calcio, aunado a una emisión de energía de 3.8×10^{26} watts (Wells N., 2012). Como se observa en la Imagen 4(a), el Sol está compuesto por cuatro partes: el núcleo, la fotosfera y las 2 capas de su atmósfera (cromosfera y corona).

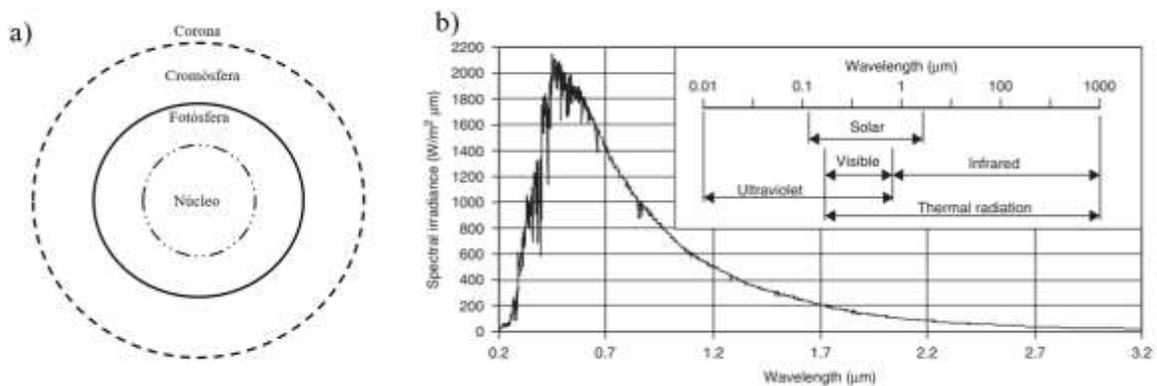


Imagen 4. Estructura del Sol y espectro electromagnético. (Kalogirou S., 2014).

En el núcleo solar ocurren reacciones nucleares que provocan la generación de energía de esta esfera de plasma. En seguida, se encuentra la fotosfera que es la capa externa brillante que emite la mayor parte de la radiación, conformado por una zona de gases ardientes de aproximadamente 300 km de grosor, la cual está compuesta de 90% de hidrógeno y 10% de helio. Posteriormente tenemos la cromósfera que es la capa que emite luz roja y violeta, ubicada encima de la fotosfera. Abarca unos 2,000 km y se observa durante los eclipses solares totales, revelando espectaculares protuberancias y bucles. Y finalmente se tiene la corona solar que consiste en una capa delgada de gases incandescentes que alcanza una temperatura aproximada de 10,000° K. dentro de esta capa se encuentran protones y electrones que escapan en forma de corriente conocida como viento solar.

El espectro electromagnético de la radiación solar abarca desde el rango del ultravioleta (UV), luz visible (Vis), hasta el cercano infrarrojo (IR); cada una con longitudes de onda

características como se puede observar en la Imagen 4(b). La región del UV comprende de 200 nm hasta 379 nm con una contribución del 6.4% de la radiación total del Sol, el rango del Vis se encuentra de 380 nm a 780 nm con un 48% de radiación y finalmente la radiación IR que va del 781 nm a 2500 nm contribuye con un 45.6%.

El potencial energético del Sol que incide sobre la Tierra puede aprovecharse para generar energía eléctrica o térmica. El desarrollo de sistemas fotovoltaicos y sistemas fototérmicos de baja y media temperatura son las tecnologías claves para el aprovechamiento de dicho potencial. Los sistemas fotovoltaicos convierten la energía solar en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas, y por otra parte los sistemas térmico solares transforman la energía solar en calor.

Algunos elementos importantes para el desarrollo de tecnología solar son (Jaramillo O. et al., 2023).

- La energía solar permite independencia energética al evitar el uso de combustibles fósiles.
- La tecnología solar fotovoltaica y fototérmica no tienen una alta complejidad en su manejo y su implementación.
- El uso de la energía solar promueve la conservación del medio ambiente, ya que evita la emisión gases de efecto invernadero y no produce residuos peligrosos.
- A un largo plazo, la energía solar es mucho más económica que la energía convencional, debido a su ahorro en la compra de combustibles fósiles.
- La energía solar puede proveer de electricidad o energía térmica en lugares aislados.

2.2. Energía solar térmica

Un sistema solar térmico es capaz de aprovechar la radiación solar en energía térmica o energía calorífica. Esta energía se puede usar para entre otras cosas para calentar agua o cualquier otro fluido (Navntoft C. y Cristóbal M., 2019).

Algunas de las ventajas del uso de la energía solar térmica son:

- Es gratuita y proviene de una fuente abundante de energía.

- Estos sistemas en comparación con los demás sistemas generadores de energía de fuente renovables tienen un rendimiento de conversión energética de radiación disponible a energía útil del 50%, siendo uno de los factores de conversión más altos entre las demás.
- No genera emisiones de gases de efecto invernadero.

Otras aplicaciones dependiendo de la necesidad que se buscar solventar, son:

- Dispositivos térmicos solares para la conservación de alimentos como las cocinas y secadores solares.
- Las centrales solares de generación de energía eléctrica, que estas están destinadas únicamente a calentar fluidos los cuales al convertirse en vapor este accione alabes de alguna turbina para así poder conseguir la energía eléctrica (Unida, 2023).

2.3. Tipos de radiación solar

La energía solar incide en la superficie de la Tierra en tres formas diferentes. La radiación directa es la proveniente del Sol que llega de manera libre hasta la superficie de la Tierra, sin sufrir dispersión o absorción. La radiación difusa es la recibida en la superficie terrestre después de que su dirección ha sido cambiada por la dispersión de la atmosfera. En los días más soleados, sin tener presente nubosidades, este tipo de radiación representa un 15% de radiación total. Por último, se tiene la radiación total que es la contribución de la radiación directa y la difusa sobre alguna superficie (Efihabitat, 2017).

2.4. Geometría solar

Para el diseño de un sistema solar térmico es importante conocer los recorridos aparentes del sol en el cielo y de su localización en distintas fechas y horas. Existen diversos temas que ayudan a describir las cualidades y comportamientos del sol con respecto a la tierra, como lo es la altura solar, declinación solar y ángulo horario (Tejada A. y Gómez G.,2015).

Se denomina altura solar al ángulo formado por el rayo solar y el plano horizontal del sitio (ver Imagen 5). También es conocida como elevación solar. Este ángulo varía desde 0° cuando el Sol está en el horizonte, hasta los 90° cuando está en el cenit.

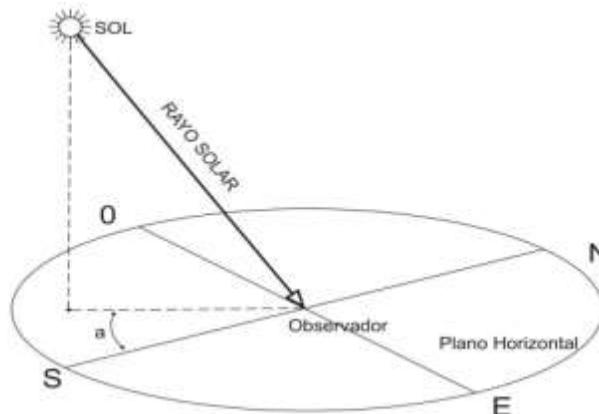


Imagen 5. Representación de la altura solar "h" (Tejada A. y Gómez G.,2015).

Como se ilustra en la Imagen 6(a) La trayectoria solar es la ruta aparente seguida por el Sol a lo largo del cielo diurno, influenciada por la rotación de la tierra. Este recorrido varía estacionalmente debido a la inclinación del eje terrestre, lo que produce cambios en la duración y la ubicación de la luz solar. La trayectoria solar impacta en la distribución de la radiación solar y tiene importancia en campos como la arquitectura, la agricultura y la energía renovable.

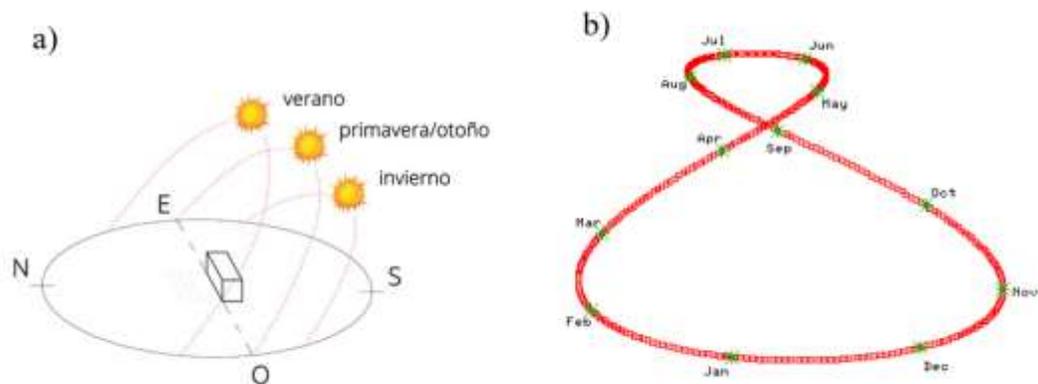


Imagen 6. Trayectoria solar (a) y analema solar (b) (Tejada A. y Gómez G.,2015).

El analema solar representado en la Imagen 6(b) indica la posición aparente del Sol en el cielo a la misma hora durante un año, cuando este es observado todos los días desde el mismo punto geográfico. Este fenómeno resulta de la combinación de la inclinación del eje terrestre y la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. La analema revela los cambios estacionales y la variación de la duración del día a lo largo del año (Arkialbura, 2021).

El ángulo horario (w) es formado por el rayo solar y el plano meridional del sitio, medido en el plano que contiene a la trayectoria solar (ver en la Imagen 7). Este ángulo es positivo si se encuentra ubicado en el lado oriente y es negativa si es hacia el poniente.

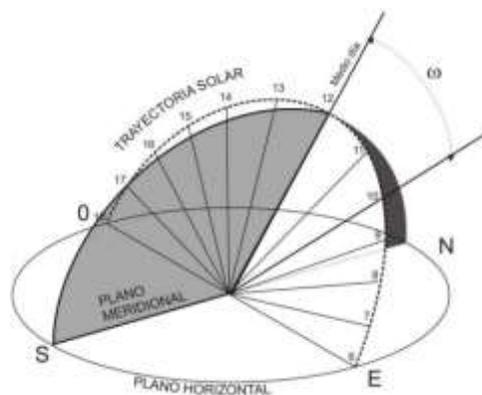


Imagen 7. Esquema representativo para cálculo de ángulo horario (Tejada A. y Gómez G.,2015).

En la Tabla 1 se presenta la hora equivalente a un ángulo horario de 15° . Esto se debe a que el periodo de rotación terrestre se describe en un arco de 180° de 12 horas.

Tabla 1. Relación entre hora y el ángulo horario.

Hora	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
w	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0	-15°	-30°	-45°	-60°	-75°	-90°

2.5. Fenómenos que afectan la trayectoria solar

El Sol es la fuente que provee más del 99.9% de la energía que la Tierra necesita para llevar a cabo los diferentes procesos que ocurren en el sistema tierra-atmósfera. Dicha energía o radiación solar se ve afectada al pasar por la atmósfera debido a factores que se encuentran en la trayectoria hacia la tierra, siendo algunos de estos el tamaño y la naturaleza de las

sustancias que interactúa con la radiación, así como las características de la superficie de la tierra en la que incide la radiación como suelos, océanos y también la atmosfera (IDEAM, 2023).

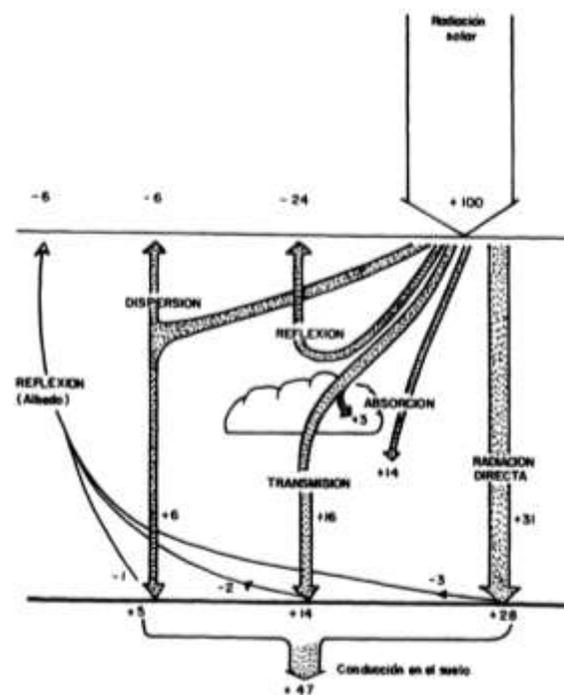


Imagen 8. Distribución de la radiación en la atmósfera (Heuveloop H. et al., 1986).

La Tierra recibe por radiación directa 31%, por transmisión 16%, por dispersión 6%, la atmósfera capta por absorción 17% por las nubes y partículas atmosféricas, por reflexión y dispersión a la atmósfera regresa el 30% de estas se devuelven por reflexión de la superficie terrestre 6%, como se observa en la Imagen 8. Una vez definido el cómo y qué factores intervienen en la trayectoria del Sol a la superficie terrestre se tiene como resultado un porcentaje de radiación regresada al exterior de 36%, un 47% recibido en la superficie terrestre y un 17% absorbido por los gases de la atmósfera.

