



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica

**“Diseño y simulación de estufa solar tipo caja
(prisma hexagonal)”**

TESIS

Que para obtener el título de:
Licenciada en ingeniería en Energías Renovables

PRESENTA

Arleth Melisa Hernandez Romero

Directora de tesis: Dra. Nallely Téllez Méndez
Co Asesor: Mtro. Enrique De La Fuente Morales

Puebla, Pue. 22 de mayo de 2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1 INICIO	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 HIPÓTESIS	8
1.3 JUSTIFICACIÓN	8
1.4 OBJETIVOS	9
1.4.1 Objetivo general	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 DESCRIPCIÓN	10
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 LA ENERGÍA SOLAR.....	11
2.1.1 Naturaleza de la radiación solar.....	11
2.1.2 Constante solar	13
2.2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR	14
2.2.1 Energía solar térmica.....	14
2.2.2 Energía solar fotovoltaica.....	16
2.3 RADIACIÓN SOLAR	17
2.3.1 Tipos de radiación solar	17
2.3.2 Propiedades de la radiación.....	19

2.3.3 Irradiancia	20
2.3.4 Irradiación	20
2.4 VARIACIONES EN LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR	21
2.4.1 Relación Sol-Tierra	21
2.4.2 Condiciones meteorológicas	23
2.4.3 Condiciones geográficas	23
2.4.4 Condiciones geométricas	25
2.5 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	29
2.5.1 Radiación directa sobre una superficie horizontal	29
2.5.2 Radiación en un día despejado	30
2.5.3 Radiación solar sobre una superficie inclinada	33
2.5.4 Radiación solar en la república mexicana	34
CAPÍTULO 3 ESTUFAS SOLARES	36
3.1 HISTORIA DE LAS ESTUFAS SOLARES	36
3.2 ESTUFAS SOLARES EN MÉXICO	37
3.3 CLASIFICACIÓN DE ESTUFAS SOLARES	38
3.3.1 Estufas solares de concentración	38
3.3.1.1 Estufas tipo panel	38
3.3.1.2 Estufa solar parabólica	39

3.3.2 Estufas solares de acumulación	40
3.3.2.1 Reflectores.....	42
3.3.2.2 Materiales reflectores.....	43
3.3.2.3 Cocción de alimentos	44
3.4 EFICIENCIA TÉRMICA DE UNA ESTUFA SOLAR TIPO CAJA.....	46
3.5 POTENCIA DE COCCIÓN	47
CAPÍTULO 4 DISEÑO.....	48
4.1 COMPONENTES DE ESTUFA SOLAR.....	48
4.2 ÁREA DE COCCIÓN.....	49
4.3 DIMENSIONES DE LA ESTUFA SOLAR TIPO CAJA CONVENCIONAL.....	51
4.4 DIMENSIONES DE LA ESTUFA TIPO CAJA “PRISMA HEXAGONAL”	52
4.5 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN	54
4.5.1 Estufa solar tipo caja convencional.....	54
4.5.2 Estufa solar tipo caja “prisma hexagonal”	57
CAPÍTULO 5 PROGRAMA PARA LA SIMULACIÓN TÉRMICA DE LA ESTUFA SOLAR (SOLIDWORKS)	59
5.1 CONSIDERACIONES PREVIAS.....	60
5.1.1 Características de la zona.....	60
5.2 CONDICIONES INICIALES.....	61
5.2.1 Configuración del análisis de radiación.....	61

5.2.2 Opciones de control de calculo	63
5.2.3 Superficies radiativas	64
5.2.4 Propiedades de los materiales	66
CAPÍTULO 6 RESULTADOS	67
6.1 SIMULACIÓN TÉRMICA PARA EL 21 DE JUNIO	67
6.1.1 Distribución de temperatura	67
6.1.2 Temperatura del agua.....	70
6.1.3 Irradiación	71
6.2 SIMULACIÓN TÉRMICA PARA EL 21 DE DICIEMBRE	72
6.2.1 Distribución de la temperatura	72
6.2.2 Temperatura del agua.....	73
6.2.3 Irradiación	74
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
6.3.1 Análisis de eficiencia térmica	76
6.3.2 Análisis de potencia de cocción	78
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
7.1 CONCLUSIONES.....	80
7.2 RECOMENDACIONES	82

TABLA DE FIGURAS

Figura 1.3-1 Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	8
Figura 2.1-1 Espectro solar terrestre.....	12
Figura 2.1-2 Espectro electromagnético.....	13
Figura 2.2-1 Secador solar industrial de maíz.....	15
Figura 2.2-2 Estructura básica de una celda fotovoltaica.....	16
Figura 2.3-1 Tipos de radiación solar.....	18
Figura 2.3-2 Comportamiento de las propiedades de la radiación al incidir en un cuerpo.	20
Figura 2.3-3 Relación entre irradiancia e irradiación.....	21
Figura 2.4-1 Declinación solar en el año.....	22
Figura 2.4-2 Medición del ángulo de latitud y ubicación de los paralelos con respecto al ecuador.....	24
Figura 2.4-3 Ángulos zenit, de inclinación, acimut superficial y de acimut solar para una superficie inclinada.....	27
Figura 2.5-1 Radiación solar en México.....	35
Figura 3.3-1 Estufa solar tipo panel.....	39
Figura 3.3-2 Concentrador solar parabólico.....	40
Figura 3.3-3 Partes de estufa u horno solar.....	41
Figura 3.3-4 Incidencia y reflexión de rayos solares.....	42
Figura 4.2-1 Dimensiones del recipiente de cocción a) vista superior b) vista lateral. ..	51

Figura 4.3-1 Dimensiones de estufa solar tipo caja a) vista superior b) vista lateral c) vista frontal.	52
Figura 4.4-1 Dimensiones de la estufa solar “prisma hexagonal”	53
Figura 4.5-1 Distribución de los cortes en el panel de madera	55
Figura 4.5-2 Distribución de los cortes en el panel de madera	57
Figura 5.1-1 Irradiancia global horizontal	61
Figura 5.2-1 Configuración inicial.....	62
Figura 5.2-2 Configuración de la opción “Flow Freezing”	64
Figura 5.2-3 Tipos de superficies radiactivas	65
Figura 5.2-4 Configuración de la cubierta	66
Figura 6.1-1 a) Recorrido aparente de los rayos solares b) distribución de temperatura en estufa solar tipo caja convencional.....	68
Figura 6.1-2 a) Recorrido aparente de los rayos solares b) distribución de temperatura en estufa solar tipo caja “prisma hexagonal”	69
Figura 6.1-3 Temperatura del agua.....	70
Figura 6.1-4 Irradiación para el día 21 de junio.	71
Figura 6.2-1 Distribución de temperatura en ambos modelos	73
Figura 6.2-2 Temperatura del agua.....	74
Figura 6.2-3 Irradiación para el día 21 de diciembre	75
Figura 6.3-1 Valores de potencia de ambos modelos de estufa solar respecto al día de simulación	79

CAPITULO 1 INICIO

1.1 INTRODUCCIÓN

En México, las personas que viven en zonas remotas o rurales tienen mayor dificultad para acceder a servicios básicos de vivienda como son: agua, drenaje, energía eléctrica y a cocinas de gas LP.

De acuerdo con datos del ENCEVI (Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares) en 2018 se registró un 11% de población que depende en gran medida del uso de leña o carbón para calentar y cocinar sus alimentos. (INEGI, Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares, 2018)

El uso de este tipo de combustibles no solo afecta a la salud de las personas (especialmente mujeres y niños), sino también al medio ambiente por la emisión de gases al aire y deforestación. (Environment Australia, 2002; Organización Mundial de la Salud , 2005)

Por ello es importante la implementación de tecnologías sustentables como lo son las estufas solares ya que ofrecen una alternativa para satisfacer las necesidades de cocción de alimentos y al mismo tiempo contribuye favorablemente en la problemática del deterioro ambiental.

1.2 HIPÓTESIS

En el diseño de una estufa solar de acumulación cambiar la geometría de una caja convencional a prisma hexagonal provocara un aumento en la temperatura y eficiencia de la estufa solar. Ya que de acuerdo con Bayray, el uso de reflectores internos inclinados propicia una mayor reflexión interna. (Bayray, et al.,2013)

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las actuales normas internacionales de derechos humanos subrayan que todo ser humano tiene derecho a una alimentación adecuada, segura y aceptable. Asimismo, el desarrollo y la implementación de políticas de transición a energías más limpias para cocinar promueven al menos cinco Objetivos de Desarrollo Sostenible: 3) buena salud y bienestar; 5) igualdad de género; 7) energía limpia y asequible; 13) acción climática y 15) vida de ecosistemas terrestres. (Organización de las Naciones Unidas, 2018)



Figura 1.3-1 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: (Organización de las Naciones Unidas,2015)

En este contexto, de entre las energías renovables, la energía solar térmica es la más adecuada, ya que México recibe un alto nivel de radiación solar, en promedio de 5.5 KWh/m² y esta radiación puede ser aprovechada por tecnologías sustentables como lo son las estufas solares, dispositivos que transforman los rayos solares en poder calorífico.

Con este calor generado se puede pasteurizar agua, así como cocinar, calentar o secar alimentos. El uso de estos dispositivos beneficia a las personas que se encuentran en zonas remotas del país, además brinda una alternativa al uso de gas LP, para personas preocupadas por reducir el cambio climático.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia y potencia de cocción de una estufa solar de acumulación tipo caja (prisma hexagonal) mediante simulación térmica.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar el modelo propuesto de estufa solar tipo caja (prisma hexagonal) mediante software CAD/SolidWorks.
- Simular el modelo mediante la herramienta FlowSimulation con el fin de obtener los parámetros térmicos de eficiencia y potencia de cocción.

- Realizar la comparación mediante simulación del modelo propuesto y una estufa solar tipo caja convencional.

1.5 DESCRIPCIÓN

Se revisarán los conceptos relacionados con la energía solar y su aprovechamiento, posteriormente se investigará sobre el funcionamiento de las estufas solares. Luego se definirán los parámetros de diseño; teniendo estos parámetros se realizará la simulación térmica en este programa con el fin de identificar el buen funcionamiento de la estufa solar.

Con la herramienta de Flow Simulation se analizarán los parámetros como radiación incidente, temperatura en sólidos y líquidos. A partir de ellos se determinan los factores de eficiencia térmica y la potencia de cocción de la estufa solar. También se simulará un diseño existente de estufa solar tipo caja con fin de poder comparar ambos modelos. Finalmente, se llevará a cabo un análisis mediante la simulación de los dos tipos de estufa solar, con el propósito de determinar si se logró incrementar la temperatura de un modelo convencional.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 LA ENERGÍA SOLAR

El Sol es la estrella más próxima a la Tierra tiene un radio de unos 700,000 km y una masa 2×10^{30} kg, 330.000 veces más grande que la de la Tierra. La temperatura en su superficie está cerca de los 6,000°C, aunque es algo menor en las manchas solares.

El Sol está compuesto por una masa gaseosa de hidrogeno (H₂) y helio (He), las condiciones extremas de presión y temperatura en su núcleo permiten lograr reacciones nucleares de fusión, liberándose durante el proceso inmensas cantidades de energía que el Sol irradia en forma de luz y calor en todas las direcciones a través del espacio.

En la Tierra la incidencia de esta energía permite el calentamiento de la atmosfera, la superficie de continentes y mares estimula el crecimiento de plantas, condiciona el clima, etc. También se considera una fuente primaria de la cual derivan la mayoría de las energías utilizadas por el hombre. (Vega & Ramírez, 2014)

2.1.1 Naturaleza de la radiación solar

El Sol se encuentra a una distancia de 149,5 millones de kilómetros, la radiación emitida se debilita al atravesar la atmosfera terrestre, por efectos de absorción que suceden en la estratosfera y la troposfera. Al alcanzar la superficie oceánica y continental, parte se absorbe y dispersa, el resto se refleja en la atmosfera y se dirige al espacio exterior.

Se estima que un 46% de la radiación solar llega a la superficie de la Tierra, este flujo está formado principalmente por cantidades aproximadamente iguales de luz visible y luz ultravioleta, y una pequeña cantidad de luz infrarroja, con longitudes de onda entre 0.2 y 3.0 micrómetros (200 a 3000 nanómetros). (Meinel & Meinel, 1976)

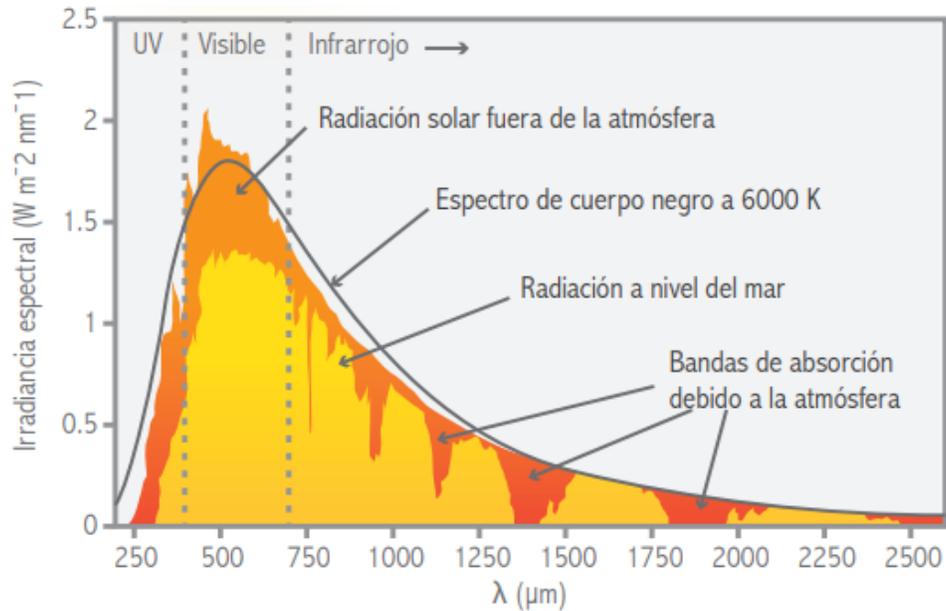


Figura 2.1-1 Espectro solar terrestre. Fuente: (Riveros, 2011)

La radiación a nivel de la mar presentada en la Figura 2.1-1 es en condiciones de cielo despejado.