2.5.1. Dispersión

La dispersión ocurre cuando la radiación proveniente del Sol es afectada por un obstáculo cambiando la dirección del recorrido de dicha radiación si fuese representada como un fotón. De otro modo viendo ahora como si la radiación fuese longitud de onda dependiendo del

medio con que tenga contacto será menor o mayor la dispersión. El 12% de la radiación solar ubicada en la en la atmosfera es dispersada; de dicha cantidad el 6% se le atribuye a la que se escapa hacia el espacio y el restante 6% llega a la superficie terrestre.

Los gases que hay en la atmosfera dispersan las longitudes de onda cortas (violeta y azul) mientras que las ondas más largas logran atravesarlas, esto explica el color azul del cielo y los colores rojo, naranja del amanecer y atardecer.

2.5.2. Reflexión

La reflexión representa un cambio de dirección de los rayos sin que exista una penetración o cambio cualitativo ni cuantitativo de la radiación, burdamente se puede decir que es justo la misma radiación siendo redirigida. Aproximadamente el 40% de la radiación proveniente del Sol que incide sobre la atmosfera es reflejada por las nubes regresándola a el exterior, lógicamente esto dependiendo del grado de nubosidad que exista.

2.5.3. Transmisión

La transmisión se define como el paso de la radicación a través de una sustancia viéndose este afectado en sus propiedades cualitativas y cuantitativas, ya que dependiendo su composición química permitirá el paso de una parte del total de la radiación.

2.5.4. Absorción por moléculas de gases

La absorción es la parte de la radiación captada o capturada por una sustancia, la cual no puede ser transmitida y por ende se trasforma en otro tipo de energía (calor). Los elementos que componen la atmosfera tienen una absorción selectiva de longitudes de onda, como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Absorción diferencial de energía por los componentes de la atmosfera.

Sustancia	Longitudes de onda absorbidas
Dióxido de Carbono (CO₂)	13,1µm - 16,9µm (infrarrojo)
Vapor de agua (H₂O)	5,3µm - 7,7µm (infrarrojo)
Nubes (agua condensada)	Mayores de 3µm
Ozono (O₃)	0,2µm - 0,36µm (ultravioleta)
Oxígeno (O₂) Y Óxido de Nitrógeno(NO)	0,12µm - 0,18µm (rayos x, Y, y ultravioleta)

En la atmosfera a la sustancia que más se le atribuye la absorción de radiación es al vapor de agua (Heuveloop H., et al., 1986).

2.6. Estufas solares

Una estufa solar es un sistema térmico que transforma la radiación solar en energía térmica o calorífica suficiente para calentar o cocinar alimentos. Algunos diseños requieren de sistema de posicionamiento constante orientado hacia el Sol para un mejor rendimiento. De acuerdo con la geometría del captador de la radiación solar, la estufa se puede clasificar en tipo caja, de concentradores y de colectores de placa plana. Las estufas solares se componen de reflectores para concentrar la luz solar, recipientes para colocar los alimentos, aislamiento para retener el calor, aperturas de ventilación para controlar la temperatura y un sistema de seguimiento solar.

2.6.1. Tipo caja

Este tipo de estufa está diseñado para concentrar la radiación solar dentro de una caja, como se observa en la Imagen 9, en donde se colocan los alimentos que se desean cocinar. A su vez, estas estufas se dividen en 2 tipos: con reflectores externos y con reflectores internos mostrados en la Imagen 9(a) e imagen 9(b), respectivamente, que pueden ser reflectores con geometría plana o cóncavos. Estos diseños se caracterizan por alcanzar temperaturas aproximadas de 100 °C y tienen la cualidad de funcionar correctamente con poca intervención del usuario lo que lo convierte en un artefacto seguro, sin riesgo de fuego o quemaduras. Esta estufa tiene la desventaja en sus dimensiones, ya que estas tienden a ser grandes de tal manera que entren recipientes donde se pueda cocer la comida

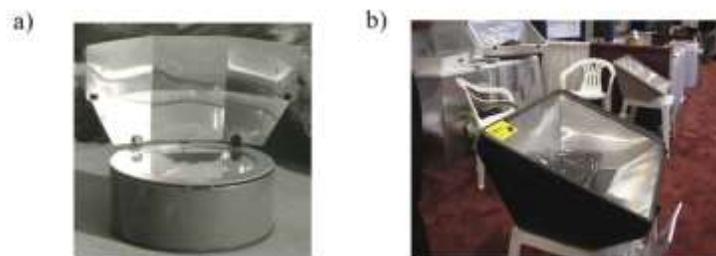


Imagen 9. Ejemplo de estufas solares tipo caja (Terrés H., 2002).

2.6.2. Tipo concentradoras

El diseño de este tipo de estufas consiste en un concentrador hecho de un material con alta reflectividad en forma circular, que permite que los rayos del Sol converjan en un solo lugar, llamado punto focal como se observa en la Imagen 10. Toda la energía solar captada es focalizada en un solo punto y se aprovecha para colocar en esa ubicación un recipiente que lo transforma en energía térmica. Pueden alcanzar temperaturas altas de hasta 121 °C en poco tiempo, lo que permite realizar cocciones que demanden más temperatura como los estofados (alimentos cocinados por el hervor del agua).

Una desventaja significativa de estas estufas es que necesitan la radiación directa, es decir requieren de redireccionar constantemente la estufa en la dirección del Sol. De no hacerlo, se corre el riesgo de que los alimentos se enfríen o no se logren cocinar correctamente.

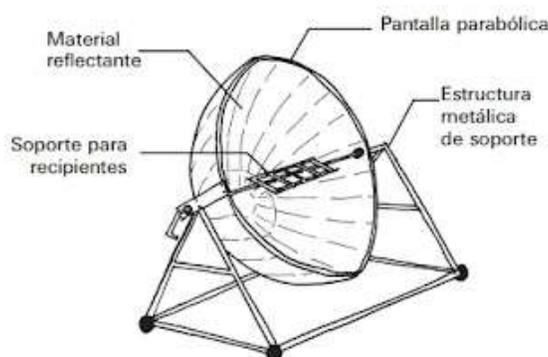


Imagen 10. Representación de estufa solar de concentración (Berros L. et al, 2017).

2.6.3. De colectores de placa plana

Este tipo de estufas utilizan un concentrador de la radiación solar, pero la geometría del colector es la de una placa plana que operan calentando aceite, aire o agua como agentes intercambiadores de calor (ver imagen 11). Este tipo de colectores están hechos con tuberías de cobre y materiales que puedan estar a la intemperie y no se dañen considerablemente. Un inconveniente de este diseño es que el sistema completo de la estufa presenta un gran tamaño, ya que la superficie de los concentradores es grande, aproximadamente de 80 cm a 120 cm de ancho y 150 cm a 200 cm de alto por colector (Sopelia, 2017). Sin embargo, tiene a su favor que no presenta reflexiones de rayos solares que puede provocar deslumbramiento al

usuario, además pueden trabajar en días nublados, no necesitan reorientación, puede mantener el calor por largos periodos de tiempo, y no presenta riesgos de fuego o quemaduras (Terrés H., 2002).



Imagen 11. Representación de estufa con colectores de placa plana. (Terrés H., 2002)

2.7. Concentradores de energía solar

Uno de los elementos importantes de la estufa solar es el concentrador que aprovechará la radiación solar incidente directa en cielo despejado y radiación difusa en cielo nublado. Dependiendo del diseño del concentrador, la energía captada puede ser enfocada o dirigida en un punto o región, o bien captada y absorbida para generar un acumulador térmico.

2.7.1. Canales parabólicos

En este tipo de concentradores se utilizan espejos reflectores en forma cilindro-parabólicos para concentrar la luz solar en tubos receptores térmicamente eficientes ubicados en la línea focal de la parábola (Imagen 12). Normalmente estos canales se diseñan para seguir el Sol en un solo eje norte-sur. Por los tubos receptores circula un fluido de transferencia térmica, como aceite térmico sintético, en donde el fluido se calienta a unos 400°C. Este fluido es bombeado por una serie de intercambiadores térmicos para producir vapor supercalentado, el cual se convierte en energía eléctrica en un generador de turbinas de vapor convencional.

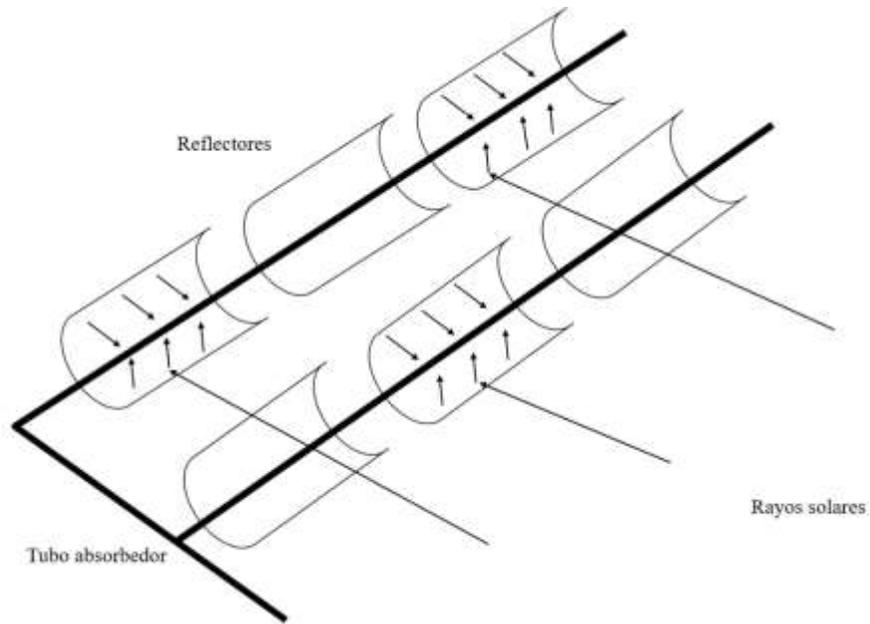


Imagen 12. Ejemplo de sistema de canales parabólicos.

2.7.2. Sistemas de concentradores lineales de Fresnel (LFR)

Se le llama así al conjunto de reflectores casi planos que comúnmente son espejos de vidrio que concentran la radiación solar en receptores lineales invertidos elevados, como se observa en la Imagen 13. A través de este concentrador fluye agua que por la energía captada se convierte en vapor el cual se usa en plantas de generación térmicas convencionales.

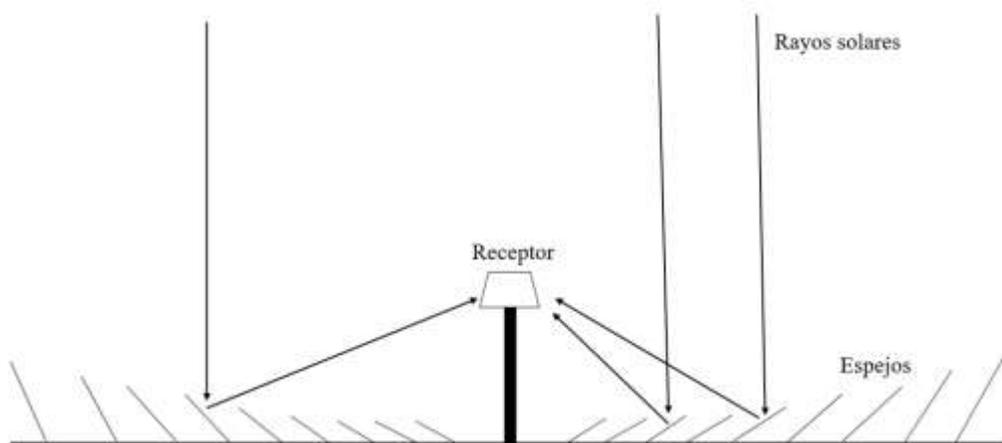


Imagen 13. Ejemplo de concentradores lineales de Fresnel.

2.7.3. Sistemas de receptor central o torre central

Este sistema está conformado por un conjunto de heliostatos que distribuyen en forma circular, los cuales concentran la luz solar en un receptor central montado sobre una torre (Imagen 14). Un heliostato es un artefacto integrado por un espejo plano o ligeramente cóncavos que gira con la intención de reflejar continuamente la luz del Sol hacia una dirección específica. Gracias a un medio de transferencia térmica en el receptor central, la radiación altamente concentrada en ella es absorbida y la convierte en energía térmica que es utilizada para generar vapor supercalentado para una turbina de generación convencional de energía eléctrica. Los medios de transferencia térmica, que normalmente son fluidos, podrían ser agua/vapor, sales fundidas y aire.

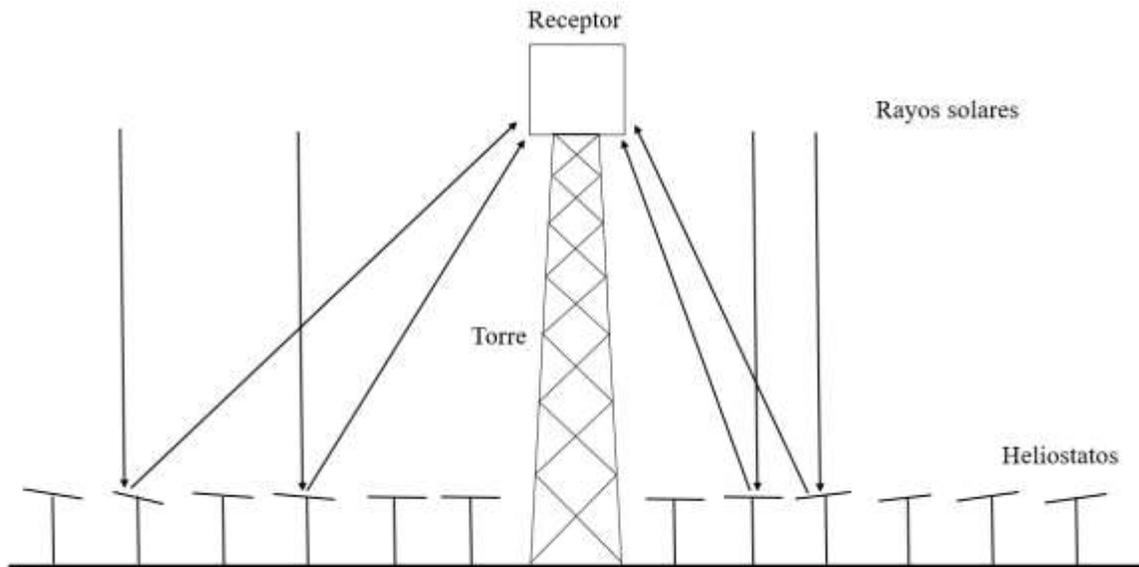


Imagen 14. Ejemplo de sistema de receptor central o torre central.

2.7.4. Sistemas de disco parabólico

Este sistema consiste en un reflector parabólico en forma de disco, el cual concentra los rayos solares en un receptor situado en el punto focal del disco (Imagen 15).

Normalmente estos sistemas son utilizados para calentar algún fluido o gas aproximadamente a 750 °C con el objetivo de generar electricidad en un pequeño pistón, motor Stirling o una microturbina conectada al receptor (Richter C., Teske S. y Short R.,2009).

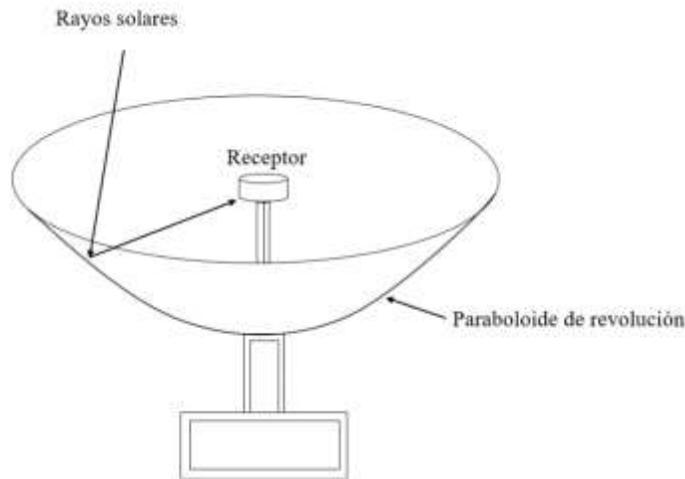


Imagen 15. Ejemplo de sistema de disco parabólico.

2.8. Propiedades ópticas de los materiales

Al diseñar y construir un concentrador solar es de interés conocer las propiedades ópticas de los materiales a utilizar, con la intención de optimizar la captación de la energía solar. Cuando los rayos del Sol interactúan con un material se puede presentar tres fenómenos ópticos: la reflectancia, transmitancia y absorbancia, como ilustra en la Imagen 16. Estos conceptos son fundamentales en la óptica y la espectroscopia que se utilizan para describir cómo interactúa la luz con diferentes materiales. Cada uno de estos términos proporciona información sobre cómo la luz incidente interactúa con un objeto o sustancia en particular.

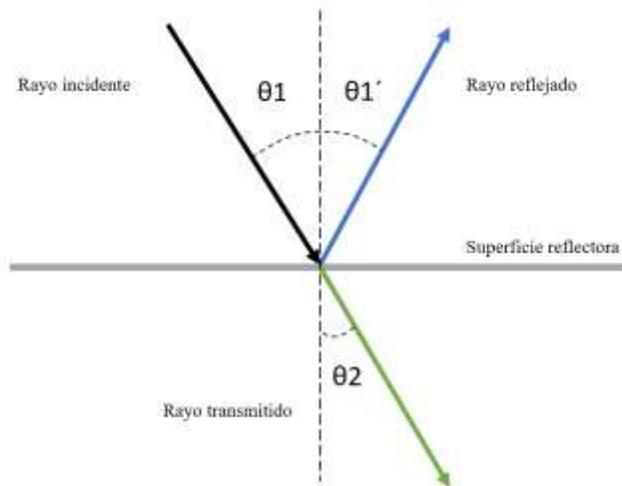


Imagen 16. Representación de las propiedades ópticas de los materiales.

La reflectancia es una medida de la cantidad de luz que se refleja desde la superficie de un objeto o sustancia. Se expresa generalmente como un valor porcentual y varía de 0% (ninguna luz reflejada, absorción total) a 100% (toda la luz incidente se refleja, ninguna absorción). La reflectancia depende de las propiedades ópticas del material y de la longitud de onda de la luz incidente. Los materiales que parecen brillantes y tienen superficies reflectantes altas, como un espejo, tienen una reflectancia cercana al 100%, mientras que los materiales oscuros o mates tienden a tener reflectancias más bajas (Ingenierizando, 2023).

Normalmente los materiales utilizados para construir espejos no son reflectores ideales. Esto conlleva a que las imperfecciones a nivel microscópico provoquen una pérdida de la calidad especular y por consecuencia disminuya el rendimiento del concentrador.

La transmitancia describe la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo transparente u opaco, la cual depende de la longitud de onda incidente. En la imagen 16 se ilustra cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslucido, una parte de esa luz es absorbida por el mismo y otra parte atraviesa el cuerpo, según su capacidad de transmitancia. La transmitancia de un material se representa en porcentaje (%).

Algunos captadores solares tienen en su cubierta una placa de vidrio, normalmente llamado Borosilicato 3.3. Este material presenta una transmitancia constante, alrededor de 90%, a

cualquier longitud de onda de la radiación solar, por lo que lo hace útil para esta aplicación en donde se busca captar la mayor radiación (Schott, 2023).

La absorbancia se refiere a la cantidad de luz absorbida por el material. Cuando la intensidad de la luz incidente y la transmitida son iguales, la transmitancia de ese material es del 100% e indica que la muestra no absorbe la longitud de onda que se le está incidiendo.

Un material que se caracterice por tener una alta absorbancia de la energía solar sería un potencial candidato para fabricar captadores solares. Sin embargo, es importante conocer la capacidad que tiene este material para no emitir de nuevo esa energía absorbida. Por tanto, el material debe comportarse como un cuerpo negro en las longitudes de onda contenidas del espectro solar (visible). Los materiales que tienen esta propiedad se le conoce como materiales selectivos y normalmente se usan para fabricar los absorbedores que están colocados en algunos captadores (Saiz S., 2015). Existe equipos ópticos que puede medir estos parámetros, uno de ellos es el espectrofotómetro que mide en el rango del espectro electromagnético desde el ultravioleta hasta el infrarrojo.

2.9. Formación de imágenes en espejos

La formación de imágenes en espejos se refiere al proceso mediante el cual un espejo refleja la luz incidente para crear una representación virtual de los objetos. Los espejos planos producen imágenes que son una representación lateralmente invertida y de tamaño igual a la del objeto real, pero la distancia aparente puede variar. Los espejos cóncavos pueden formar imágenes reales o virtuales, dependiendo de la distancia del objeto al espejo, y los espejos convexos siempre crean imágenes virtuales y más pequeñas. Este fenómeno es fundamental en óptica y aplicaciones cotidianas, como espejos retrovisores y espejos de tocador

2.9.1. Leyes de reflexión

La reflexión de la luz ocurre cuando un conjunto de rayos incide sobre una superficie y rebotan cambiando su dirección, como se observa en la Imagen 17. Este fenómeno está descrito por dos leyes que se mencionan a continuación:

- Cuando un haz de luz es reflejado por una superficie, el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal de la superficie del punto de incidencia se encuentran en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia (θ_i) y el ángulo de reflexión (θ_r) son iguales.

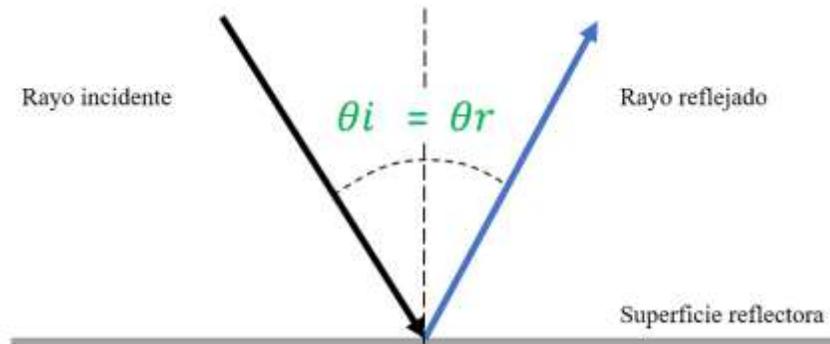


Imagen 17. Representación de las leyes de reflexión.

2.9.2. Reflexión especular y difusa

Cuando un haz de rayos paralelos incidentes es reflejado por un espejo plano y continúan siendo paralelos únicamente variando su dirección de propagación se dice que ha ocurrido una reflexión especular (Imagen 18).

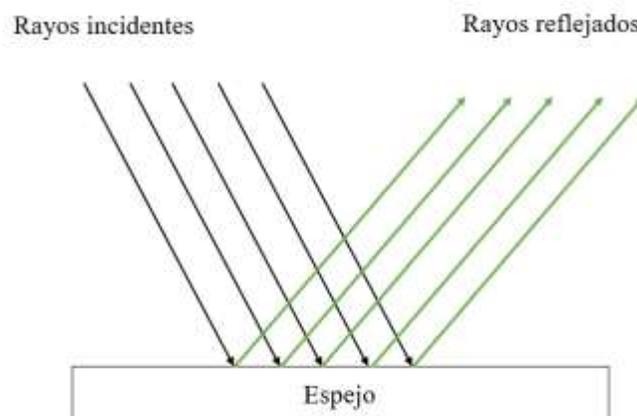


Imagen 18. Representación de reflexión especular.

Por otro lado, cuando la reflexión se representa por un haz de rayos paralelos incidentes que, al ser reflejadas por un objeto, estos rayos son propagados en todas direcciones debido a que la superficie reflectora del objeto es rugosa y no uniforme, como se ilustra en la Imagen 19.

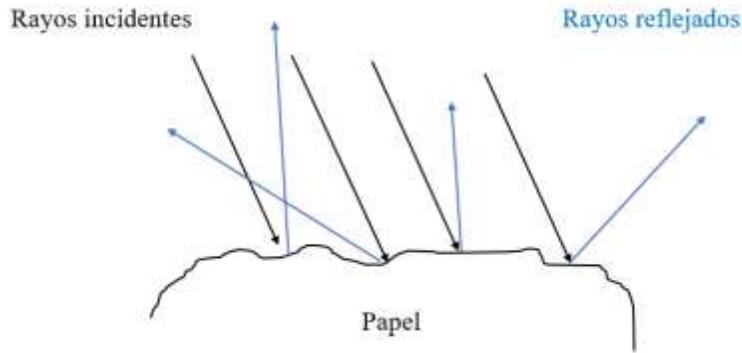


Imagen 19. Representación de reflexión difusa.

2.10. Función matemática parabólica

Debido a que la geometría del concentrador de radiación solar de este trabajo de tesis se trata de una superficie con perfil parabólico, como se aprecia en la Imagen 20(a); en este apartado se describe la función matemática de una parábola que corresponde al corte transversal de la superficie del concentrador como se observa en la Imagen 20(b).

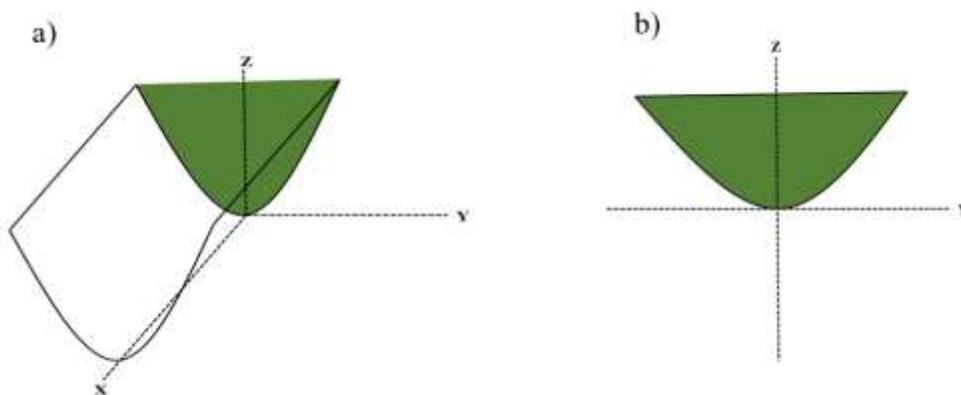


Imagen 20. Representación geométrica en 3D (a) y el corte trasversal de una superficie cilíndrica parabólica.

La representación matemática de una parábola orientada en forma vertical, con su eje focal en el eje y y su vértice en el punto (h, k) , esta descrita por la Ec.1 (Lehmann, 1980).

$$(x - h)^2 = 4a(y - k) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde a es la distancia desde el vértice hasta el foco.