La energía solar llega en forma de radiación electromagnética, esta radiación se puede clasificar en un espectro con las diferentes longitudes de onda, como se aprecia en la Figura 2.1-2, el cual se extiende desde longitudes de onda corta (frecuencias altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio.

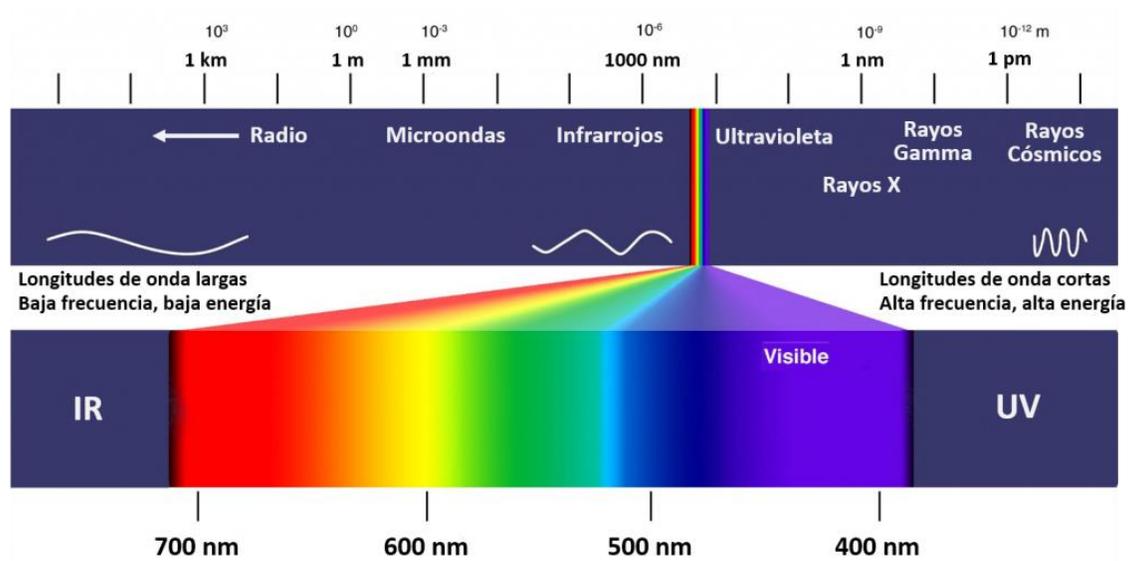


Figura 2.1-2 Espectro electromagn3tico. Fuente: (Riveros, 2011)

2.1.2 Constante solar

La constante solar G_{SC} es la energ3a que incide perpendicularmente sobre un 3rea unitaria de la parte exterior a la atmosfera. Tiene un valor de 1361 W/ m², este puede variar, ya que depende de la distancia que existe entre el Sol y la Tierra.

Por lo que, en los meses de diciembre a enero, cuando la Tierra est3 m3s cerca del Sol(perihelio) su valor disminuye mientras que en junio y julio cuando se encuentra a mayor distancia el valor aumenta (afelio). (Huashan & Yongwang, 2011)

La radiaci3n solar extraterrestre (fuera de la atmosfera) G_{ON} , para cualquier d3a del a3o n se puede calcular mediante la ecuaci3n 2.1:

$$G_{ON} = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Donde n es el número de día del año.

2.2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía proveniente del sol puede aprovecharse por el ser humano mediante dos tipos de tecnologías: solar térmica y solar fotovoltaica.

2.2.1 Energía solar térmica

Es la energía proveniente de la radiación solar que puede ser aprovechada en forma de calor. Una de sus aplicaciones de forma directa es en estufas solares; dispositivos diseñados para captar la mayor cantidad de rayos y así lograr temperaturas adecuadas (90-120°C) para la cocción de alimentos.

Otra aplicación directa son los secadores solares similares a las estufas solares, con la diferencia de la incorporación de entradas y salidas de aire, estos producen menores temperaturas (35-50°C) y pueden ser usados de forma domestica o industrial. (Arancibia & Best, 2020)

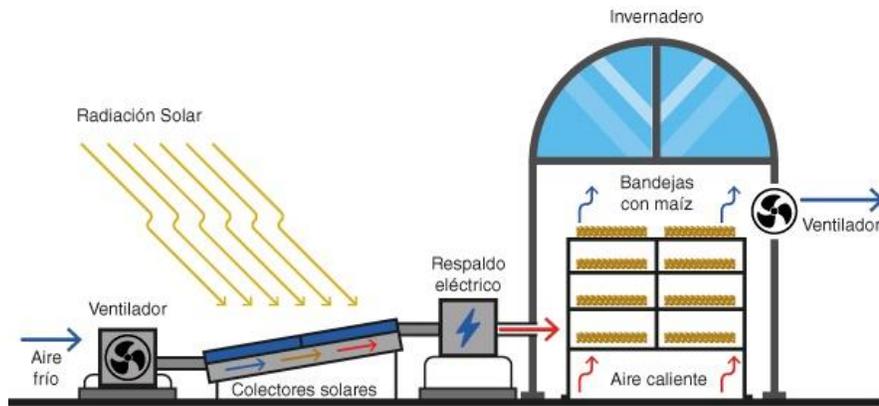


Figura 2.2-1 Secador solar industrial de maíz. Fuente: (Brown, 2010)

Los calentadores solares, son sistemas más complejos diseñados para la producción de agua caliente sanitaria (ACS). Los rayos solares son captados en una superficie oscura, el calor generado se transfiere al agua que circula en el interior.

Existen otras aplicaciones de esta energía, que requieren un proceso más elaborado como la calefacción, la refrigeración mediante ciclo de absorción, en donde se emplean placas solares térmicas. La mayoría de estos sistemas de producción funcionan solo cuando brilla el sol, en regiones donde el invierno dura poco no presenta inconvenientes, pero donde son inviernos más largos esta tecnología no es la más adecuada. (Brown, 2010)

2.2.2 Energía solar fotovoltaica

Este tipo de energía convierte los rayos solares en electricidad, por medio de celdas solares donde ocurre el fenómeno físico llamado efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico se produce al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales semiconductores. Los materiales semiconductores, se encuentran en el espectro regular de conducción, es decir, no son excelentes conductores de electricidad como los metales, pero si mejor que los materiales aislantes. Se usan en las celdas solares porque tienen la característica de poder mejorar su capacidad de conducir electricidad al ser expuestos a la luz.

Parte del efecto fotovoltaico, es la liberación de electrones, lo siguiente es generar un voltaje capaz de mover a estos electrones a una dirección específica, esto se obtiene al unir dos materiales, generando así una corriente eléctrica.

Los semiconductores usados deben tener características diferentes, uno debe ceder parte de sus electrones con facilidad (se le llama material tipo N), mientras que el otro debe aceptar fácilmente electrones adicionales (material tipo P).

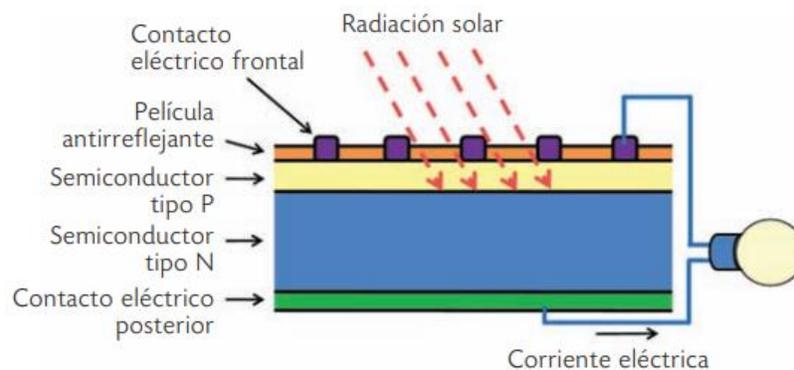


Figura 2.2-2 Estructura básica de una celda fotovoltaica. Fuente: (Brown, 2010)

El semiconductor que se usa para la fabricación de la celda solar es silicio. Existen paneles de tres tipos listados de forma descendente respecto a eficiencia y precio: silicio monocristalino, policristalino y amorfo. Una celda solar por si sola produce una cantidad baja de potencia, por lo que para poder tener más aplicaciones se hacen arreglos de conexión entre varias para aumentar el voltaje o la corriente.

2.3 RADIACIÓN SOLAR

2.3.1 Tipos de radiación solar

La radiación solar incidente se puede dividir en tres categorías diferentes en función de cómo alcanza la superficie de la tierra.

Radiación directa

Es la que se recibe directamente del sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica y sin cambiar de dirección (es la más importante en un día soleado).

Radiación difusa

Este tipo de radiación es resultado de la dispersión que existe en la atmosfera, por lo tanto, la luz llega irregularmente dispersa y sin una dirección uniforme.

Un objeto sin luz puede estar iluminado por la incidencia de radiación difusa, el color del cielo azul se debe a esta radiación, sin ella, el cielo se vería negro, como sucede en la Luna. En los días soleados, esta energía supone un 15% de la radiación global; sin embargo, su porcentaje incrementa en los días nublados, cuando la radiación directa es baja.

Radiación reflejada o albedo

Es la porción de radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie. La capacidad de un cuerpo para poder realizar la reflexión recibe el nombre de coeficiente de reflexión o albedo. Dicho coeficiente depende de la superficie del cuerpo sobre el cual incide la luz solar, en un cuerpo negro el valor de su albedo es cero, mientras que para la nieve es de 0.9.

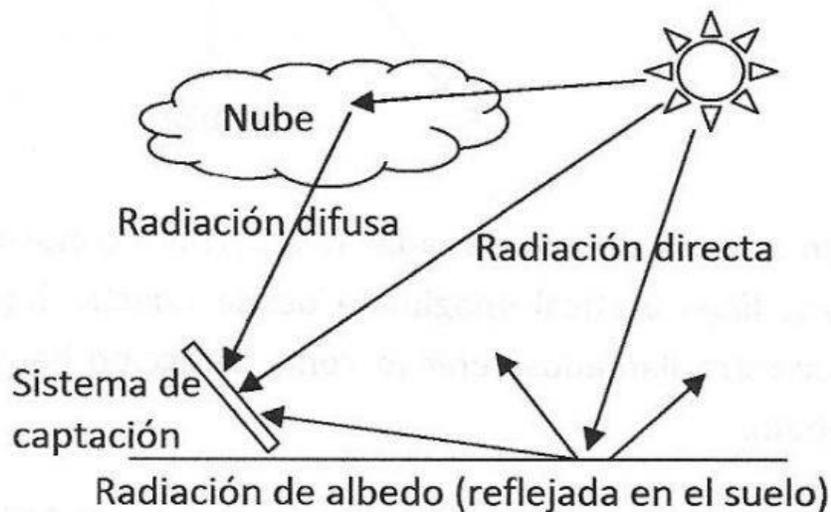


Figura 2.3-1 Tipos de radiación solar. Fuente: (Julia, Manuel, & Tagüeña, 2008)

La suma las radiaciones: directa, difusa y reflejada que recibe una superficie se conoce como *radiación total*. Como ejemplo, una ventana puede verse afectada por los rayos directos del Sol, así como por los difundidos por el cielo y las nubes. Además, también puede entrar la luz reflejada por algún otro objeto situado frente a la ventana.

En superficies horizontales, se considera que no existe radiación reflejada, así que solo existe radiación directa y difusa, la suma de estas dos recibe el término de *radiación global*.

2.3.2 Propiedades de la radiación

La luz proveniente del Sol es considerada como radiación térmica, mediante ondas electromagnéticas transmite calor a la superficie de la tierra.

Algunos cuerpos al estar expuestos a este tipo de radiación se comportan de forma diferente, esto depende del material que estén hechos, forma de la superficie y la temperatura. Los conceptos relacionados a estas características son:

- **Cuerpo negro:** se define como el cuerpo capaz de emitir y absorber la máxima cantidad de radiación posible sin importar la longitud de onda y la temperatura.
- **Emisividad:** hace referencia a la relación entre la radiación emitida por una superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad de una superficie varía entre $0 \leq \epsilon \leq 1$. El cuerpo negro tiene una emisividad igual a 1.
- **Reflectividad, absorptividad y transmitancia.** Son las propiedades que se presentan cuando incide la radiación en una superficie (Figura 2.3-2). La parte de irradiación que es absorbida se conoce como absorptividad α , la parte reflejada se denomina reflectividad ρ y la restante si existe se llama transmisividad τ . De modo que la suma de estas propiedades resulta en 1.

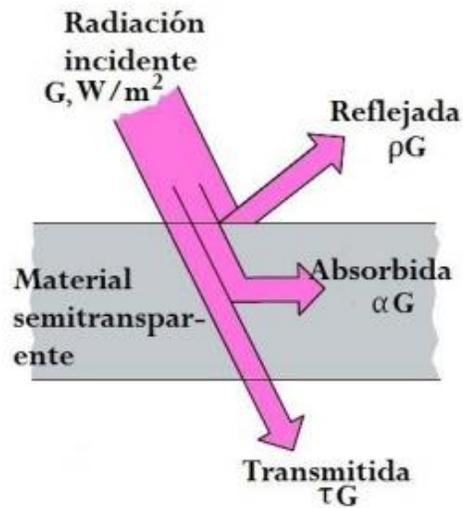


Figura 2.3-2 Comportamiento de las propiedades de la radiación al incidir en un cuerpo. Fuente: (Çengel & Ghajar, 2020)

2.3.3 Irradiancia

Es la radiación solar recibida de forma instantánea en una superficie determinada. Las unidades de la irradiancia en el Sistema Internacional son el W/m^2 .

Generalmente se usa el símbolo G para expresarla, dependiendo si la irradiancia es extraterrestre, directa o difusa, le acompaña un subíndice: G_o , G_b , G_d , respectivamente.

2.3.4 Irradiación

Es la radiación recibida durante un tiempo en una superficie. Se suele medir en Wh/m^2 o J/m^2 .

La relación entre la irradiación y la irradiancia está dada por la siguiente expresión:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt$$

(2.2)

Donde la irradiación se calcula desde un tiempo t_1 hasta el tiempo t_2 y la irradiancia se considera en un momento específico.

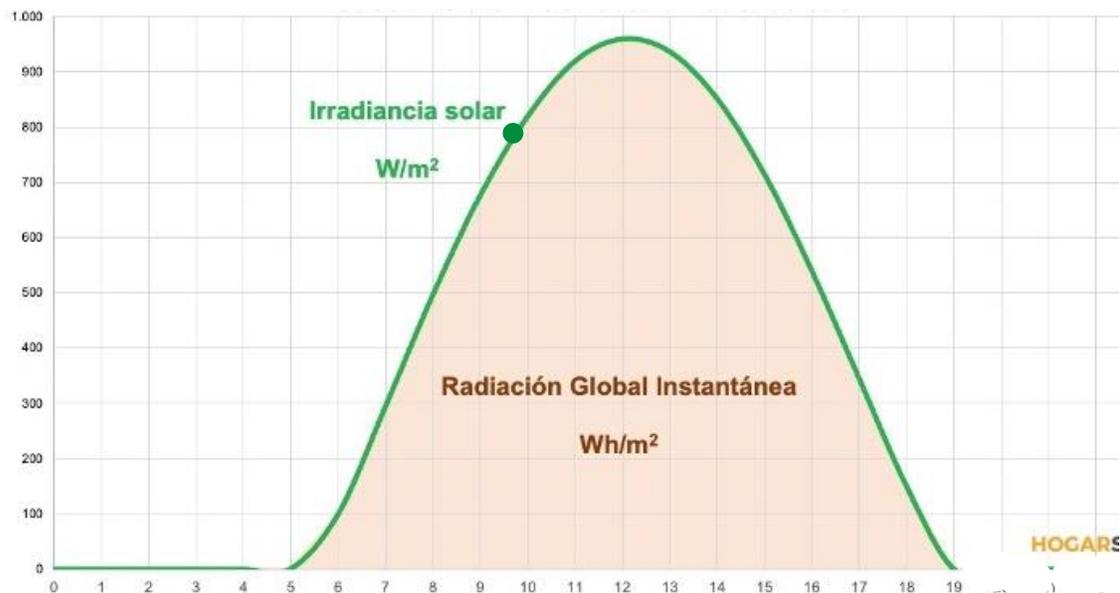


Figura 2.3-3 Relación entre irradiancia e irradiación. Fuente: (Tiwari, 2002).

2.4 VARIACIONES EN LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR

La potencia de la radiación solar varía según se encuentre la posición del Sol, además, de condiciones meteorológicas, geográficas y geométricas; una descripción más amplia de estas condiciones se presenta a continuación:

2.4.1 Relación Sol-Tierra

La órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino cuasi-elíptica. A su vez la Tierra rota sobre su mismo eje.

Al avanzar la Tierra alrededor del Sol, los rayos solares caen de diferente manera en cada hemisferio provocando las variaciones estacionales. Los momentos en los que el día y la noche tienen la misma duración se conocen como equinoccios, ocurren dos veces al año en 20 de marzo y 23 de septiembre. En los solsticios el día más largo es el 21 de junio, mientras que el día más corto corresponde al 21 de diciembre.

Al ángulo que resulta de la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano imaginario de su órbita, se conoce como declinación solar. En el solsticio de invierno tiene un valor de $+23.45^\circ$ y en el solsticio de verano es de -23.45° , como se muestra en la Figura 2.4-1. Se calcula por la expresión:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

(2.3)

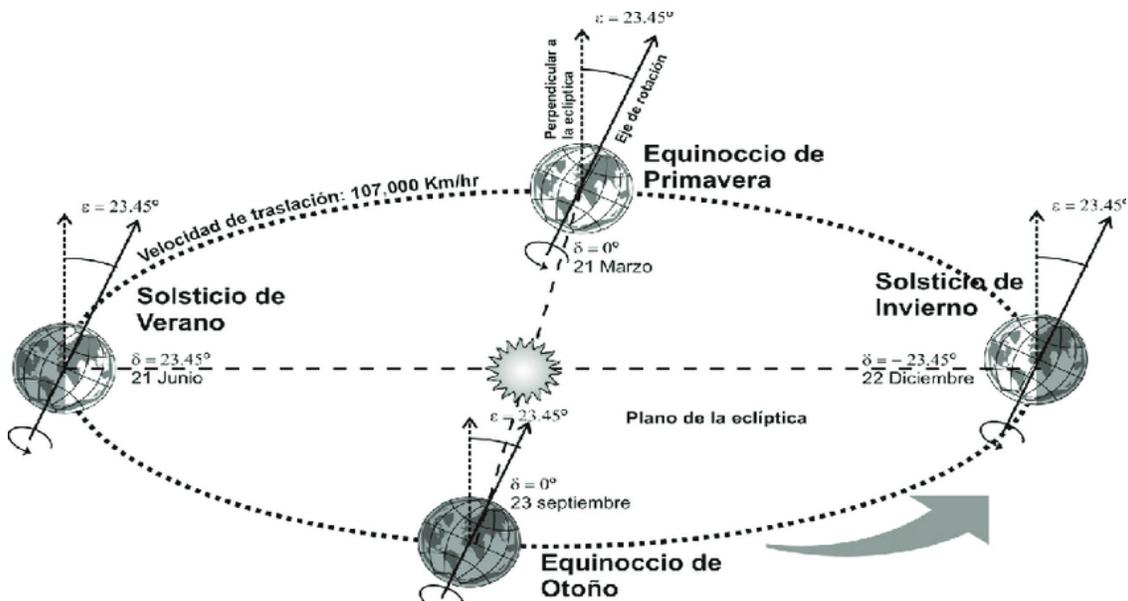


Figura 2.4-1 Declinación solar en el año. Fuente: (García A. O., 2021)

2.4.2 Condiciones meteorológicas

El planeta donde vivimos posee una atmósfera densa, por lo que gran parte de la energía solar que nos llega se pierde al atravesarla.

La disminución en la radiación solar se debe a procesos complejos de absorción, dispersión y reflexión, realizados por componentes atmosféricos como: nubes, gases, vapor de agua, aerosoles, niebla entre otras partículas suspendidas.

En días despejados se recibe una mayor cantidad de radiación directa, y mientras que en días nublados predomina la radiación difusa en la superficie.

2.4.3 Condiciones geográficas

Las variables geográficas como: la latitud y la orografía de cada lugar influyen en la intensidad de la radiación solar.

Latitud

Se define como el ángulo ϕ formado por la vertical a la Tierra y el plano del Ecuador. La latitud es positiva cuando se localiza sobre el hemisferio norte y negativa cuando se localiza en el hemisferio sur.

Durante el solsticio de verano, que sucede el 22 de junio, el hemisferio norte se inclina hacia el sol, por lo que esta zona recibe más horas de radiación. (Riveros, 2011)

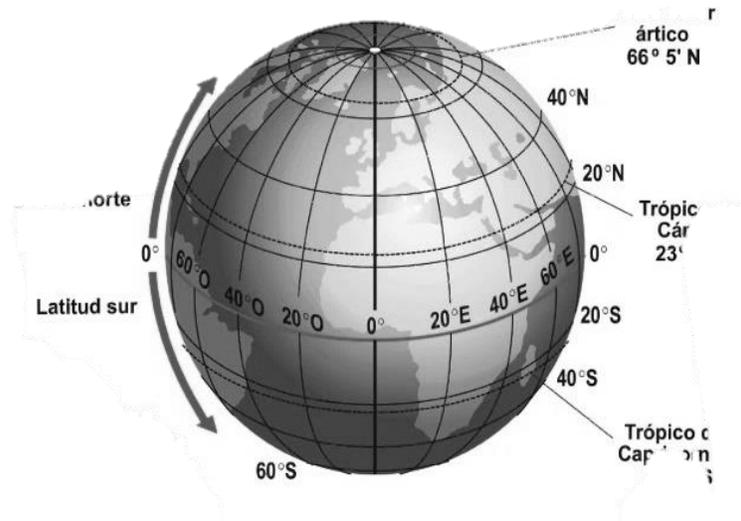


Figura 2.4-2 Medición del ángulo de latitud y ubicación de los paralelos con respecto al ecuador. Fuente: (Riveros, 2011)

Situación contraria al solsticio de invierno, que se presenta el 21 de diciembre, cuando los rayos solares llegan al hemisferio norte durante menos tiempo, debido a que el polo norte se encuentra inclinado 23.5° en dirección opuesta al Sol, ocasionando que todos los puntos geográficos con latitud mayor a 66.5° N tengan 24 horas sin luz solar. Para indicar si es latitud norte o sur se usan las letras N y S respectivamente como se muestra en la Figura 2.4-2.

Orografía de cada lugar.

La disposición y la orientación del relieve puede limitar la llegada de las masas de aire. En zonas montañosas elevadas, las masas de aire chocan con estos obstáculos, se elevan y como resultado la temperatura disminuye con la altitud.

También la presencia de montañas produce cambios en los patrones de precipitación, la existencia de nubes en la atmosfera influye considerablemente en la intensidad de radiación solar.

2.4.4 Condiciones geométricas

El posicionamiento del Sol con respecto a una superficie inclinada se puede conocer mediante la utilización de fórmulas de geometría solar. (Riveros, 2011) Los conceptos relacionados al cálculo solar son:

- Latitud geográfica [φ].

Es el ángulo formado entre un plano perpendicular y el ecuador. Al polo norte es positivo y al sur negativo.

- Declinación solar [δ].

Es la posición angular del Sol al medio día solar, respecto del plano del ecuador. La declinación solar es cero, los días de equinoccios (marzo y septiembre).

- Pendiente del plano [β].

Es el ángulo formado entre la superficie del plano y la horizontal.

- Ángulo de acimut superficial [γ].

Se refiere al ángulo que forma la perpendicular al plano tangente a la superficie, respecto del meridiano local.

Para el sur tiene un valor de 0° . Hacia el este, toma valores negativos y hacia el oeste positivos ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).

- Ángulo horario [ω].

El Sol en su movimiento aparente diario recorre 15° cada hora. En horas antes al medio día es negativo y en horas posteriores positivo.

TABLA 2.4-1 VALORES CORRESPONDIENTES AL ÁNGULO HORARIO.

8:00	$\omega=+60^\circ$
9:00	$\omega=+45^\circ$
10:00	$\omega=+30^\circ$
11:00	$\omega=+15$
12:00	$\omega=+0^\circ$
13:00	$\omega=-15^\circ$
14:00	$\omega=-30^\circ$
14:30	$\omega=-37.5$

Fuente: (Riveros, 2011)

- Ángulo de incidencia [θ].

Es el ángulo entre la radiación directa y la perpendicular al plano receptor. Se relaciona con los otros ángulos mediante la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma$$

$$+ \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

(2.4)

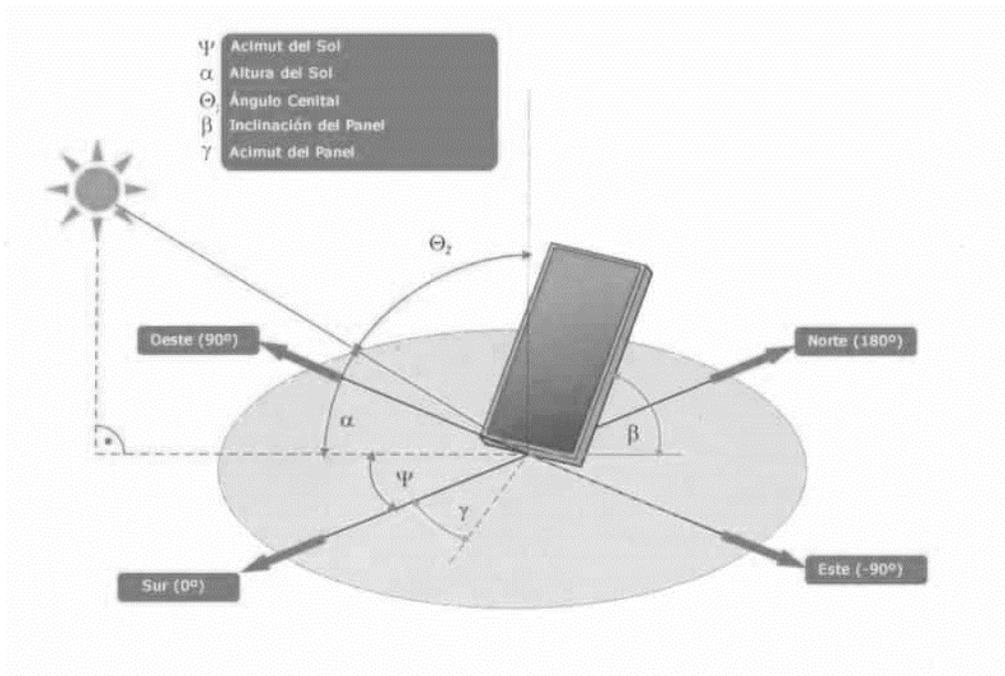


Figura 2.4-3 Ángulos zenit, de inclinación, acimut superficial y de acimut solar para una superficie inclinada. Fuente: (Lorenzo, 2021)

- Ángulo cenital [θ_z].