2.11. Fórmula de cálculo de la longitud de arco por la notación de Leibniz

Después de definir la ecuación que representa cada punto de una parábola, es necesario formular el cálculo de la longitud de arco de la parábola mediante la notación de Leibniz (Stewart J., 2008). Esta notación aproxima la longitud (L) de una curva definida por una función $y = f(x)$ continua en el intervalo $[a, b]$ y esta descrita por la Ec.2.

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$L =$ Longitud resultante.

$\frac{dy}{dx} =$ Derivada de la función de la curva.

2.12. SolTrace: Herramienta para el modelado óptico

Es una herramienta desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés) para el modelado de sistemas ópticos de concentración de energía solar y también permite analizar su rendimiento óptico.

SolTrace es un software especializado ampliamente reconocido en el campo de la energía y la concentración solar, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). El propósito fundamental de este software es diseñar y analizar sistemas de seguimiento solar y concentrador, como son los colectores cilindro parabólico, sistemas lineales de lentes Fresnel, geometría de torre central y sistemas ópticos de enfoque puntual.

Esta herramienta permite a ingenieros y científicos simular y optimizar el rendimiento de sistemas de energía solar de alta concentración (NREL, 2023).

SolTrace es una herramienta esencial para aquellos que trabajan en la creación y mejora de sistemas de energía solar de concentración, como las plantas solares termoeléctricas y los sistemas de concentración fotovoltaica. Su funcionalidad se extiende desde la etapa inicial de diseño hasta la evaluación detallada del rendimiento.

Este software permite modelar con precisión la trayectoria del Sol y cómo los rayos solares se enfocan en un receptor o sistema de captación, lo que es crucial para maximizar la eficiencia de la conversión de energía solar en electricidad o calor. Los usuarios pueden ajustar parámetros como la geometría del reflector, la ubicación geográfica y la hora del día para obtener un diseño óptimo y evaluar el rendimiento energético esperado.

En resumen, SolTrace es una herramienta valiosa para diseñar, optimizar y analizar sistemas de concentración solar, contribuyendo al desarrollo y despliegue efectivo de tecnologías de energía solar avanzada y sostenible, y promoviendo la transición hacia fuentes de energía más limpias y eficientes.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE LA ESTUFA

En este capítulo se demostrará la metodología utilizada para cada subproceso realizado, para que en conjunto se llegue al prototipo realizado.

En este capítulo se expone la metodología empleada para el diseño y construcción del prototipo de la estufa solar. Primero, se establecen las ecuaciones que determinan la longitud de la parábola en función de la distancia focal. Luego, se describe el software y los pasos para obtener la simulación de la propagación de rayos en la estufa solar. Por último, se muestra el proceso de manufactura de dos concentradores solares, el primero en forma de un semicilindro y el segundo en forma cilíndrico parabólico.

3.1. Cálculos para elaboración de concentrador solar

El primer paso consistió en realizar los cálculos necesarios para definir las dimensiones del concentrador de rayos solares. La geometría seleccionada para el captador de esta estufa solar es la de forma cilíndrica parabólica mostrada en la Imagen 20(a). Para el diseño del concentrador se consideró el análisis geométrico de una parábola representada en los ejes cartesianos(X, Y).

Una curva parabólica es un lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo llamado foco. Posee principalmente 2 elementos primordiales que ayudaran al entendimiento del proceso de diseño, uno es la distancia focal (a) y el lado recto representada por $4a$ que representa 4 veces la distancia focal de la parábola, como se observa en la Imagen 21.

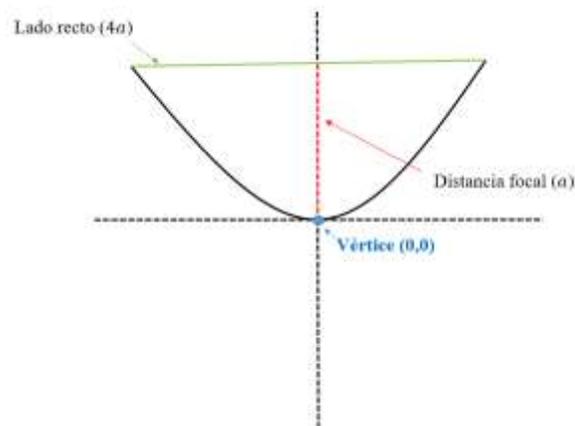


Imagen 21. Representación de la curva parabólica utilizada para el desarrollo del prototipo.

Partiendo de la Ec.1, para el caso particular en donde la parábola tiene su vértice en el origen (0,0), esta ecuación se puede reescribir por la Ec.3.

$$y = \frac{x^2}{4a} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para conocer la representación gráfica del concentrador parabólico basta con evaluar la Ec.3 mediante la sustitución de valores para x y un valor constante para a . Dependiendo de los parámetros elegidos se obtendrá una parábola con la capacidad de reflejar la mayor parte de los rayos solares incidentes en el punto focal.

Ahora es necesario encontrar el punto máximo en donde convergerán los valores tanto del eje x como del eje y . Para esto se obtuvo la derivada de la función de una parábola definida por la Ec.4.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{x^2}{4a} \right) = \frac{x}{2a} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para delimitar la longitud de la curva parabólica (L) se utilizó la formula general de longitud de arco de una curva representada por la Ec.2. Sustituyendo la función representativa de la parábola Ec.4 y considerando los límites de integración desde $x = 0$ hasta $x = 2a$, que representa la mitad de la longitud total del concentrador, se obtuvo la Ec.5. Es importante mencionar que la longitud total es dos veces el valor de L .

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_0^{2a} \frac{1}{2a} + \sqrt{4a^2 + x^2} dx \quad \text{Ecuación 5}$$

Al resolver la integral de la Ec. 5, se obtiene la representación matemática (Ec. 6) que ayudará a determinar la longitud de una curva en función del valor de a , que es la distancia focal deseada. La resolución de la Ec.5 paso a paso se describe en el apartado 6.5.

$$L = a(\sqrt{2} + \ln(2a(1 + \sqrt{2}))) - \ln(2a) \quad \text{Ecuación 6}$$

Teniendo la Ec.6 se puede determinar el valor de a conociendo el valor de la longitud de la superficie parabólica (L). La gráfica de dicha superficie se realizó en una hoja de cálculo de Excel, debido a la simplicidad de este software para evaluar la función y realizar los cálculos con mayor facilidad y rapidez. Los parámetros iniciales para el cálculo fue establecer las

dimensiones de largo y ancho de la hoja de lámina reflejante. En este caso, el largo de la superficie está limitada por la longitud del tubo al vacío que es de 180 cm. El valor del ancho de la lámina corresponde a la longitud total de la superficie parabólica que es de 56 cm.

Después de introducir la Ec.6 en una hoja de cálculo y establecer el valor de $L = 28\text{cm}$, se determinó el valor de a que corresponde a la distancia focal de la parábola que se desea representar.

En este caso, se desconoce el valor de entrada de a que satisfaga la Ec.6 para converger al valor de L . Haciendo uso de la función “buscar objetivo” en Excel, la cual es una herramienta para encontrar el resultado que se desea ajustando un valor de entrada, se obtuvo el valor más próximo de a . Por último, para conocer la longitud total (L_t) de la superficie únicamente se debe multiplicar dos veces el valor de L .

Para obtener la gráfica de la parábola, se evaluó la función de la parábola de la Ec.3 sustituyendo el valor encontrado de a para diferentes valores de x de -20 hasta 20. La gráfica obtenida es útil para elaborar una plantilla en papel que sirva para moldear la solera que sostiene a la lámina reflejante.

3.2. Simulación de propagación de la radiación solar usando SolTrace

Cómo se mencionó en la sección 2.12, el software SolTrace es utilizado para modelar la propagación de la radiación solar al incidir sobre una superficie reflectora. El primer paso fue elegir las condiciones de iluminación solar, para ello se modifican los parámetros de la posición del Sol (Sun position) en la pestaña SUN, mostrado en la parte superior izquierda de la Imagen 22. Se seleccionó la opción de coordenadas globales (global coordinates) para establecer valores ideales que generalmente están preestablecidos de manera automática. En caso de requerir otro punto o lugar en específico se debe cambiar la posición de iluminación por el modo de latitud, día y hora.

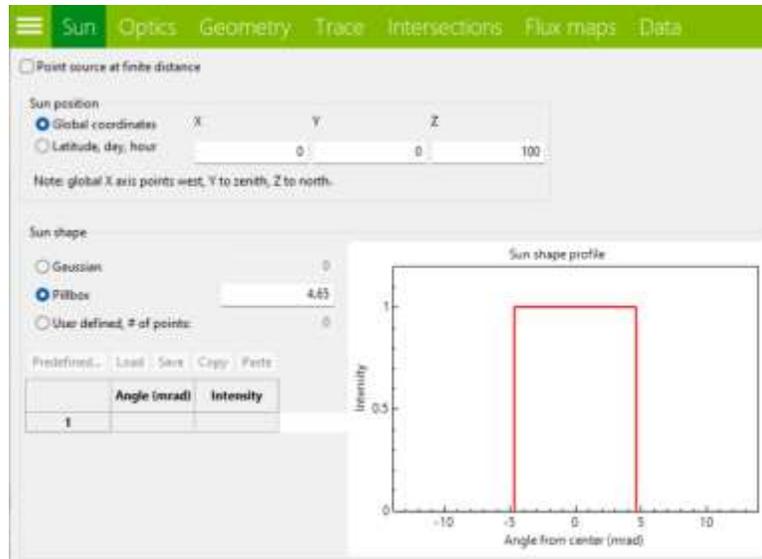


Imagen 22. Apartado SUN de software SolTrace.

En seguida, se establecieron las propiedades ópticas de la superficie reflejante en la pestaña de OPTICS como se puede ver en la Imagen 23. Por fines prácticos se dejaron los valores que arroja el programa automáticamente para los parámetros de Reflectividad. En este apartado se agregaron las dos partes con su material correspondiente, tanto a la del concentrador y el otro al de receptor de rayos solares, que constituyen en conjunto la estufa solar desarrollada.

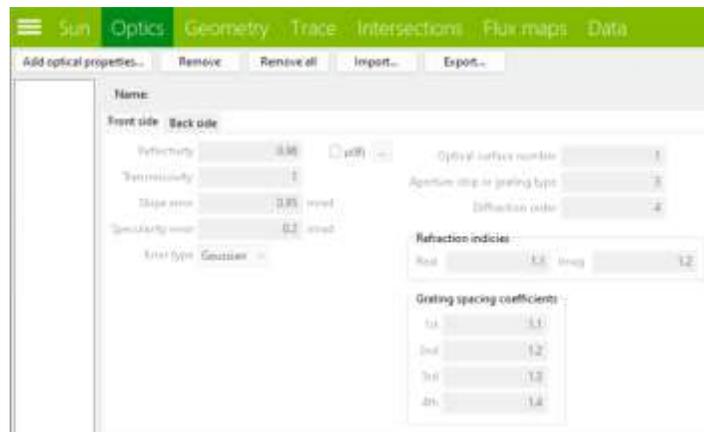


Imagen 23. Apartado OPTICS de software SolTrace.

En la pestaña de GEOMETRY (Imagen 24), se definió la geometría de cada sección que se representarán en el simulador. En el caso del concentrador, en la opción de Apertura se seleccionó la opción de Single Axis Curvature Section por su forma geométrica. En seguida

en el apartado de “L” se anotó dimensiones del concentrador, el largo y ancho del material. Continuando con el diseño del concentrador, en la opción de Surface se estableció la forma de la superficie a parabólica, en este caso para el valor de Cx se estableció el valor de $(c = 1/(2f))$ con la distancia focal calculada.

Ahora, para el diseño del receptor, que en este trabajo corresponde a un tubo al vacío, en la opción de Aperture se eligió de nuevo la opción Single Axis Curvature Section pero únicamente se le dio valor para L= 1.8. Para la parte de Surface se eligió la opción de Cylindrical, en donde únicamente se dio el valor resultante de 1/radio del tubo.



Imagen 24. Apartado GEOMETRY del software SolTrace.

Para comenzar la simulación de trazos de rayos como se puede apreciar en la Imagen 25(a) se elige en la pestaña de TRACE la opción Start ray trace, sin modificar los valores predeterminados que aparece en esa ventana. Posteriormente, en la pestaña de INTERSECTIONS (Imagen 25(b)) se anotó y habilitó en la casilla Plot paths for rays el rango de rayos deseados para que interactúen con la superficie, que va de 1 hasta n números (por fines prácticos se colocaron los siguientes valores de 1-200).

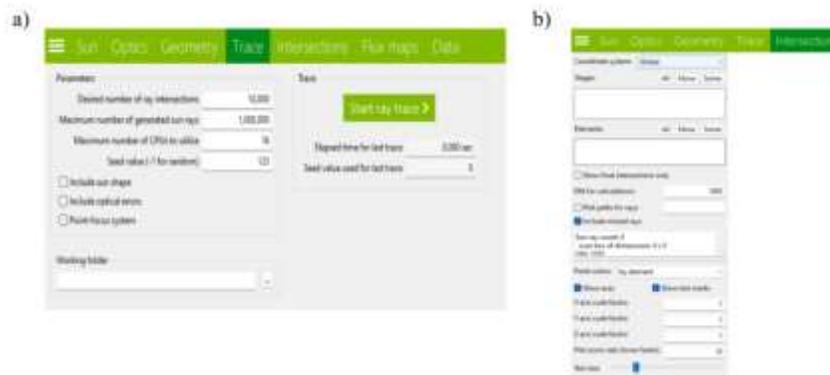


Imagen 25. Representación de apartados TRACE Y INTERSECTIONS del software SolTrace.

3.3. Proceso de fabricación de estufa solar

En la Imagen 25 se muestra los pasos realizados para la fabricación de la estufa solar que consta principalmente de 3 elementos: Concentrador solar, tubo absorbente y soportes metálicos. Es importante mencionar que se fabricaron dos estufas solares, el prototipo 1 tiene un concentrador en forma de un semicilindro y el prototipo 2 en forma cilíndrico parabólico.

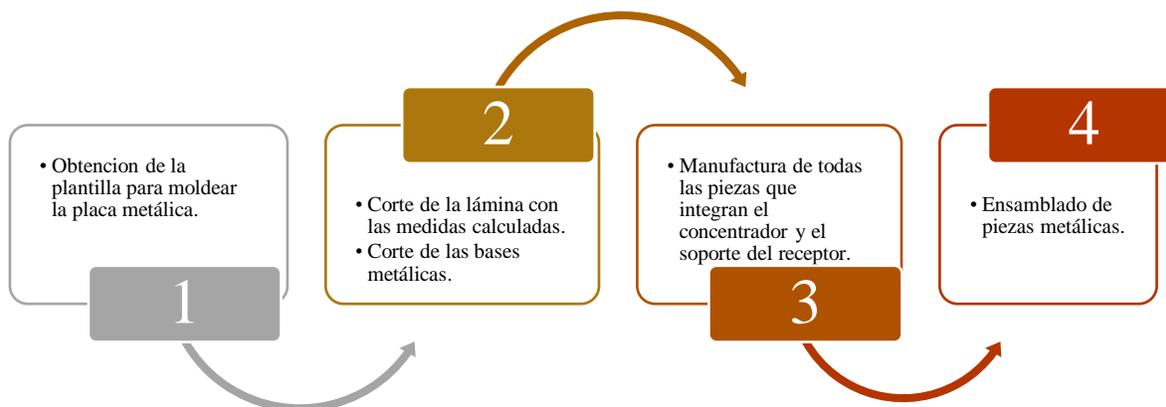


Imagen 26. Pasos de proceso de construcción.

Para la selección del material reflejante que fue utilizado en la fabricación del concentrador solar, se midió el espectro de reflectancia de diferentes materiales metálicos con un espectrofotómetro.

3.3.1. Construcción del concentrador semicilíndrico (prototipo 1)

El diseño del primer prototipo se basó en diseños anteriores en donde se utiliza un concentrador solar de canal compuesto por dos espejos, el primero con mayor diámetro en forma de semicilindro y el segundo más pequeño en forma cilíndrico parabólico (J.L, 1996).

El diseño frontal de esta estufa solar se muestra en la Imagen 27 (a) fue modelado en el software de diseño SolidWorks versión 2018. Para el concentrador solar (C1) se consideró una lámina de material altamente reflejante con dimensiones de 180 cm por 64 cm, moldeada

con forma de un semicilindro de longitud de 180 cm y de 50 cm de diámetro. La geometría elegida permitió que los rayos del sol que incidieran sobre esta superficie fueran reflejados en la línea focal ubicada en el radio del concentrador. El tubo colector absorbente (C2) es un tubo al vacío de baja presión, que típicamente se usa en un calentador solar de agua, compuesta por dos tubos de vidrio concéntricos de borosilicato 3.3 con un recubrimiento de alta absorción solar de hasta 90 % (Nitruro de aluminio, Nitrito de cobre) y un vacío de aislamiento térmico entre los tubos. Las dimensiones del tubo son 180 cm de largo, con un diámetro externo de 58 mm e interno de 47 mm. Por último, los soportes metálicos (B1) fueron considerados por tubulares de acero y soleras que fungen como los soportes del concentrador solar, así como para el tubo colector. La altura de las bases fue de 1 metro. La distancia a la cual fue posicionada el tubo absorbedor fue de 25 cm desde cualquier punto de la superficie, es decir al centro de semicírculo como se muestra en la Imagen 27.

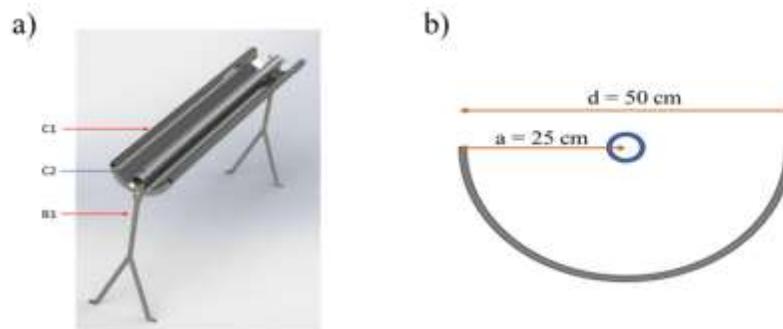


Imagen 27. (a) Diseño de estufa solar y (b) sección transversal del concentrador semicilíndrico (prototipo 1).

La construcción de la estufa solar se realizó en un taller de soldadura anónimo donde, con la ayuda de una inversora y elementos básicos de la herrería, se manufacturaron el concentrador y los soportes metálicos. Algunos detalles de la construcción se describen en la siguiente sección.

3.3.2. Construcción de concentrador cilíndrico parabólico (prototipo 2)

Para el caso del diseño del concentrador en forma cilíndrica parabólica se realizaron los cálculos descritos en la sección 3.1 para conocer las dimensiones geométricas de la parábola,

así como la ubicación de la distancia focal (a) en la que se colocará el tubo absorbedor. Al igual que en la estufa solar anterior, el largo de la lámina es de 180 cm, limitado por la longitud del tubo absorbedor. El ancho de la lámina es de $L_t = 56$ cm. Entonces al resolver la Ec.7 para un valor de $L = L_t/2 = 28$ cm, el valor de la distancia focal es de $a = 9.37$ cm.

Con el valor conocido de a se pudo evaluar la Ec.3, dando valores para x de -20 hasta 20. La tabulación de este resultado se muestra la Tabla 3. La representación gráfica de la parábola mostrada en la Imagen 28 se realizó en EXCEL, la cual posteriormente se imprimió en papel para usarla como una plantilla que fue útil para fabricar en forma parabólica a la solera que funge como el soporte de la lámina reflejante.

Este nuevo diseño mejoró la proyección de rayos solares sobre el tubo absorbedor. Este punto será discutido en la sección 4.3 Evaluación de la segunda estufa.

Tabla 3. Tabulación con los valores de (x,y) al evaluar la Ec. 3 para $a=9.37$

X	20	16	12	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20
y	10.7	6.8	3.8	1.7	0.43	0	0.43	1.7	3.8	6.8	10.7

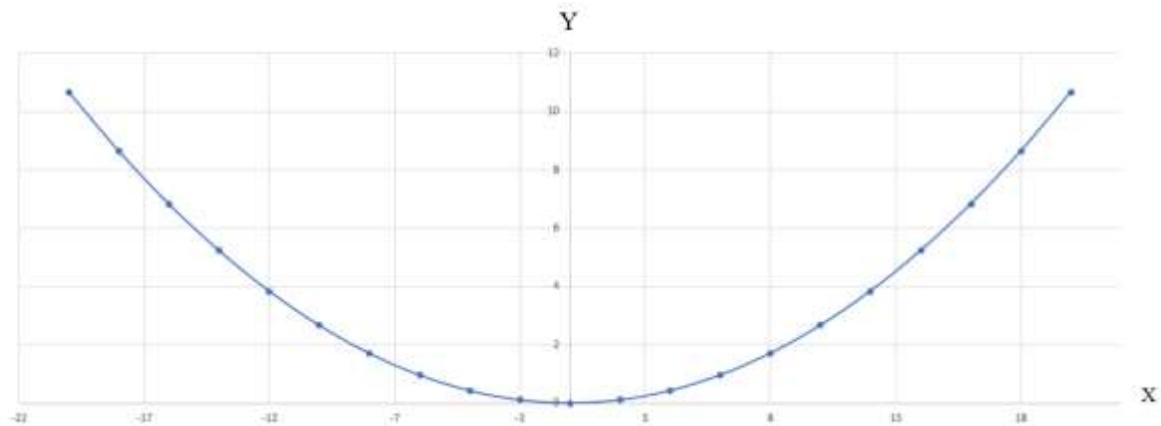


Imagen 28. Parábola graficada con los datos de la Tabla 3.

Teniendo definido las dimensiones de la lámina y la geometría de la parábola, se procedió a la construcción del concentrador y los soportes metálicos. De manera previa se realizó el modelado de la estufa solar en 3D mostrado en la Imagen 29. Es importante mencionar que en este prototipo se requirió de menos cantidad de lámina que en la estufa solar anterior.



Imagen 29. Diseño de la estufa solar (Prototipo 2)

Los materiales utilizados para la elaboración del prototipo 2 se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Materiales utilizados para la construcción de prototipo 2.

Material	Cantidad
PTR de 1 x 1 pulgada	6m
PTR de 1 ¼ x 1 ¼ pulgada	6m
Solera de 1/8 de grosor x 1 pulgada de ancho	6m
Tubo de acero inoxidable de 2 pulgadas	30cm
Redondillo de ½	2m
Tornillos de 3/8 de 2 pulgadas	4
Arandelas planas de 3/8	8
Mariposas de 3/8	4

Después de tener el material y el diseño de cada componente de la estufa solar, se procedió a realizar los cortes del material con las dimensiones mostradas en la Tabla 5. Para la elaboración del concentrador se requirió de la plantilla de la parábola mostrada en la Imagen 28, que fue la guía para moldear 2 tramos de solera. Con la ayuda de una prensa o un doblador especial de metales se obtuvo los soportes para la lámina reflejante mostrados en la Imagen 30.

Tabla 5. Dimensiones de cortes de material.

Material	Dimensiones
PTR de 1 x 1 pulgada	2 tramos de 180 cm. 2 tramos de 35 cm 4 tramos de 50 cm
PTR de $1 \frac{1}{4}$ x $1 \frac{1}{4}$ pulgada	2 tramos de 50 cm.
Tubo de acero inoxidable de 2 pulgadas	2 tramos de 20 cm
Redondillo de $\frac{1}{2}$	1 tramo de 180cm
Solera de $\frac{1}{8}$ de grosor x 1 pulgada de ancho	2 tramos de 45.6 cm

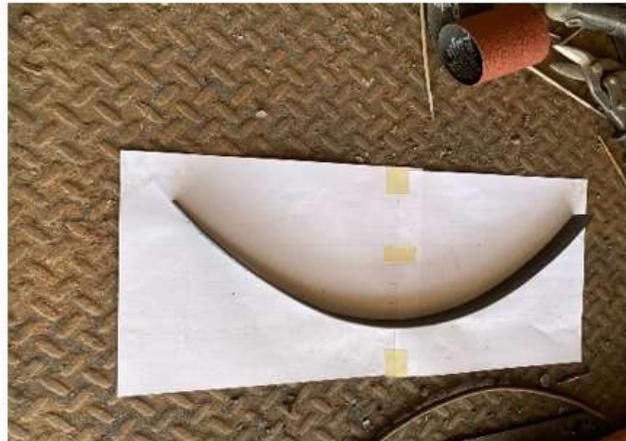


Imagen 30. Elaboración de parábola.

Posteriormente se procedió a soldar 2 tramos de 180 cm de PTR de 1 x 1 a cada extremo de la solera curvada, formando un semicilindro parabólico (Imagen 31).



Imagen 31. Armado de estructura del concentrador.

Para la fabricación de las bases de la estufa solar se consideró un diseño que soporte el peso total del concentrador y el tubo absorbedor. Se hicieron 2 soportes en forma de “Y” para los cuales se requirió de 2 tramos de PTR de 1 x 1 y un tramo de PTR de $1 \frac{1}{4} \times 1 \frac{1}{4}$ con un ángulo de apertura de 45° . De esta forma se reforzó el soporte del sistema. Algunas fotografías de este procedimiento se muestran en la Imagen 32.



Imagen 32. Elaboración de bases que sostienen el concentrador y el tubo al vacío.

A estos mismos soportes se le hizo una perforación a cada una en la parte cercana a la intersección “Y”, con el fin de unir ambos soportes con una varilla de redondillo (ver Imagen 33). Con esto se asegura mayor estabilidad y rigidez de las bases de la estufa solar.



Imagen 33. Perforación de bases para el armado de toda la estufa.

Para las bases del tubo absorbedor, se necesitó de 2 tramos de PTR de 35 cm de longitud en los cuales se realizaron perforaciones de diámetro de los tornillos los cuales eran de 3/8, como se muestra en la Imagen 34. Cada agujero servirá para posicionar el tubo absorbedor en distintas distancias focales siendo el segundo agujero el que deja nuestro tubo al vacío justo en el punto focal calculado. Seguido a esto, se cortó con un esmeril los tubos de acero inoxidable de tal manera que el tubo al vacío pueda postrarse dentro de él.



Imagen 34. Elaboración de soportes del tubo al vacío.

Teniendo la estructura de soporte de la superficie cilíndrica parabólica y las bases metálicas para todo el sistema, se procedió a soldar la estructura completa que se muestra en la Imagen 35(a). Por último, se colocó la lámina de acero inoxidable tipo espejo sobre la estructura y se procedió a moldearla, de tal manera que la lámina adquirió la forma de la estructura parabólica. Con la ayuda de remaches se sujetó la lámina con los soportes de la estructura como se ilustra en la Imagen 35(b). Posteriormente se soldó la varilla redondillo entre ambos soportes laterales. Toda la estructura metálica fue pintada para evitar que el PTR y la solera se oxiden.