Es el ángulo de la posición del Sol respecto de la normal del plano.

- Ángulo de altitud solar [α].

Es el ángulo formado entre la radiación directa del Sol y el plano horizontal.

- Ángulo de acimut solar [γ_s o Ψ].

Es el desplazamiento angular medido desde el sur hacia la proyección de la radiación solar sobre un plano horizontal.

La ecuación (2.4) se simplifica para una superficie horizontal, donde $\beta = 0$, por lo que $\sin \beta = 0$ mientras que $\cos \beta = 1$.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2.5)$$

Empleando relaciones establecidas para el ángulo de incidencia θ sobre superficies inclinadas con un ángulo β , para una latitud artificial $(\varphi - \beta)$ se obtiene:

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (2.6)$$

Considerando que, al salir el Sol, y al ocultarse, siempre tiene un ángulo cenital de 90° .

Se resuelve la ecuación (2.4) para obtener el ángulo horario en el ocaso:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \quad (2.7)$$

Para representar ω_s en horas con respecto al momento en el que el sol esta en su punto más alto, se usa la siguiente relación:

$$\omega_s = \pm \frac{24}{360} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (2.8)$$

De la ecuación anterior se obtiene el número de horas-luz por día:

$$n = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta)$$

(2.9)

2.5 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

En el diseño de sistemas de aprovechamiento de energía solar, como son las estufas solares, se requiere calcular la radiación instantánea horaria, diaria o mensual que incide sobre cualquier superficie orientada e inclinada.

Estos cálculos se realizan como se presenta a continuación.

2.5.1 Radiación directa sobre una superficie horizontal

La radiación extraterrestre, que incide sobre una superficie horizontal es:

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cos \theta_z$$

(2.10)

Donde G_{sc} es la constante solar, n es el número del día del año y θ_z es el ángulo cenital. Combinando esta ecuación con la del coseno del ángulo cenital, se obtiene:

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

(2.11)

Para calcular la irradiancia directa diaria H_0 sobre un plano horizontal, se requiere integrar la ecuación anterior, en un periodo de tiempo, desde el amanecer hasta la puesta del Sol:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (2.12)$$

Considerando un periodo comprendido con ángulos horarios ω_1 y ω_2 , la radiación solar extraterrestre incidente sobre una superficie horizontal está dada por:

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] x \left[\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (2.13)$$

2.5.2 Radiación en un día despejado

La atmósfera ejerce un efecto que distribuye la energía proveniente del Sol, dependiendo de las condiciones atmosféricas presentes la radiación global que incide sobre una superficie puede estar compuesta en mayor cantidad de radiación directa (I_{cb}) o difusa (I_{cd}). El desarrollo de modelos que puedan predecir con precisión la posición, la densidad y otras características de las nubes, representa un gran reto.

Sin embargo, existen diversos modelos para poder estimar la radiación solar para días despejados. El modelo más conocido para conocer dicha radiación fue desarrollado por

Hottel. (Hottel, 1976) Este modelo expresa la transmitancia atmosférica, en función del ángulo cenital, de la altitud y del tipo de clima. El modelo se presenta a continuación:

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 e^{-k/\cos\theta_z} \quad (2.14)$$

Donde α_0 , α_1 y k son parámetros atmosféricos estándar considerando una visibilidad de 23 km.

Se calculan con las siguientes relaciones:

$$\alpha_0 = r_0 [0.4237 - 0.00821(6 - A)^2] \quad (2.15)$$

$$\alpha_1 = r_1 [0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2] \quad (2.16)$$

$$k = r_k [0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2] \quad (2.17)$$

Los valores de las diversas r se estiman considerando cuatro tipos de clima como se muestra en la tabla 2.5-1.

TABLA 2.5-1 FACTORES DE CORRECCIÓN SEGÚN EL TIPO DE CLIMA.

Tipo de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano, latitud media	0.97	0.99	1.02
Verano subártico	0.99	0.99	1.01

Invierno, media	latitud	1.03	1.01	1.00
----------------------------	----------------	------	------	------

Fuente: (Riveros, 2011)

La radiación directa normal sobre la superficie terrestre para un cielo despejado es:

$$G_{cbn} = G_{on} * \tau_b \quad (2.18)$$

Siendo G_{on} la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal.

La radiación solar directa sobre una superficie horizontal en una atmósfera clara G_{cb} , está dada por la ecuación:

$$G_{cb} = \tau_b * G_{on} \cos \theta_z \quad (2.19)$$

Para períodos de una hora, la radiación directa sobre una superficie horizontal en un día despejado es:

$$I_{cb} = \tau_b * I_{on} \cos \theta_z \quad (2.20)$$

Para conocer la radiación total incidente sobre una superficie horizontal es necesario estimar la radiación difusa I_{cd} . (Liu & Jordan, 1960) Para días despejados la transmitancia a la radiación difusa se estima por la ecuación:

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939\tau_b$$

(2.21)

τ_d se relaciona con la ecuación 2.19, por lo que la radiación difusa para una superficie horizontal, en día despejado es:

$$G_{cd} = \tau_d * G_{on} \cos \theta_z$$

(2.22)

Por último, la radiación total está dada por la ecuación:

$$I_c = I_{cb} + I_{cd}$$

(2.23)

2.5.3 Radiación solar sobre una superficie inclinada

La relación entre la radiación solar directa sobre una superficie inclinada y la radiación solar sobre una superficie horizontal está dada por el factor geométrico R_b .

$$R_b = \frac{G_{bt}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cos \theta}{G_{bn} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

(2.24)

Para colectores solares planos, el ángulo acimut óptimo es 0° para el hemisferio norte y 180° para el hemisferio sur. Por ello, las ecuaciones (2.5) y (2.6) se pueden usar para determinar $\cos \theta_z$ y $\cos \theta$, respectivamente, para el hemisferio norte con $\gamma = 0^\circ$

$$R_b = \frac{\cos(\theta - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$$

(2.25)

Para estimar la radiación solar total sobre superficies inclinadas, se necesita conocer el valor de R, el cual se obtiene con:

$$R = \frac{\text{Radiación total sobre superficies en un plano inclinado}}{\text{Radiación total sobre superficies en un plano horizontal}} = \frac{H_T}{H}$$

(2.26)

Luego, la radiación total sobre superficies inclinadas es:

$$H_T = R * H$$

(2.27)

2.5.4 Radiación solar en la república mexicana

México es uno de los países con mayor radiación solar en el mundo, en promedio el país recibe entre 5 a 6 kWh/ m² al día durante todo el año (Figura 2.5-1); en invierno las horas de luz solar son en promedio de 11, mientras que en verano son 13 horas.

La Figura 2.5-1, muestra un panorama global de la radiación solar en México, en donde la región del norte presenta un mayor nivel de radiación solar. Los estados de Sonora y Chihuahua tienen abundancia del recurso, sin embargo, presenta fuertes variaciones estacionales; en cambio en regiones como Puebla, Oaxaca y parte de Morelos, son ideales para su explotación a lo largo del año. (Lopez, 2022)

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION
MEXICO

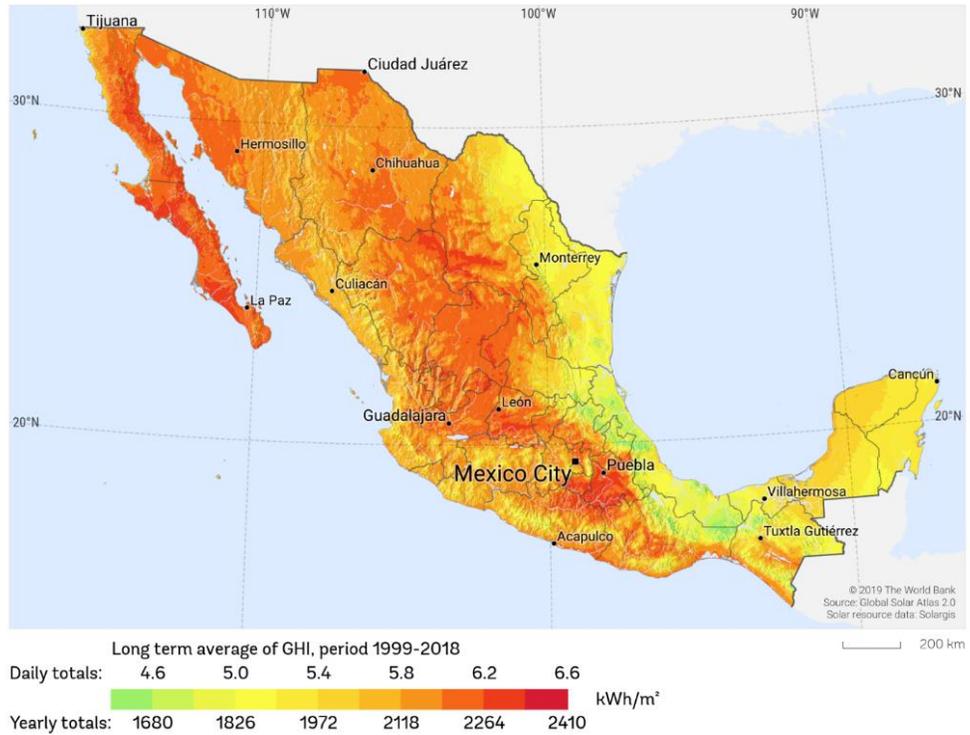


Figura 2.5-1 Radiación solar en México. Fuente: (The World Bank Group, 2019)

CAPÍTULO 3 ESTUFAS SOLARES

3.1 HISTORIA DE LAS ESTUFAS SOLARES

Durante años se han desarrollado múltiples diseños de estufas y hornos solares que permitan aprovechar la energía del Sol para cocinar alimentos de una forma más sustentable evitando así, el uso leña o combustibles fósiles.

La primera estufa solar fue desarrollada por el naturalista suizo Horace de Saussure en 1767, su diseño de colector plano consistía en una caja negra cubierta con vidrio. La temperatura alcanzada fue de 87.5°C. (González, 2017)

Posteriormente, a mitad del siglo XIX se experimentó para poder aprovechar la energía solar con el fin de calentar agua y poder generar vapor. En 1866 el científico francés Auguste Mouchot produjo el primer colector solar parabólico del mundo. Utilizando espejos parabólicos, el colector enfocaba los rayos del Sol dentro de un tubo de metal el cual contenía agua. El agua hervía y producía vapor, que luego se utilizaba para impulsar un motor.

Después de años, trabajando con su compañero Abel Pifre para perfeccionar su invención. El generador solar de vapor se presentó en la Exposición Universal de París de 1878. La máquina tuvo éxito y reconocimientos de todo tipo. Lamentablemente nadie tuvo interés para financiar la tecnología, debido al bajo precio del carbón. (Estévez, 2018)

En el siglo XX el estadounidense C.G. Abbot desarrolló diversas estufas. Para lograr concentrar la radiación solar en una tubería, uso espejos cilíndrico- parabólicos; por su

elevado costo fue poco implementado su diseño. En la India en 1953 M.L. Ghai utilizó un reflector parabólico con una olla sostenida en el foco, para poder cocinar alimentos.

En la actualidad el uso de la energía solar para cocinar aún no se ha adoptado plenamente, debido a que se necesitan estufas solares sencillas de construir y que no presenten inconvenientes operativos de diseños anteriores.

3.2 ESTUFAS SOLARES EN MÉXICO

Los primeros dispositivos solares en México fueron donados por la Universidad de Wisconsin en 1955, para combatir el problema de alto consumo de leña en varias zonas rurales del país. Las estufas solares eran de una forma similar a una sombrilla invertida y superficie aluminizada. (Mejía, 2008)

Posteriormente, varias instituciones mexicanas desarrollaron diversas estufas solares; en 1995 la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) diseño un prototipo cuya estructura era de madera con paredes interiores de lámina de aluminio. La cubierta tenía doble vidrio y el reflector estaba forrado con lámina de acero inoxidable. (Martínez & Guevara, 2008)

Por otra parte, la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) desarrollo estufas y comales solares usando la “óptica de no enfoque” con concentradores del tipo CPC (Concentrador Parabólico Compuesto). Este diseño se conoce como “Tolokatsin”, y tiene temperaturas de operación de entre 70 y 120°C. (Rincon, Moreno, & Vera, 1997)

En cuanto al Instituto Politécnico Nacional (IPN), en 1999 creó una estufa solar en forma de caja con reflectores internos de múltiples pasos, la cual alcanzo temperaturas cercanas a los 100°C. (Martínez H. , 1999)

Hoy en día, el uso de estas tecnologías se ha extendido más desde la invención de Internet. Ahora es posible aprender a construir estufas y hornos solares caseros que no requieran materiales costosos.

3.3 CLASIFICACIÓN DE ESTUFAS SOLARES

Existe una gran variedad de estufas solares creadas a lo largo de la historia, en general se pueden clasificar por el principio de funcionamiento en el que se basan para aprovechar la radiación solar; por acumulación o concentración.

3.3.1 Estufas solares de concentración

Las estufas solares de este tipo pueden clasificarse de dos formas de tipo panel y con concentrador parabólico.

3.3.1.1 Estufas tipo panel

Las estufas de panel poseen una estructura abierta con paneles reflectores en su interior, pueden estar hechos de papel de aluminio sobre cartón corrugado, o paneles de hojalata o chapa pulida a alto brillo y también espejada.

Los rayos del sol inciden y se redirigen al centro de la estructura, alcanzando temperaturas entre 110 y 130 °C. Para ser usadas necesitan ser “precalentadas” por varias horas en luz directa. (García J. , 2002)

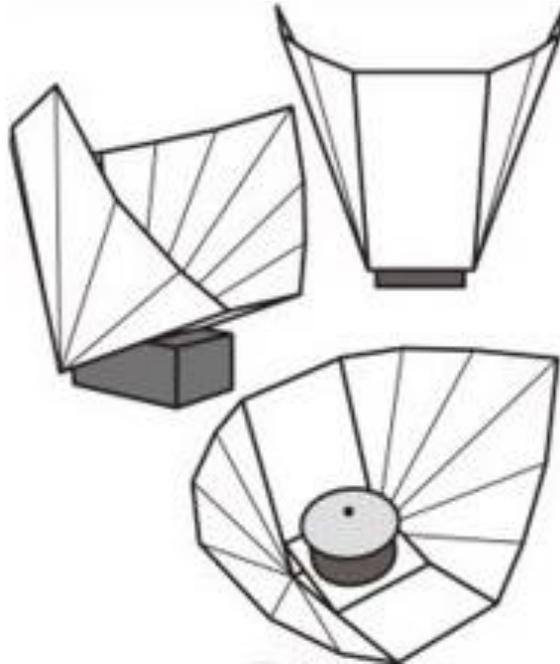


Figura 3.3-1 Estufa solar tipo panel. Fuente: (García J. , 2002)

3.3.1.2 Estufa solar parabólica

Las estufas solares parabólicas, por medio de espejos y superficies reflectantes concentran y enfocan la mayor cantidad de luz solar en su centro (foco). Pueden alcanzar temperaturas más altas rápidamente (entre 200 °C y 300 °C) y tienen la capacidad de calentar rápidamente los recipientes por lo que aumenta su eficiencia térmica.

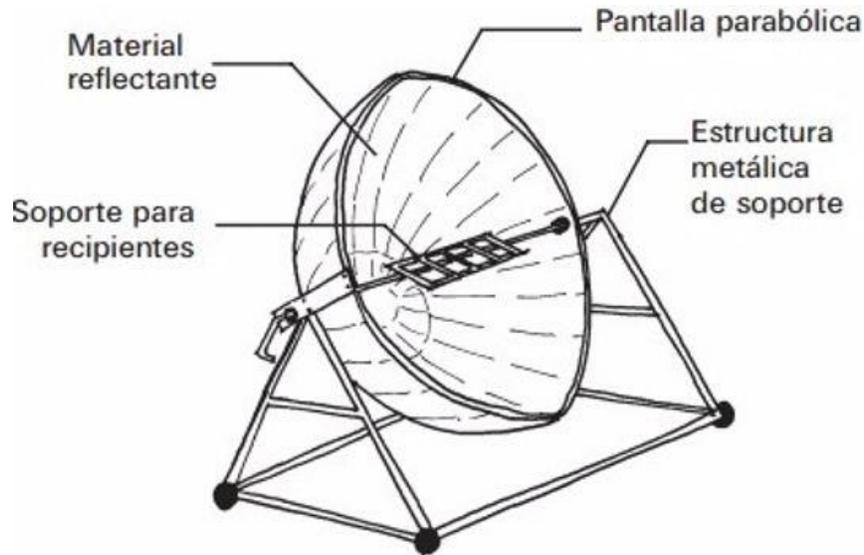


Figura 3.3-2 Concentrador solar parabólico. Fuente: (Sharma, 2004)

Por otro lado, entre sus inconvenientes podemos destacar su alto precio, gran tamaño, temperatura incontrolable, riesgo de quemar los alimentos o incluso a las personas que están cocinando, así mismo no suelen estar bien aislados y requieren constantemente ajustarse y ser redireccionadas para seguir la dirección del sol. (Sharma, 2004)

3.3.2 Estufas solares de acumulación

Las estufas solares de acumulación logran la cocción de alimentos por el calor generado mediante efecto invernadero. El modelo más conocido que aplica este principio es la estufa solar tipo caja. Su diseño como se observa en la Figura 3.3-3 consta de cubierta de vidrio transparente, un área de cocción con forma de caja cubierta por aislante térmico, una placa absorbente; además, pueden usar reflectores para incrementar la ganancia de calor. (García J. , 2002; M. Gonzales, 2018; Salazar, 2022)

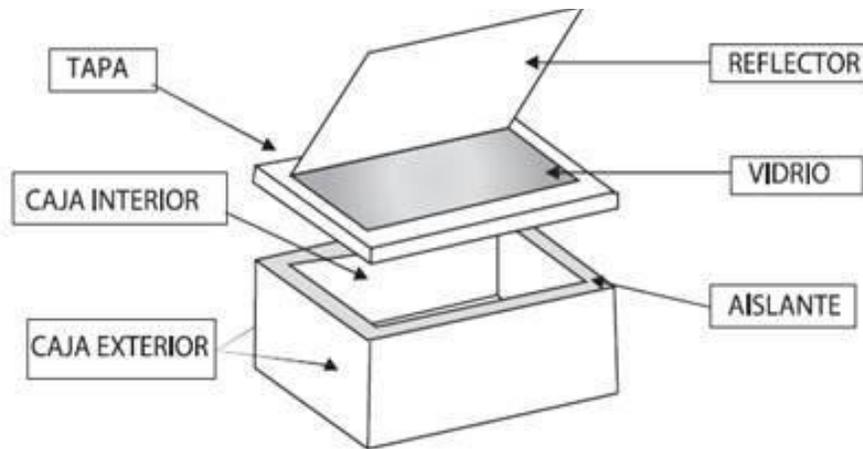


Figura 3.3-3 Partes de estufa u horno solar. Fuente: (García J. , 2002)

El vidrio es un factor clave en el efecto invernadero, porque funciona de dos maneras; la primera es al permitir el paso de los rayos de luz, esto provocando el calentamiento del interior de la caja y la segunda evita la pérdida de calor en forma de radiación infrarroja emitido por la superficie caliente. El aislante térmico se encuentra entre la caja exterior e interior, impide salga calor del interior; así como evita entre aire frío a la caja. En la parte inferior de caja, se encuentra la placa de absorción como su nombre lo indica su función es absorber la mayor cantidad de calor, por lo que para asemejar su comportamiento a un cuerpo negro es pintada de dicho color.

Según estimaciones, se puede alcanzar una temperatura cercana a los 100°C, suficiente para una cocción a base de ebullición; sin embargo, es posible que este método no funcione como se espera cuando se cocinan alimentos con requisitos de energía más altos, porque es posible que no se cocinen tan rápido o que tarden más tiempo, tiene una eficiencia aproximada de 36%. En el caso de la purificación de agua se requiere está

alcance una temperatura de 63°C y se mantenga por deje en la estufa de 1 a 2 horas para poder destruir los gérmenes. (Pilatosky, Figueroa, & Martínez, 2009)

Este tipo de estufa tiene algunos beneficios, como por ejemplo requiere poco monitoreo en el proceso de cocción, no produce deslumbramiento, no presenta riesgo de incendio o quemaduras y mantiene el calor de los alimentos durante un período prolongado de tiempo. (García J. , 2002)

3.3.2.1 Reflectores

En el proceso de incrementar la eficiencia de una estufa solar tipo caja se descubrió que una forma de hacerlo es mediante el empleo de superficies reflectantes de luz que ayuden a lograr mayor aprovechamiento de energía radiante.

Los reflectores pueden usar de dos maneras:

- **Externa**

Los reflectores colocados de forma externa redireccionan los rayos a la ventana de cristal lo que permite una mayor caja mayor captación de energía solar, como se muestra en la Figura 3.3-4.

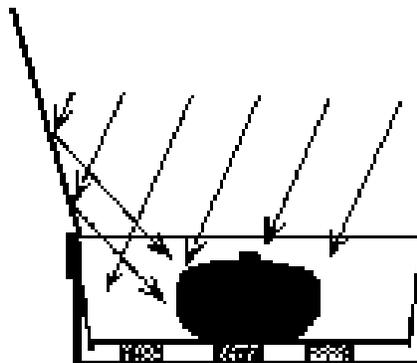


Figura 3.3-4 Incidencia y reflexión de rayos solares. Fuente: (Bayray, 2013)

- **Interna**

Por otro lado, se han llevado a cabo pruebas en estufas solares de tipo caja con y sin reflectores internos. Las pruebas mostraron que las estufas solares con reflectores internos tenían una mayor temperatura en el área de cocción (placa absorbente y recipiente de cocción) superando por hasta 22°C en comparación con las que no los tenían, esto debido a la mayor acumulación de calor, generado por la reflexión interna (Bayray, 2013).

3.3.2.2 Materiales reflectores

En la implementación de reflectores para una estufa solar tipo caja es importante elegir un material que cumpla con las siguientes características:

- Alta reflectividad
- Resistencia ante las condiciones meteorológicas adversas
- Durabilidad a largo plazo
- Poder conservar sus propiedades reflectantes con el transcurso del tiempo

La reflectividad de un material se expresa en porcentajes, esta propiedad describe la relación entre la luz reflejada por una superficie y la luz incidente sobre ella. La Tabla 3.3-1 muestra la reflectividad de diversos materiales:

TABLA 3.3-1 REFLECTIVIDAD DE DIVERSOS MATERIALES.

MATERIAL	REFLECTIVIDAD
Acero dulce estañado	49%
Cromo	51%
Zinc pulido	54%
Níquel pulido	60%
Acero dulce galvanizado	64%
Espejo	82%
Aluminio comercial	85%
Aluminio altamente pulido	89%
Acero inoxidable pulido	90%

Fuente: (Larsen, 2014)

Los materiales usados en estufas solares comúnmente son espejos (82%), acero inoxidable pulido 301 (90%) y aluminio altamente pulido (89%). (Larsen, 2014)

3.3.2.3 Cocción de alimentos

La cocción de alimentos en las estufas solares de este tipo se realiza como se mencionó por la acumulación de calor en su interior. Las horas más adecuadas para usarlas en México son de 10 am. a 3 pm., debido a que los rayos solares inciden con mayor

intensidad y la temperatura del ambiente es alta. Para cocinar con ayuda del Sol se requiere cielo despejado, así como poca cantidad de viento.

Los recipientes para la cocción de alimentos pueden ser de cualquier material, con una única característica específica de color oscuro; negro opaco, verde o azul, ya que de esta manera que absorben más radiación.

A las estufas solares de acumulación también se les conoce como hornos solares debido a que no se puede freír o asar en ellas, solo se pueden preparar estofados y caldos.

En México se consumen cuatro granos básicos: maíz, trigo, arroz y frijol; en la Tabla 3.3-2 se muestre el tiempo de cocción de estos granos, así como el de otros alimentos en incluidos en la alimentación mexicana. (SEGALMEX, 2021)

TABLA 3.3-2 TIEMPO DE COCCIÓN DE ALGUNOS ALIMENTOS EN ESTUFA SOLAR ACUMULACIÓN.

1 a 2 horas	2 a 3 horas	3 a 4 horas	5 a 8 horas
Huevos	Pollo	Maíz	Frijoles
Arroz	Pescado	Lentejas	Garbanzos
Fruta		Res	
Vegetales		Puerco	
		Pan	
		Habas	
		Papas	

Fuente: (Macía, 2005).

3.4 EFICIENCIA TÉRMICA DE UNA ESTUFA SOLAR TIPO CAJA

Para determinar la eficiencia térmica de una estufa solar tipo caja en términos de porcentaje, se requiere conocer datos como la cantidad total de "calor útil" y la irradiación que incide en la estufa. Esto se relaciona mediante la ecuación 3.1.

$$\eta = \frac{m(u_{final} - u_{inicial})}{I_{av} * A_c * \Delta t} \quad (3.1)$$

Donde

m : masa del agua [kg]

u : energía interna específica [J/kg]

I_{av} : irradiación promedio para el lugar [W/m²]

A_c : área de apertura de la cubierta [m²]

t : tiempo [s]

La variación de energía interna está planteada en el sistema cerrado del recipiente de cocción y este se puede determinar en función del cambio de temperatura del agua usando la siguiente ecuación.

$$m(u_{final} - u_{inicial}) = m_w C_{pw} \Delta T \quad (3.2)$$

Donde

m_w : masa del agua [m²]

C_{pw} : calor específico del agua, 4168 [J/kg K]

ΔT : diferencia de temperatura [K]

Por lo que sustituyendo 3.2 en 3.1 la eficiencia de una estufa solar tipo caja se obtiene mediante:

$$\eta = \frac{m_w C_{pw} \Delta T}{I_{av} * A_c * \Delta t} \quad (3.3)$$

3.5 POTENCIA DE COCCIÓN

La potencia de cocción hace referencia a la cantidad de energía aprovechable que se puede obtener durante el período de calentamiento de un fluido.