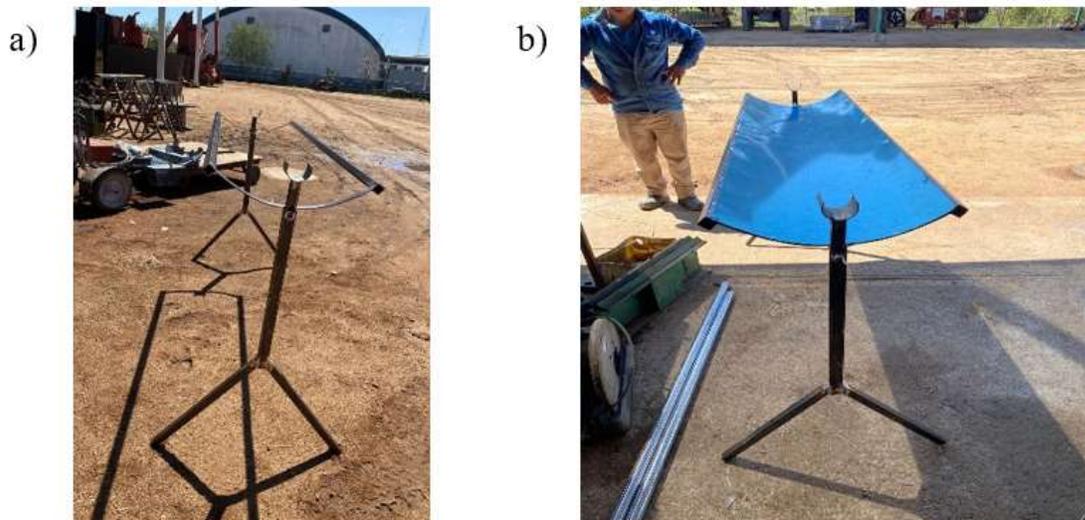


Imagen 35. Estructura completa sin (a) y con superficie reflectora (b).

Para el ensamble del concentrador con las bases del tubo absorbedor, bastó con colocar tuercas mariposas en cada base lateral, que a su vez sujetó la base del tubo absorbedor. Se eligió la altura correspondiente a la distancia focal calculada para el aprovechamiento de todos los rayos solares incidentes. Esta altura puede ser modificada por el usuario dependiendo de la temperatura que desee obtener.

Este instrumento compara la cantidad de radiación para cada longitud de onda incidente con la radiación reflejada por el objeto bajo estudio. En la Imagen 36 se muestra el equipo utilizado que es un espectrofotómetro de UV-Vis-IR (Shimadzu, Model UV-3600)

configurado para emitir luz en el rango espectral del visible de 400 nm a 800nm y en el infrarrojo cercano de 800 nm hasta 2000 nm con una resolución de 1 nm.



Imagen 36. Espectrómetro de UV-VIS-IR.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se explican los resultados obtenidos en la fabricación y evaluación de los prototipos de las estufas. Además, se discute el impacto social durante las primeras pruebas del funcionamiento en condiciones de laboratorio y reales.

4.1. Caracterización óptica de materiales reflejantes

El principal criterio para seleccionar el material del concentrador fue que tuviera una reflectancia cercana al 100% de la luz que incide en su superficie y que también fuera de bajo costo. Por lo cual se midió el espectro de reflectancia especular de cuatro materiales mediante el espectrofotómetro UV-Vis-NIR en el rango electromagnético del visible (400 nm-750 nm) y el infrarrojo hasta 1650 nm (Ver imagen 37):

1. Papel aluminio para cocina.
2. Lamina de acero inoxidable galvanizada.
3. Lamina de acero inoxidable tipo espejo.
4. Lamina de aluminio de lata de refresco.

a)



b)



Imagen 37. (a) Materiales metálicos a prueba y (b) colocación del material dentro del espectrofotómetro.

En la imagen 38 se muestra el espectro de reflectancia correspondiente a cada material de la lista anterior. El material que tiene una menor reflectancia en todo el rango pertenece al papel aluminio de cocina teniendo un valor máximo de 11 % en el rango visible y 22 % en el infrarrojo. Para la lámina de acero inoxidable galvanizada en el rango visible se tiene un promedio de 25% de reflectancia y en el infrarrojo un valor mínimo de 16.6% en 1030 nm,

pero a partir de 1200 nm este valor aumenta hasta 42 %. Para la pieza de aluminio de una lata de refresco la reflectancia incrementa de 7.5 % hasta 52.4% en función de la longitud de onda incidente. Por último, la lámina de acero inoxidable tipo espejo muestra una mayor reflectancia en todo el espectro en comparación de las demás, ya que el valor inicial es de 37.4% hasta 67% en el rango visible. El valor máximo de reflectancia para este material se encuentra en el rango infrarrojo en promedio con 80 % teniendo un valor máximo de 84.5% en 820 nm.

Considerando estos resultados se optó por elegir el material de acero inoxidable tipo espejo ya que presenta una mayor reflectividad tanto para el rango visible como en el infrarrojo. Con un promedio de eficiencia de aprovechamiento global superior al 65% de la radiación incidente. Con esto se garantiza que la mayor cantidad de radiación solar que incide sobre el concentrador hecho de este material será mayormente reflejada al tubo absorbedor.

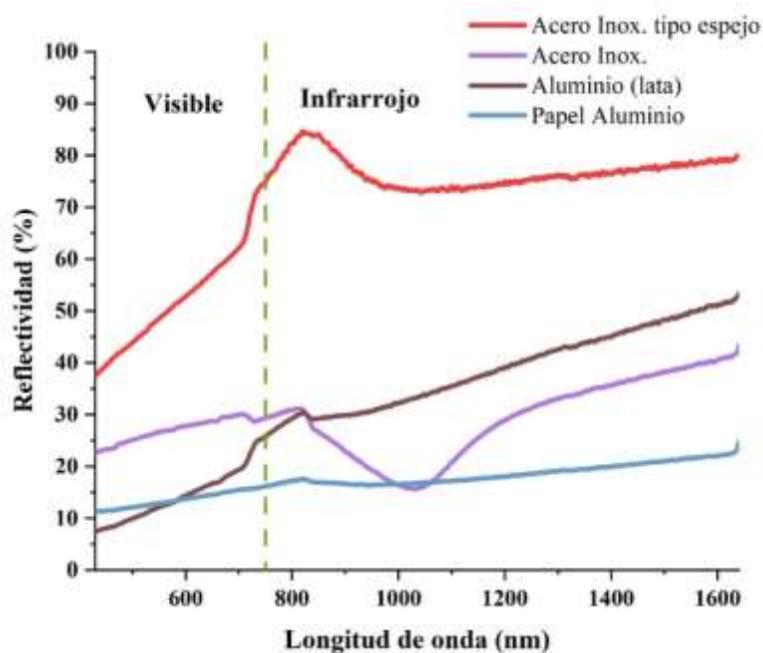


Imagen 38. Reflectividad de materiales propuestos para el concentrador solar.

4.2. Evaluación de la estufa solar cilíndrica (prototipo 1)

La estufa solar cilíndrica fabricada se muestra en la Imagen 39, ubicada en las instalaciones del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables.



Imagen 39. Estufa solar cilíndrica fabricada.

Para evaluar el rendimiento térmico de la estufa solar cilíndrica se monitoreó la temperatura dentro del tubo al vacío con y sin concentrador. Para el registro de la temperatura se usó un dispositivo de medición de temperatura modelo USB-TEMP-AI fabricado por Measurement Computing, que consiste en una tarjeta de adquisición de datos USB con entradas analógicas a las cuales se le conectaron sensores de temperatura que corresponden a termopares tipo K con rango de $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este dispositivo es confiable y proporcionan mediciones de alta precisión.

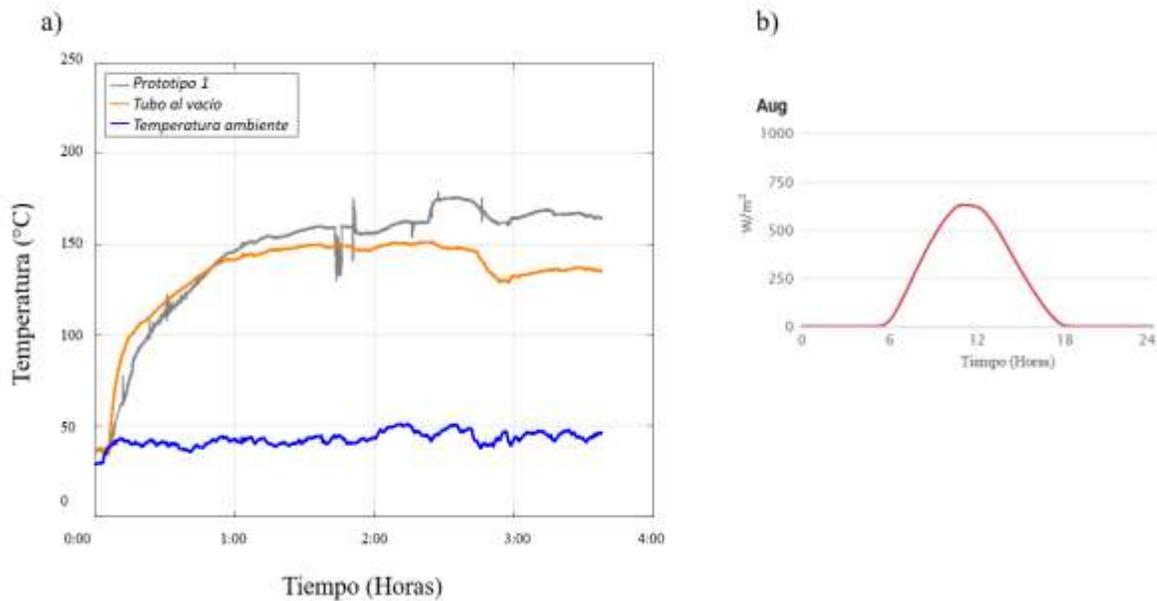


Imagen 40. Temperatura medida durante la evaluación de prototipo 1 (a) y curva de radiación solar durante la medición (b).

En la Imagen 40(a) se muestra las mediciones realizadas el día 19 de agosto del 2022 durante 3.66 horas partir de las 11:00 hasta las 14:40 hrs. La línea representada con el color gris ilustra la temperatura monitoreada dentro del tubo colector del prototipo 1 que se encuentra colocado al centro del captador cilíndrico. La temperatura máxima fue de 178.84 °C. La línea color naranja muestra la temperatura dentro del tubo al vacío sin el captador, la temperatura promedio que fue de 145 °C. La línea color azul corresponde a la temperatura ambiente alrededor de 40 °C. Es importante mencionar que el día en el que se realizó la medición hubo lapsos en donde estaba soleado y nublado. Esto coincide con la información mostrada en la Imagen 3 que indica que para el mes de agosto no se tiene la mayor radiación del año debido a que corresponde a un periodo en donde hay presencia de lluvias y días nublados, de manera esporádica. En la imagen 40(b) se observa que la radiación solar inicia a alrededor de las 6 hrs, teniendo un máximo valor de 630 Wh a las 12 hrs y por último disminuye hasta llegar a 0 a las 18 horas. Estos resultados evidencian un incremento del 23% de la temperatura dentro del tubo absorbedor utilizando un concentrador semicilíndrico.

4.3. Evaluación de la estufa solar parabólica (prototipo 2)

Antes de describir los resultados de la evaluación térmica de esta estufa solar, se presentan los resultados de la modelación del sistema térmico solar considerando un concentrador de geometría cilíndrica parabólica (prototipo 2) utilizando el software SolTrace. Después, se presenta el análisis de la temperatura alcanzada por esta estufa en comparación con la que usa un concentrador semicilíndrico (prototipo 1).

4.3.1. Simulación en SolTrace

Con el fin de visualizar y analizar la distribución de los rayos solares en el punto focal del concentrador, que en este caso es sobre la línea focal a lo largo del cilindro. En el modelo se definió un sistema óptico compuesto de tres elementos: Sol, concentrador y receptor.

La Imagen 41 muestra una distribución de 200 rayos solares que inciden en el concentrador solar. Se configuró en el software una radiación en condiciones óptimas, es decir, una radiación directa a un ángulo de 90° respecto a la superficie de la tierra; caso ideal sin pérdidas.

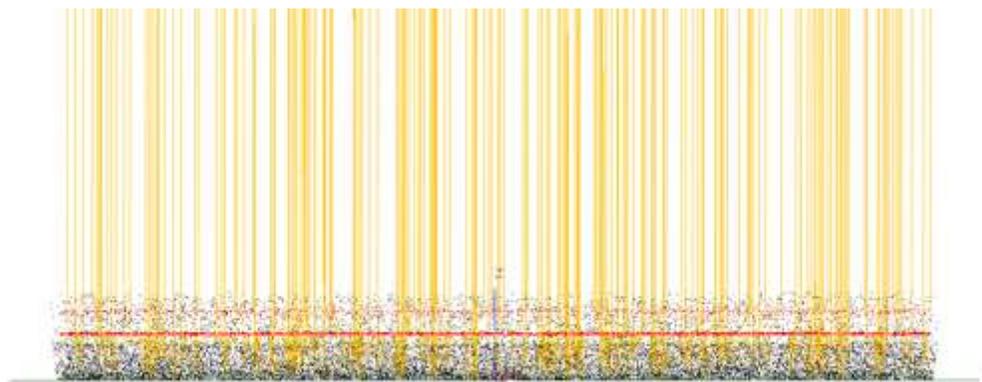


Imagen 41. Vista horizontal de representación de prototipo 2 en software SolTrace.