La potencia de cocción de una estufa solar tipo caja se obtiene usando la siguiente ecuación. (González & Campuzano, 2014)

$$P = \frac{T_{w2} - T_{w1}}{t} m_w C_{pw} \quad (3.4)$$

Donde:

T_{w2} : temperatura final del agua [°C]

T_{w1} : temperatura inicial del agua [°C]

CAPÍTULO 4 DISEÑO

En el desarrollo de proyectos de ingeniería se requieren herramientas computacionales que permitan diseñar en 3D, así como realizar la simulación de los diseños para identificar fallas y poder optimizarlos. Una de estas herramientas es el diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) en este rubro SolidWorks es uno de los programas más completos ya que brinda opciones de diseño, manufactura y simulación.

Por ello se eligió este programa para el modelado de la estufa solar tipo caja “prisma hexagonal” porque además de las ventajas antes mencionadas es un programa con el que se encuentra familiarizado y ofrece una licencia de estudiante. La versión utilizada fue SolidWorks 2019.

4.1 COMPONENTES DE ESTUFA SOLAR

Como se mencionó en el capítulo anterior las estufas de este tipo están formadas por varias capas: estructural, aislante y reflejante.

Existen diversos materiales que se pueden emplear para construir un horno solar de forma casera como cartón para la estructura y papel aluminio para reflejante, sin embargo, se pensó que de ser implementado en la vida diaria el modelo “prisma hexagonal” su utilización sería constante por lo que se debe considerar materiales resistentes y duraderos.

El modelo de estufa solar tipo caja convencional y el de prisma hexagonal funcionan por el mismo principio que es el de acumulación, por lo que para igualar las condiciones de operación los materiales seleccionados para su diseño fueron los mismos.

En la Tabla 4.1-1 se muestran las características y propiedades de los materiales usados en cada capa.

TABLA 4.1-1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA ESTUFA SOLAR.

Capa	Espesor	Material
Madera	1cm	Pino
Aislante	2cm	Poliestireno
Reflejante	0.5cm	Aluminio
Cubierta	4mm	Vidrio

Fuente: Elaboración propia.

4.2 ÁREA DE COCCIÓN

El recipiente de cocción y la placa absorbadora forman parte del área de cocción en los hornos solares. La placa debe absorber la mayor cantidad de calor para transferirlo por conducción al inferior del recipiente de cocción por lo que para cumplir este objetivo se seleccionó el material de lámina lisa de aluminio, aunque no puede ser pintada de negro

como en un modelo convencional real, para la simulación se configura como una pared de cuerpo negro “blackbody wall”.

En cuanto al material del recipiente este debe cumplir con las características de ser opaco y obscuro como se mencionó en el capítulo 3, ya que complementa la función de la placa absorbadora en el proceso de cocción de los alimentos, el material seleccionado fue aluminio color negro con la característica de superficie de “blackbody wall” para complementar la función de la placa absorbadora. Respecto a la capacidad del recipiente en las estufas solares de acumulación el volumen estándar es de 1.5 a 2 litros. (Seth,2020) Para cocinar una mayor cantidad de comida, el volumen elegido fue 2 litros (3 personas).

Es importante recordar que en las estufas de acumulación el agua es la que sirve de medio para cocer los alimentos por lo que solo se puede hacer platillos como caldos o estofados a diferencia de las estufas de concentración donde se puede freír y asar.

La Figura 4.2-1 muestra las dimensiones en centímetros del recipiente de cocción.

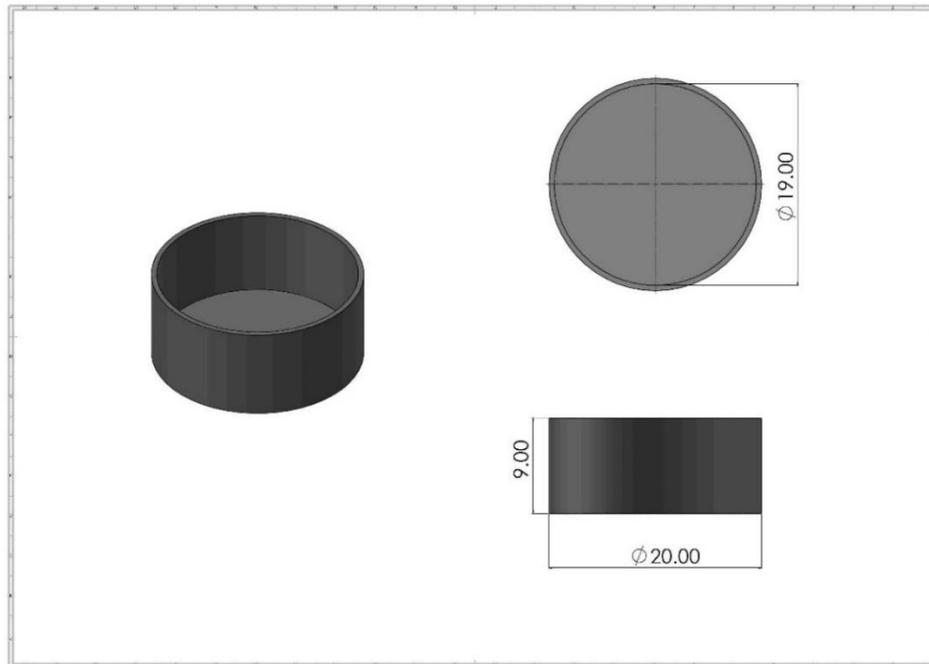


Figura 4.2-1 Dimensiones del recipiente de cocción a) vista superior b) vista lateral. Fuente: Elaboración propia.

4.3 DIMENSIONES DE LA ESTUFA SOLAR TIPO CAJA CONVENCIONAL

Por la relación que existe entre la estufa solar y el recipiente de cocción, el volumen de la olla mencionado anteriormente sirvió como base para estimar las dimensiones de ambos modelos de estufas solares: caja convencional y prisma hexagonal.

Las capas que conforman a la estufa solar caja convencional: estructural, aislante y reflejante se diseñaron cada una por separado en Solid Works, esto con la finalidad de poder asignar el material y grosor. El ensamblaje final del modelo convencional se aprecia en la Figura 4.3-1 este modelo tiene reflejante en su interior, sin embargo, no cuenta con reflectores colocados de forma inclinada.

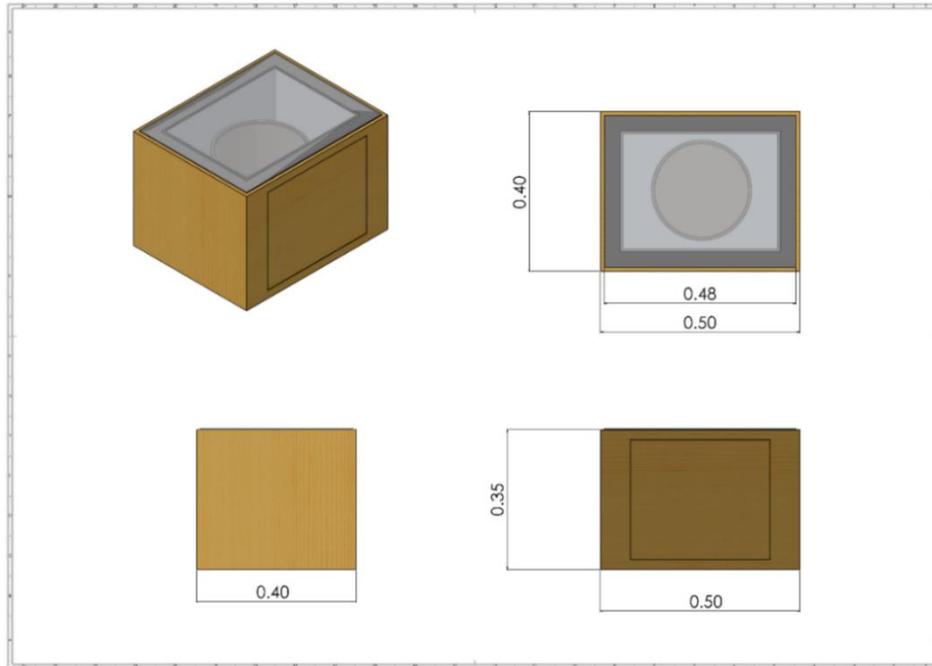


Figura 4.3-1 Dimensiones de estufa solar tipo caja a) vista superior b) vista lateral c) vista frontal.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 DIMENSIONES DE LA ESTUFA TIPO CAJA “PRISMA HEXAGONAL”

La propuesta de diseño se hizo tomando como referencia el principio de acumulación de las estufas solares tipo caja, pero cambiando la geometría por la de un prisma hexagonal. Dicha geometría forma ángulos en su interior, por lo que, al cubrirse de aluminio, estos ángulos funcionan como reflectores inclinados, aumentando la eficiencia de la estufa solar, como se menciona en la hipótesis el empleo de estos reflectores propicia una mayor reflexión interna y a su vez incrementa la temperatura en comparación de un modelo de estufa solar tipo caja convencional. La Figura 4.4-1 muestra el ensamble final del modelo propuesto.

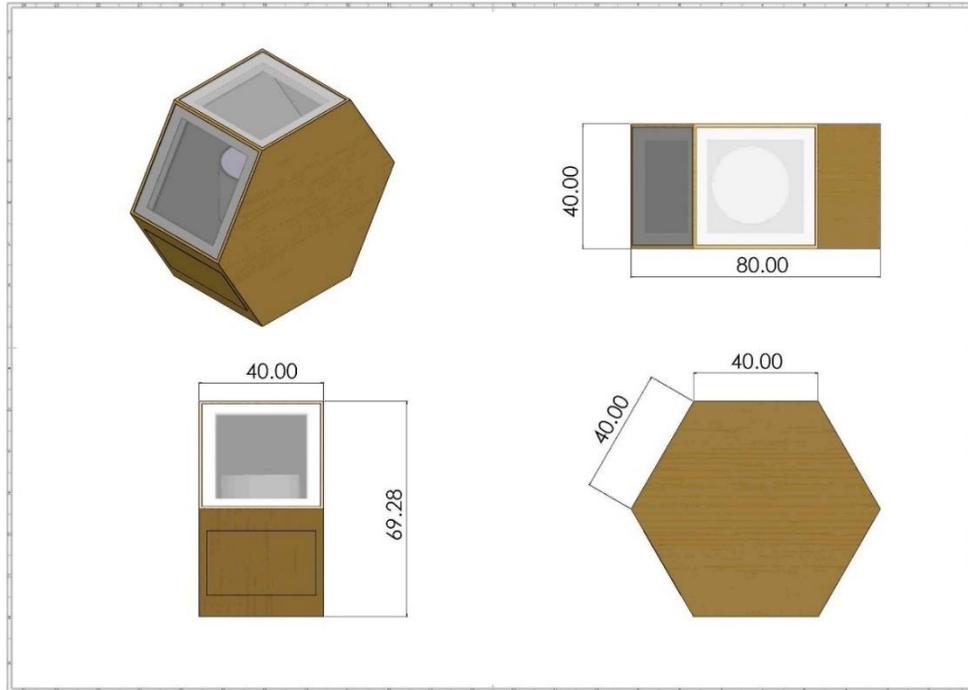


Figura 4.4-1 Dimensiones de la estufa solar "prisma hexagonal".

a) vista superior b) vista lateral c) vista frontal. Fuente: Elaboración propia.

El diseño también busco mantener la característica de fácil manejo presente en las estufas solares de acumulación, además, se determinó colocar dos ventanas en vez de una para evitar la necesidad de estar reorientando constantemente como sucede en un modelo convencional.

Las áreas de otros componentes como el reflector y la cubierta de la estufa solar tipo caja convencional y la estufa solar tipo "caja prisma hexagonal" se presentan en la Tabla 4.4-1, junto con datos del recipiente y el volumen del fluido. El área de la cubierta o área de apertura se usará posteriormente para calcular la eficiencia.

TABLA 4.4-1 DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE AMBOS MODELOS.

Estufa solar	Área de la cubierta [m²]	Área del reflector [m²]	Área tapa del recipiente [m²]	Fluido (agua)
Convencional	0.12	0.42	0.0314	2
Prisma hexagonal	0.096	1.03	0.0314	2

Fuente: Elaboración propia.

4.5 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN

4.5.1 Estufa solar tipo caja convencional

La estructura de la estufa solar tipo caja convencional, se conforma por 2 cuadrados y 4 rectángulos, de los cuales uno es la ventana de cristal, por lo que solo se considera 3 como parte del diseño estructural, aislante y reflejante.

Para elaborar la parte estructural se puede hacer sobre un panel de madera de pino de 1.22 m x 0.6 m. En la Figura 4.5-1 se observa cómo sería la distribución de los tres rectángulos en el panel de madera, por lo que para poder armar toda la estructura se necesitarían dos, esto se detalla en la Tabla 4.5-1 junto con el resto de los materiales necesarios para la estimación de presupuesto.

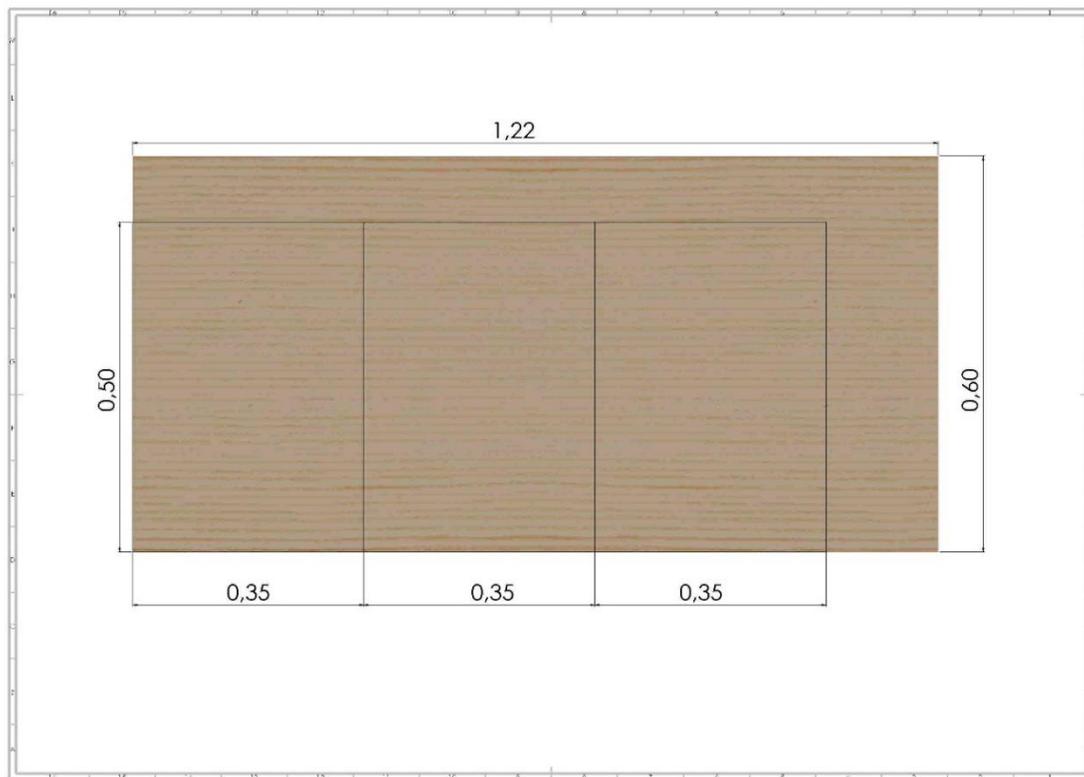


Figura 4.5-1 Distribución de los cortes en el panel de madera. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4.5-1 PRESUPUESTO DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESTUFA SOLAR TIPO CAJA CONVENCIONAL.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	SUBTOTAL (\$)
Parte estructural				
Tabla de pino cepillada 122x60x1cm	Pieza	2	107	214
Parte aislante				
Placa de poliestireno 150cmx100cmx2.5cm	Pieza	1	60	60
Parte reflejante				
Lamina de espejo 40cmx60cmx0.5cm	Pieza	5	148	740
Parte absorbadora				
Lámina galvanizada lisa (24') 50cmx50cm	Pieza	1	200	200
Cubierta				
Vidrio 40x30cm	Pieza	2	75	150
Componentes de ensamble				
Bisagras 7.62X7.62cm	Pieza	2	22	44
Clavos de madera 1' ½ 100gr	Kg	1	10	10
Pegamento Resistol 850 de 250 gr	Pieza	1	42	42
			TOTAL	\$1,440

Fuente: Elaboración propia.

El costo total para el modelo convencional sería de \$1,440 sin considerar la herramienta y la mano de obra.

4.5.2 Estufa solar tipo caja “prisma hexagonal”

En caso de que en un futuro el modelo propuesto de estufa solar tipo caja “prisma hexagonal” se llevara a la parte experimental, se requiere conocer el presupuesto necesario para poder construirlo. En este sentido el desarrollo plano del diseño estufa solar propuesta, tiene como estructura 6 cuadrados y 2 hexágonos, de los cuales dos son ventanas de cristal por lo que solo se considera 4 para la estimación de presupuesto de la estructura, el aislante y el reflejante.

En un panel de madera de 2.44 x 1.22 m. es suficiente para la distribución de las figuras que conforman la parte estructural como se muestra en la Figura 4.5-2.

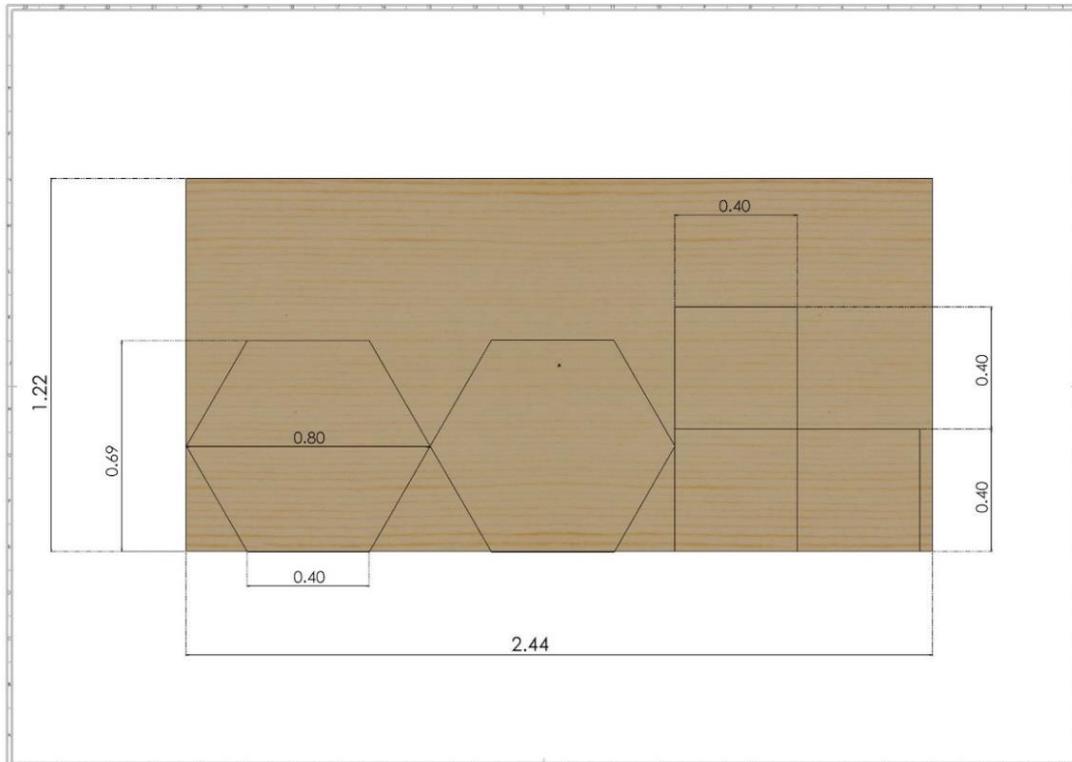


Figura 4.5-2 Distribución de los cortes en el panel de madera. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4.5-2 muestra los demás materiales necesarios para la construcción del modelo propuesto de estufa solar tipo caja “prisma hexagonal”. El costo total sería de \$3,506 sin considerar la herramienta y la mano de obra.

TABLA 4.5-2 PRESUPUESTO DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESTUFA SOLAR CAJA PRISMA HEXAGONAL.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	SUBTOTAL (\$)
Parte estructural				
Tabla de pino cepillada 122x122x1cm	Pieza	1	410	410
Parte aislante				
Placa de poliestireno 122x61x2.5cm	Pieza	2	35	70
Placa de poliestireno 150cmx100cmx2.5cm	Pieza	2	60	120
Parte reflejante				
Lamina de espejo 40cmx60cmx0.5cm	Pieza	15	148	2,220
Parte absorbadora				
Lámina galvanizada lisa (24') 122x60cm	Pieza	1	270	270
Cubierta				
Vidrio 38x38cm	Pieza	2	75	150
Componentes de ensamble				
Bisagras 7.62X7.62cm	Pieza	2	22	44
Clavos de madera 1' ½ 100gr	Kg	1	10	10
Pegamento Resistol 850 de 250 gr	Pieza	1	42	42
			TOTAL	\$3,506

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5 PROGRAMA PARA LA SIMULACIÓN TÉRMICA DE LA ESTUFA SOLAR (SOLIDWORKS)

El programa utilizado para el presente trabajo como se mencionó anteriormente fue SolidWorks, porque además de sus múltiples funciones, cuenta con la herramienta Flow Simulation que permite simular el funcionamiento de aplicaciones de transferencia de calor y flujo de fluidos.

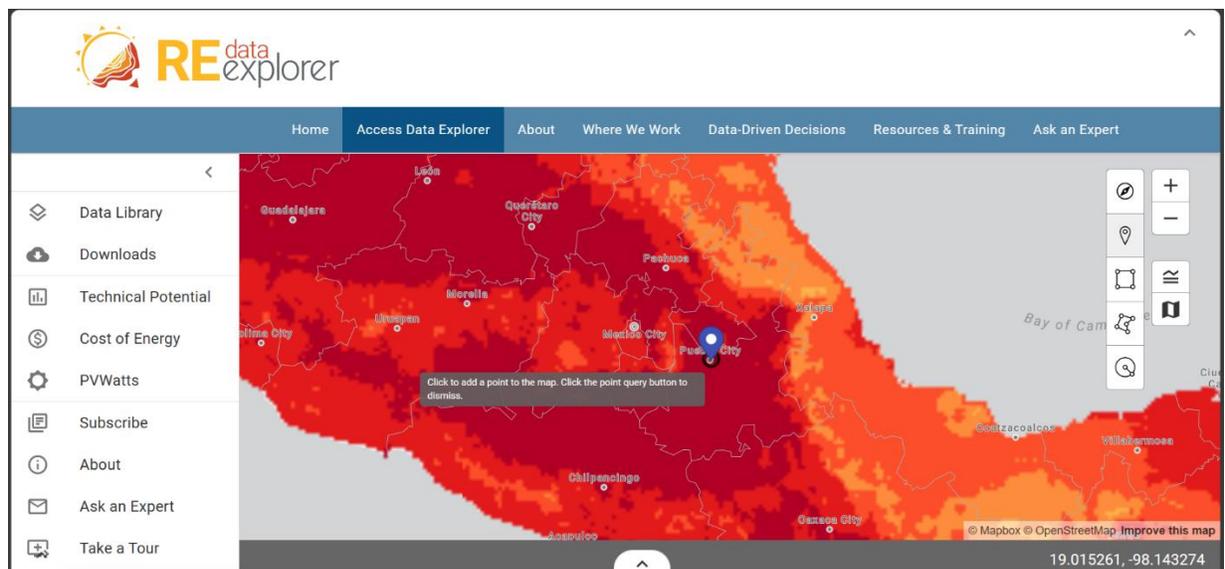
Esto aplicado a las estufas solares permite simular las condiciones a las que estarían expuestas para un día despejado (21 de junio) y para uno con nubes (21 de diciembre). Dado que las estufas solares de acumulación requieren estar expuestas a la luz solar para su funcionamiento, el estudio de radiación se estableció en tiempo transitorio para un periodo de 7 horas. El análisis fue de forma cuantitativa donde se evaluó el comportamiento de la temperatura a lo largo de un periodo de tiempo para una estufa solar con reflectores inclinados (prisma hexagonal) y una sin reflectores inclinados (convencional), así como variables de radiación incidente y temperatura del fluido.

5.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

5.1.1 Características de la zona

La cantidad de radiación solar que se recibe en la superficie terrestre como se mencionó en el capítulo 2, varía principalmente por condiciones meteorológicas y geográficas. Por lo que, si bien la propuesta de diseño se planteó para ser implementada en cualquier lugar de la república mexicana, para enfocar la simulación se eligió como lugar la capital poblana tiene las coordenadas de 19°02'16.6" N y 98°12'12.5" W.