De acuerdo con los cálculos previamente realizados en la sección 3.1, se identificaron las zonas de la parábola donde existe una mayor concentración de los rayos solares. En la Imagen 42, se muestra la distribución de la radiación reflejada hacia el punto focal de la parábola,

donde se encuentra el tubo absorbedor; en la parte inferior del mismo existe nula reflexión en la superficie del concentrador dado que los rayos inciden en la parte superior del tubo.

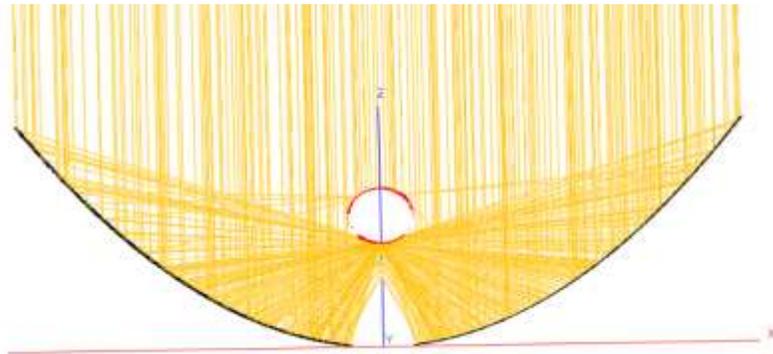


Imagen 42. Vista frontal de representación de prototipo 2 en software SolTrace en el punto focal calculado.

En la fabricación de la base de la estufa solar, los soportes del tubo colector tienen cinco niveles de ajuste de altura. Por lo cual, se puede posicionar a diferentes distancias focales, permitiendo el incremento o disminución de la radiación captada. En la Imagen 43 se muestra que la mayoría de los rayos reflejados por el concentrador no convergen en la superficie del tubo absorbedor. Esto se debe a que el tubo se encuentra a una altura lejos de la distancia focal a la cual está diseñado el concentrador.

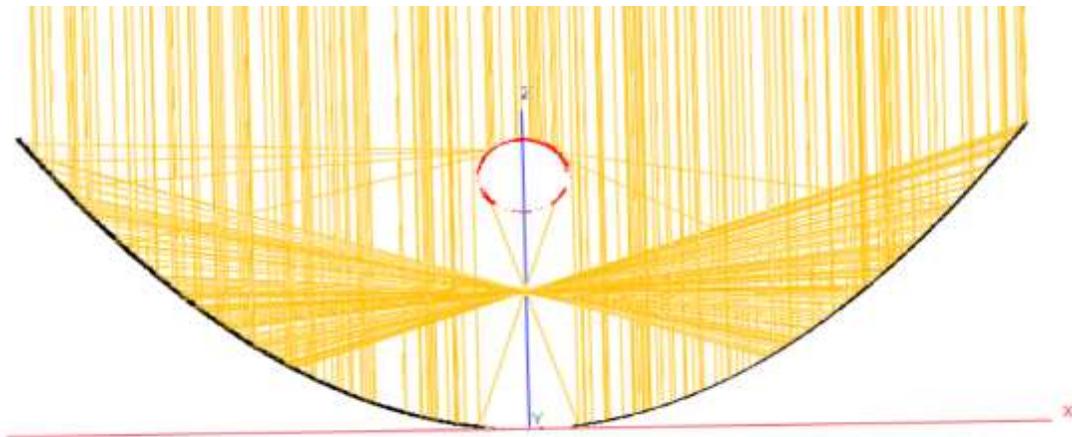


Imagen 43. Vista frontal de representación de prototipo 2 en software SolTrace con la distancia máxima en el soporte.

4.4. Comparación entre las dos estufas solares

En la Imagen 44, se muestran ambas estufas solares fabricadas: con concentrador cilíndrico (prototipo 1) y cilíndrico parabólico (prototipo 2); en condiciones de laboratorio se realizaron mediciones de temperatura para comparar la eficiencia de absorción entre las 2 estufas solares. Dado que era necesario monitorear en las mismas condiciones de radiación solar y nubosidad, la medición se realizó en las instalaciones del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. El día 22 de junio del 2023, las estufas se orientaron de tal manera que el tubo captador estuviera de forma paralela a la trayectoria del Sol, con la intención de optimizar la concentración de la radiación reflejada al punto focal.

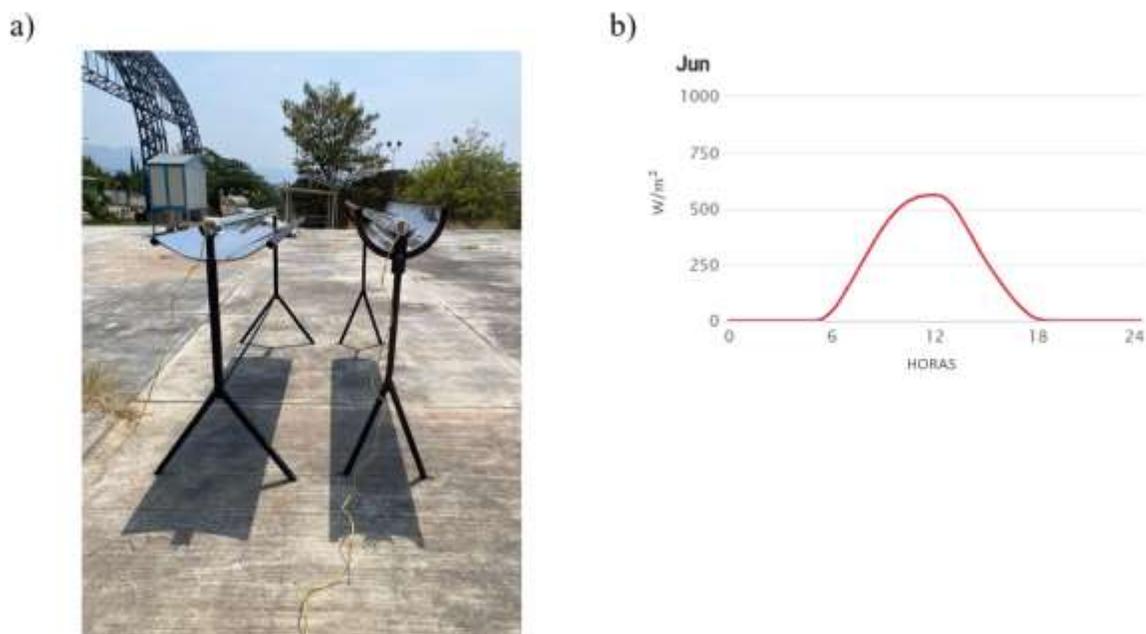


Imagen 44. Pruebas de ambas estufas (a) en el instituto de investigación e innovación en energías renovables en la UNICACH y curva de radiación solar durante la medición (b).

Se registró el valor de la temperatura de las dos estufas solares, en comparación con la temperatura ambiente y con respecto a un tubo de vacío sin concentrador a nivel del suelo.

La radiación solar durante el mes de junio es menor debido a que inicia la temporada de lluvias en la zona, de acuerdo con lo presentado en la Imagen 3. Por tanto, el aumento de la temperatura comienza ligeramente antes de las 6 horas y desciende totalmente a las 18 horas, teniendo una radiación máxima a las 12 horas con un valor de 560 Wh (ver Imagen 44(b)).

Las gráficas obtenidas se pueden observar en la Imagen 45. Cuando la temperatura ambiente promedio, señala en línea color naranja, fue de 38 °C, se obtuvo una temperatura promedio dentro del tubo al vacío de 118 °C (línea color magenta). Para el caso de la estufa cilíndrica (prototipo 1) y cilíndrica parabólica (prototipo 2) se obtuvo una temperatura promedio de 147 °C y 180 °C, respectivamente.

Estos resultados confirman que el uso de un concentrador cilíndrico aumenta la temperatura del tubo al vacío hasta un 25% y con un concentrador cilíndrico parabólico hasta un 53%. Para condiciones de día soleado y máxima radiación pasado el mediodía (junio), la temperatura medida dentro del tubo al vacío incrementa hasta 3 veces la temperatura ambiente, superando el punto de ebullición del agua. Las temperaturas registradas para estos dispositivos garantizan la cocción de verduras y proteínas de manera óptima y segura para el usuario.

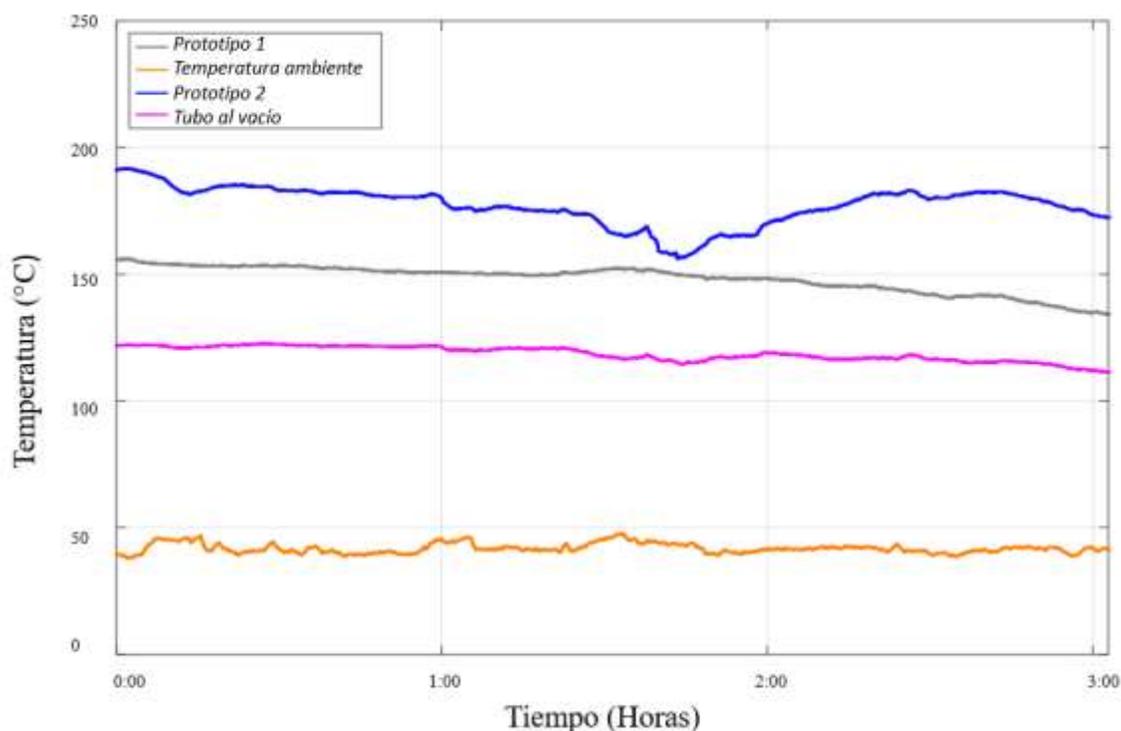


Imagen 45. Resultados de prueba de prototipo 1 y prototipo 2.

4.5. Pruebas de estufa solar en condiciones reales

En colaboración con el personal del parque ecoturístico “Joyyo Mayu”, ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se realizaron pruebas de la eficiencia de la estufa solar cilíndrica.



Imagen 46. Prueba de la estufa solar en el parque ecoturístico “Joyyo Mayu”.

El día 23 de septiembre del 2022 se demostró el funcionamiento del prototipo al aire libre, como se observa en la Imagen 46. Durante la prueba se obtuvo la cocción de brochetas de carne de res, salchichas y verduras (ver Imagen 47), a pesar de que el día no fue completamente favorable, debido a un porcentaje de nubosidad. Aproximadamente 13 personas tuvieron el interés de preguntar sobre el funcionamiento y características de prototipo, en donde con gusto y respeto se atendieron las dudas del público mediante una presentación breve.

Satisfactoriamente se logró impartir la información sobre la implementación de este tipo de estufas solares en el sitio. Se recibieron excelentes comentarios de las personas interesadas, resaltando que el uso de esta estufa solar impacta de manera positiva en el sitio debido a que se trata de un lugar ecoturístico. Además, se observó el interés de las personas de usar este tipo de artefacto en casa, puesto que satisface una de las necesidades primordiales de la vida diaria, que es la cocción de alimentos.

Es importante mencionar que este trabajo fue presentado en diversos eventos para su difusión, Por ejemplo, en entrevistas de radio, así como la exposición del trabajo en un congreso internacional. En el apartado de Anexos se encuentra los diversos reconocimientos.



Imagen 47. Cocción de alimentos durante la presentación en el parque ecoturístico “Joyyo Mayu”.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En esta sección se describe brevemente las experiencias durante la elaboración y difusión de la estufa solar, del mismo modo se mencionan trabajos a futuros que serían interesantes realizar.

En este trabajo de tesis se presentó el desarrollo y la evaluación de una estufa solar con concentrador cilíndrico y parabólico. El diseño y la construcción del prototipo requirió de materiales de bajo costo y de fácil acceso. Se obtuvo la simulación de la distribución de la radiación solar sobre la superficie del concentrador parabólico utilizando el software SolTrace. La evaluación térmica de los prototipos mostró excelentes resultados, ya que se obtuvieron temperaturas en el rango de 130 °C hasta un máximo de 180 °C, lo cual permite la perfecta cocción de cualquier alimento. Por otro lado, el desarrollo de esta estufa solar deja las puertas abiertas, principalmente a generaciones nuevas, para realizar diversas mejoras al prototipo, desde el tipo de material utilizado como la geometría del concentrador. Durante el desarrollo de la última estufa se observó que es posible reducir el costo de su producción debido a que se disminuyó la cantidad de material requerido y se aplicaron nuevos métodos de elaboración que disminuyeron el costo de mano de obra. Adicionalmente, modificar el soporte de la estructura de la estufa mediante el uso de otros materiales livianos podría minimizar el peso del prototipo facilitando su movilidad.

La implementación de una estufa solar en zonas ecoturísticas tiene un impacto positivo para la sociedad, desde lo económico hasta lo ambiental. El uso de estos dispositivos solares permite que las personas interesadas en el disfrute de dichos lugares ecoturísticos tomen conciencia acerca de cómo pueden cocinar alimentos utilizando la radiación solar, que es gratuita, y sin contaminar al medio ambiente. Además, este prototipo podría perfectamente implementarse como parte de los instrumentos de cocción de alimentos en una casa convencional, con la consigna de que se tiene que encontrar en un lugar preciso y con recurso solar factible, para usarla correctamente.

La presentación de este trabajo en eventos académicos y de comunicación permitió conocer la aceptación de este prototipo como alternativa para la cocción de alimentos en la población. Muchas de las personas que tuvieron la oportunidad de observar de cerca a esta estufa solar, se sorprendieron al enterarse del potencial energético del Sol. Esto causó un impacto positivo en la sociedad. Es importante mencionar que este proyecto abre las puertas para colaboraciones con personas especializadas en el área de nutrición para proponer una metodología que determine las temperaturas y el tiempo de cocción mínimo requerido para

cada tipo de alimento, conservando sus propiedades organolépticas, así como su contenido nutricional.

Uno de los aspectos más importantes para la implementación de este tipo de tecnologías es el impacto, ambiental que se genera. Por lo tanto, se puede concluir que, debido al uso de este prototipo se está avanzando un poco en la transición energética del país contribuyendo a la disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y a la reducción de las enfermedades causadas por la inhalación de humo.

Referencias

Amevec (2022). *Radiación solar en México*. Disponible en: <https://amevec.mx/radiacion-solar-en-mexico/#:~:text=Radiaci%C3%B3n%20solar%20en%20M%C3%A9xico%20Con%20un%20promedio%20de,considerada%20una%20de%20las%20mas%20soleadas%20del%20planeta>. [Consultado 10-09-2024]

Arkialbura (2021). *¿Cuál es la mejor orientación solar en arquitectura?* Disponible en: <https://www.arkialbura.com/cual-es-la-mejor-orientacion-solar-en-arquitectura/> [Consultado: 27-09-2023]

Asociación Española de Gas (2013). *Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica*. Barcelona: SEDIGAS. Disponible en: <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015599.pdf> [Consultado: 10-04-2024].

Berros L., Marchisio V., Milanes M., Minguet J., Petrocelli L., Stagnitta R. y Tripelli A., (2017). *Manual de energías renovables para municipios y comunas de la provincia de Santa Fe*. Santa Fe: Secretaria de Estado de la Energía.

Bien, A., (2007). *Una guía simple para la certificación del turismo sostenible y el Ecoturismo*. Washington, DC.

Efihabitat (2017). *EFIHABITAT*. Disponible en: <https://efihabitat.com/radiacion-directa-difusa-reflejada/> [Consultado: 22-09-2023].

Garcí D., Lupian V., Marroquin. Á. y Hernandez J.(2016). "Caracterización de una cocina dúplex de tubos evacuados". *Revista de Prototipos tecnológicos*, 2(6), pp 52-60.

Global Solar Atlas, (2023). Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/map> [Consultado: 19-09-23]

Heuvelodop H., Pardo J., Quirós S., y Espinoza P. (1968). *Agroclimatología tropical*. 1 ed. San José, Costa Rica.: Universidad Estatal a Distancia.

Hosseinzadeh M., Fazian A., Mahdi S., y Zamani H.(2020). Parametric analysis and optimization of a portable evacuated tube solar cooker. *Energy*, 194(1), pp 116816.

IDEAM (2023). *IDEAM*. Disponible en: <http://ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera> [Consultado: 27-09-2023].

INEGI (2023). *Información de México para niños*. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/territorio/clima.aspx> [Consultado [Consultado: 17-09-2023].

Ingenierizando (2023). *ingenierizando*. Disponible en: https://www.ingenierizando.com/optica/reflectancia/?utm_content=cmp-true [Consultado: 2-10-2023].

Jaramillo Salgado, O.A., Martínez Fernández, M., Tenorio Hernández, J.A., y del Río Portilla, J. A. (2023). *Estrategia de transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más limpios en*

el tema de energía solar. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/91596/SOLAR.pdf> [Consultado 21-09-2023].

Kalogirou, S. A.(2014). *Solar Energy Engineering*. 2 ed. Kidlington: ELSEVIER .

Khatri R., Goyal R. y Sharma R.K.(2021): "Advances in the developments of solar cooker for sustainable", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, pp 111166 .

Lehmann, C. H.(1980). *Geometría analítica*. 1 ed. D.F., México: LIMUSA S.A DE C.V.

Navntoft, C. y Cristóbal, M. P.(2019) Introducción a la energía solar termica. 1 ed. Buenos Aires, Argentina: Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética.

NREL (2023). *NREL*. Disponible en: <https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html> [Consultado 13-10-2023].

ONU.(2023). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [Consultado 20-09-2023].

Richter, C., Teske S. y Short, R. (2009). *Energía Solar Térmica de Concentración: Perspectiva mundial 2009*, España: Greenpeace .

Saiz Alcázar, S. (2015). *Efecto de las cubiertas ajardinadas sobre el microclima urbano de verano*. Tesis doctoral. Univerdidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <https://oa.upm.es/40080/> [Consultado 10-04-2024]

Schott (2023). Tubing. Disponible en: <https://www.schott.com/es-mx/products/mempax-p1000322/technical-details> [Consultado 3-10-2023].

Secretaría de turismo.(2024). Programa sectorial del turismo 2020-2024. Disponible en: *Chiapas.gob.mx*. <https://institucional.visitchiapas.com/> [Consultado 16-09-2023].

SOPELIA (2017). *SOPELIA*. Disponible en: <https://www.energiasolar.lat/colector-solar-plano/#:~:text=En%20los%20colectores%20planos%2C%20el%20captador%20se%20ubica,de%20e spesor%20%28si%20bien%20existen%20modelos%20m%C3%A1s%20grandes%29>. [Consultado 28-09-2023].

Stewart, J.(2008). *Cálculo de una variable*. D.F., MÉXICO: CENGAGE LEARNING .

Tejada Martínez, A. y Gómez-Azpeitia, G. (2015). *Puntuario Solar de México*. Veracruz, México:Enfoque Académico. Disponible en: [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Prontuario-solar-de-Mexico-\(noviembre-de-2015\)_6.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Prontuario-solar-de-Mexico-(noviembre-de-2015)_6.pdf) [Consultado 10-04-2024]

Terres Peña, H. (2002). *Diseño y evaluación numérica del funcionamiento de estufas solares tipo caja con reflectores interiores de varios pasos*. Tesis de MAestría. Instituto Politecnico Nacional, México.

Unida (2023). *Unida.org*. Disponible en:
<https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf>
[Consultado 26-09-2023].

Wells, N. C.(2012). *The Atmosphere and Ocean*. 3 ed. UK: Wiley-Blackwell.

Zhao Y., Zheng H., Sun B., Li C. y Wu Y.(2018): "Development and performance studies of a novel portable solar cooker using a curved Fresnel lens Concentrator", *Solar Energy*, 174(1), pp 263-272.

En este apartado se incluye el desarrollo matemático usado para el diseño del concentrador cilíndrico parabólico (prototipo 2). Además, se muestran las evidencias de participación en actividades de divulgación así como reconocimientos de la participación en congresos nacionales e internacionales.

Anexo A. Desarrollo matemático para cálculo de la parábola del concentrador solar.

$$1. \frac{dy}{dx} = \frac{x^2}{4a} = \frac{2x}{4a} \rightarrow \frac{x}{2a}$$

$$2. L = \int_0^{2a} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \rightarrow L = \int_0^{2a} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2a}\right)^2} dx \rightarrow \int_0^{2a} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4a}} dx \rightarrow \int_0^{2a} \sqrt{\frac{4a^2 + x^2}{4a}} dx = \int_0^{2a} \sqrt{\frac{1}{4a} + \sqrt{4a^2 + x^2}} dx = \int_0^{2a} \frac{1}{2a} + \sqrt{4a^2 + x^2} dx$$

$$L = \int \text{limite superior} - \int \text{limite inferior}$$

$$L = \frac{1}{2a} \left(\frac{2a}{2} \sqrt{4a^2 + (2a)^2} + \frac{4a^2}{2} \ln \left(2a + \sqrt{4a^2 + (2a)^2} \right) \right) - \left(\frac{0}{2} \sqrt{4a^2 + 0^2} + \frac{4a^2}{2} \ln \left(0 + \sqrt{4a^2 + 0^2} \right) \right)$$

$$L = \frac{1}{2a} \left(a\sqrt{8a^2} + 2a^2 \ln \left(2a + \sqrt{8a^2} \right) \right) - \left(2a^2 \ln \left(\sqrt{4a^2} \right) \right)$$

$$L = \frac{(a)(2\sqrt{2}a)}{2a} + \frac{2a^2 \ln(2a + 2\sqrt{2}a)}{2a} - \frac{2a^2 \ln(2a)}{2a}$$

$$L = \sqrt{2}a + a \ln \left(2a(1 + \sqrt{2}) \right) - a \ln(2a)$$

$$L = a(\sqrt{2} + \ln \left(2a(1 + \sqrt{2}) \right)) - \ln(2a)$$

Anexo B participación en actividades de divulgación de la ciencia en congresos nacionales e internacionales.

Presentación de estufa solar en parque ecoturístico Joyo Mayu



Link: [Unicach - Publicaciones | Facebook](#)

Entrevista de canal 13.



Link: <https://fb.watch/g08uumQMHQ/>

Congreso internacional SYCSA.



Link: [CoNSyCSA \(unam.mx\)](https://unam.mx/CoNSyCSA)

Presentación de la semana de divulgación científica en UNICACH.



Link: [Facebook Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables.](https://www.facebook.com/Instituto-de-Investigacion-e-Innovacion-en-Energias-Renovables)

Anexo C. Reconocimientos otorgados por la parte regulatoria de congresos y platicas de divulgación científica, además de un certificado de registro público del derecho de autor.



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





La
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

a través del

**Instituto de Investigación e Innovación
en Energías Renovables**

otorga reconocimiento a

Pedro Larrinaga González

por su PARTICIPACIÓN en el

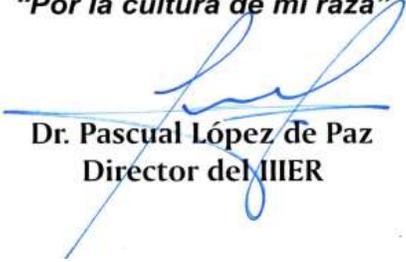
1er MINI VERANO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
"La ciencia para todas y todos"

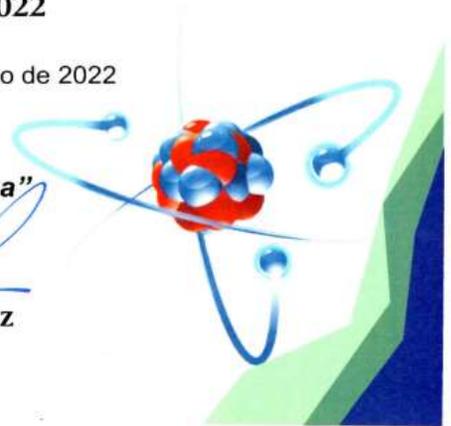
efectuado en los laboratorios de investigación del instituto
del 13 al 24 de junio de 2022

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; 24 de Junio de 2022



"Por la cultura de mi raza"


Dr. Pascual López de Paz
Director del IIER





**LA UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**

a través de la

Dirección General de Extensión Universitaria

Otorga

RECONOCIMIENTO

al

C. Pedro Larrinaga González

Por su participación en la

Exposición de Proyectos Científicos realizado en el marco de
la Semana de la Juventud, Ciencia, Arte, Cultura y Salud

Tuxtla Gutiérrez Chiapas; 12 de agosto de 2022

"Por la Cultura de mi Raza"

Lic. Enrique Pérez López

Director General de Extensión Universitaria



CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ESCOBAR VERA ALESSANDRA YADIRA
LARRINAGA GONZALEZ PEDRO
LOPEZ MORALES GUADALUPE
VILCHIS BRAVO HEBER

TÍTULO: INVESTIGACION DE UNA ESTUFA SOLAR CILINDRICA PARABOLICA

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, no es objeto de protección como derecho de autor; las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

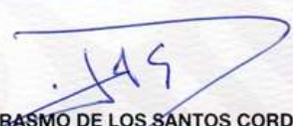
Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2024-070113581000-01

Ciudad de México, a 04 de julio de 2024

EL JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INSCRIPCION DE OBRAS


FRANCISCO ERASMO DE LOS SANTOS CORDERO