Por otro lado, la irradiación en Puebla se encuentra entre los 6 y 6.2 kWh/ m² como se aprecia en la Figura 5.1-1, dato que permite afirmar el aprovechamiento que tendría la estufa solar tipo caja “prisma hexagonal” en la entidad. (García J. , 2002)



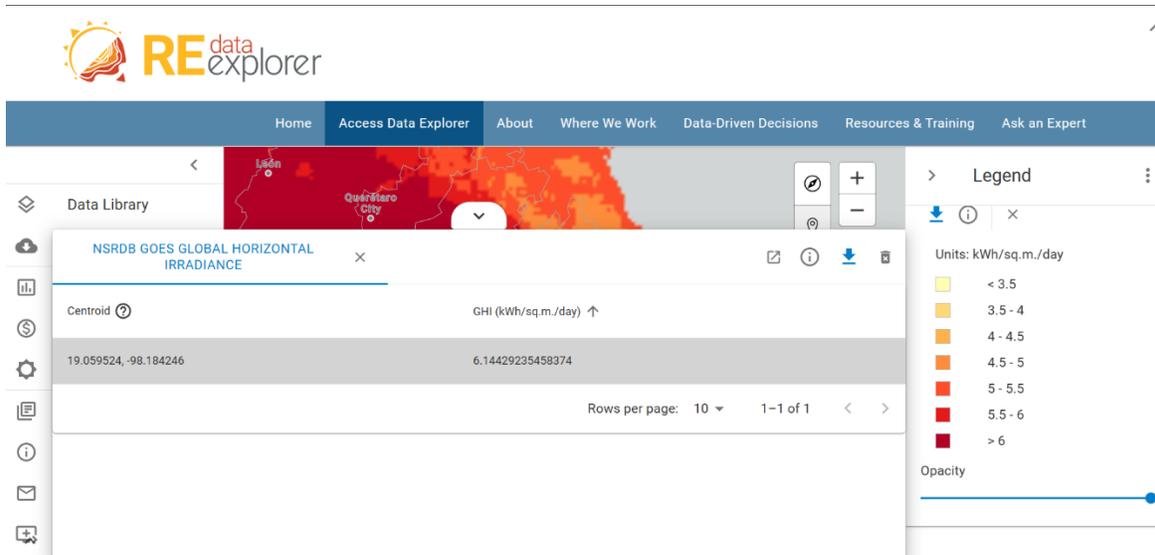


Figura 5.1-1 Irradiancia global horizontal. Fuente: (NREL, 2023)

Con lo que respecta a las condiciones meteorológicas, la mayor parte del territorio poblano tiene clima templado con diversos grados de humedad, la región central que es donde se ubica la capital posee un clima templado subhúmedo con precipitaciones durante el verano. (INEGI, Clima en Puebla, 2020)

5.2 CONDICIONES INICIALES

5.2.1 Configuración del análisis de radiación

Previo a realizar el estudio térmico se configuraron las condiciones iniciales, las cuales se mantendrán para ambos modelos. (Figura 5.2-1). En el apartado de radiación solar, se debe ingresar la ubicación del lugar de acuerdo a la latitud, el día y la hora que se simula, los parámetros usados están presentados en la Tabla 5.2-2, también se observó

la importancia de activar la opción de gravedad ya que de no hacerlo no sucedería la transferencia de calor por convección. (Sherak, 2022)

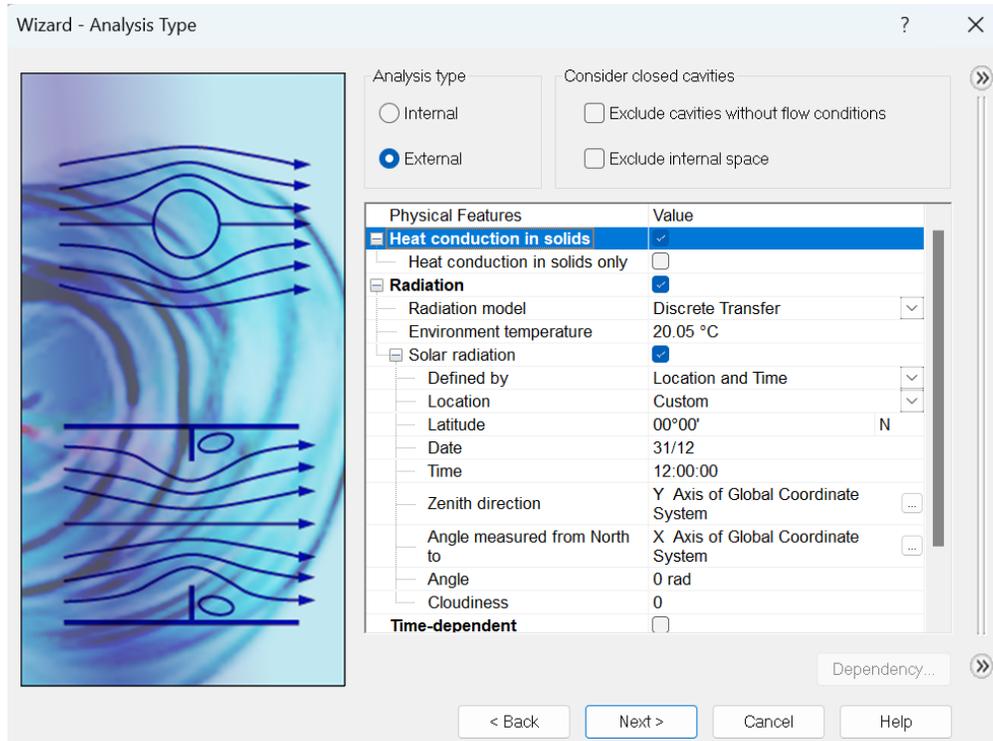


Figura 5.2-1 Configuración inicial. Fuente: Asistente de simulación de SolidWorks.

TABLA 5.2-1 PARÁMETROS DE RADIACIÓN SOLAR.

Parámetro	Valor
Latitud	19°02'
Hora	10:00
Duración	7 horas.

Fuente: Elaboración propia.

El único parámetro por variar es la fecha, ya que como se mencionó en el capítulo dos, la relación de la Tierra con el Sol afecta dando días más cortos o largos. A partir de esto, se seleccionó dos fechas para colocar en la simulación, el día con mayor cantidad de luz, 21 de junio y el día con menor; 21 de diciembre.

Mientras que para el parámetro de temperatura ambiente se estableció 25°C para la primera fecha y 20°C para la segunda.

5.2.2 Opciones de control de calculo

SolidWorks hace la simulación térmica mediante un análisis de transferencia de calor en un tiempo transitorio. El programa realiza de forma predeterminada los cálculos de transferencia de calor considerando todos los parámetros de flujo, por lo que para simular una hora de exposición de la estufa solar a la radiación le tomo dos horas en realizar el análisis.

Dado que, considerar solo una hora no es suficiente para un análisis completo, se investigó como se podría mejorar el tiempo y se encontró que al activar la opción “Flow Freezing” con la estrategia de congelación periódica (Figura 5.2-2) se pudo minimizar el tiempo de CPU necesario para los cálculos de transferencia de calor manteniendo estáticos todos los parámetros de flujo que no son críticos en el estudio. De esta manera se pudo configurar siete horas de exposición en las estufas solares.

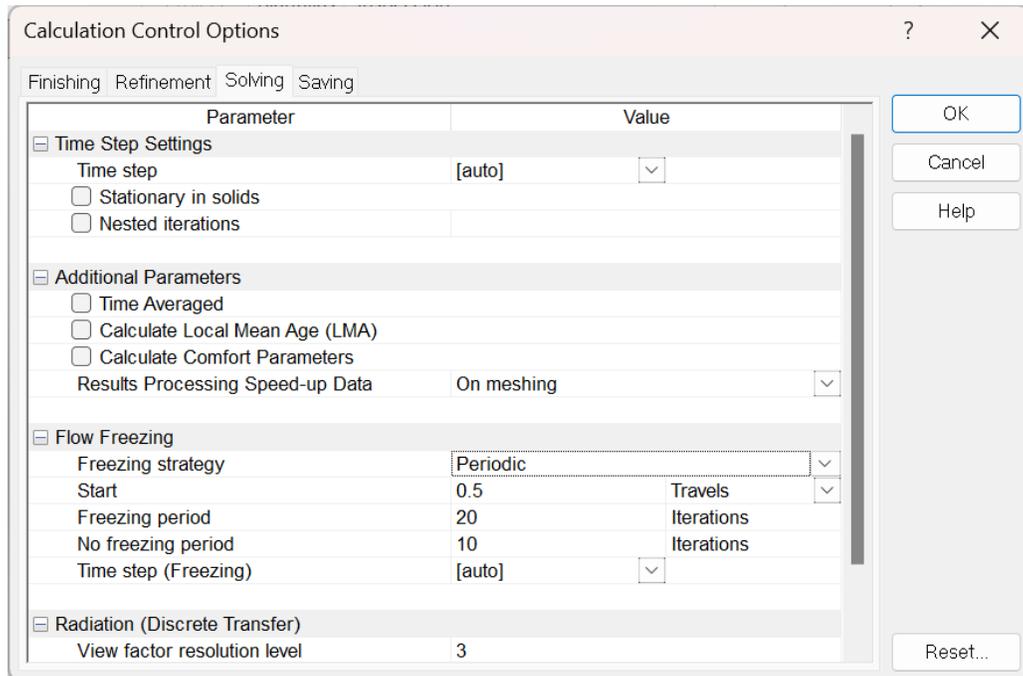


Figura 5.2-2 Configuración de la opción “Flow Freezing”. Fuente: SolidWorks

5.2.3 Superficies radiativas

La base de datos de SolidWorks contiene las superficies radiativas que se muestran en la Figura 5.2-3. En ambos modelos de estufas solares se requiere definir cómo será el comportamiento de los componentes del interior al recibir la radiación solar.

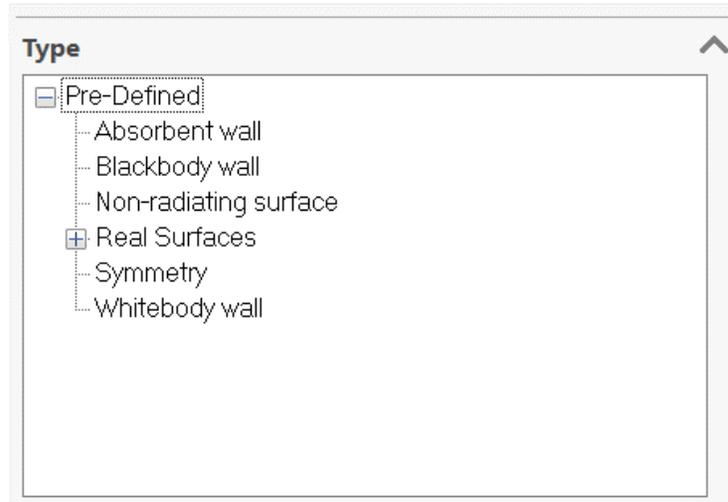


Figura 5.2-3 Tipos de superficies radiactivas. Fuente: Asistente de simulación de SolidWorks.

Asumiendo que la estufa va a estar direccionada de tal forma que ingrese la mayor cantidad de luz a la cubierta de vidrio y al interior, cuatro componentes requieren características específicas:

- El área reflejante como lo menciona en su nombre debe reflejar los rayos solares, para cumplir con esto se le asigno superficie radiativa tipo "symmetry". Este tipo de superficie tiene la característica de asemejarse al comportamiento de un espejo.
- La placa absorbidora funciona en complemento con el recipiente de cocción para absorber la mayor cantidad de calor posible por lo que se le asigna la propiedad de "blackbody wall" o pared de cuerpo negro, el cual es una superficie ideal capaz de absorber y emitir la máxima cantidad posible de radiación como se dijo en el capítulo 3.

- El recipiente debe poder complementar la función de la placa y así lograr la cocción de los alimentos. Por ello como se seleccionó como superficie radiativa “blackbody wall”.
- La cubierta debe ser transparente y dejar pasar los rayos. Por lo que el material que cumple con estas características es el vidrio y se puede seleccionar dentro de la opción “real surfaces”.

5.2.4 Propiedades de los materiales

Para la correcta simulación de la estufa solar se requirió establecer características de los sólidos estas pueden ser dos: opaca o transparente. El vidrio es el único material al que se le puede asignar la propiedad de transparencia para poder permitir el paso de la energía del Sol al interior de la estufa, su configuración se estableció con la condición de permitir el paso de energía térmica y solar (Figura 5.2-4).

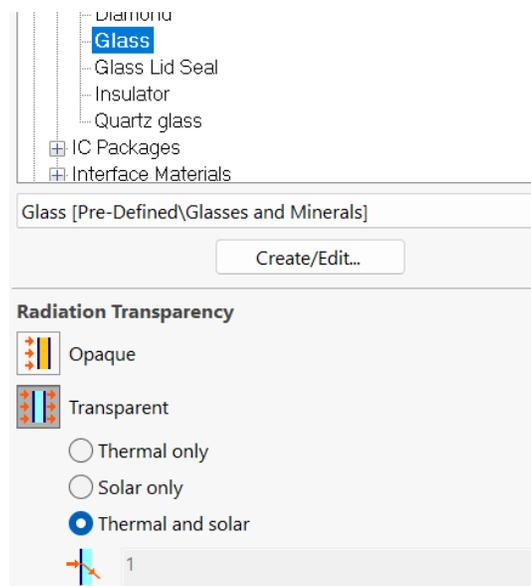


Figura 5.2-4 Configuración de la cubierta. Fuente: SolidWorks.

CAPÍTULO 6 RESULTADOS

6.1 SIMULACIÓN TÉRMICA PARA EL 21 DE JUNIO

En el asistente de simulación además de configurar los parámetros antes mencionados, se presentan las opciones para establecer la temperatura ambiente, así como las condiciones del cielo, es decir, si hay o no presencia de nubes. Para la primera fecha de simulación (21 de junio) se configuró una temperatura ambiente de 25°C considerando las características de la época de verano donde las temperaturas son mayores, en la opción de nubosidad se estableció en 0%, es decir un cielo despejado.

6.1.1 Distribución de temperatura

Modelo convencional

En la Figura 6.1-1a se observa como es el recorrido aparente de los rayos durante las siete horas en la estufa solar tipo caja convencional, los del lado derecho corresponden al inicio de la simulación mientras que los más tenues en la parte superior de la caja son los finales, también muestra las caras donde incide mayor radiación y estas son principalmente la frontal y superior.

Debido a esto, se aprecia una mayor temperatura en la cara frontal en comparación con el resto de la caja (Figura 6.1-1b), sin embargo, no superior a la temperatura del vidrio, el cual se omitió en la imagen por el motivo de tener una mejor apreciación del recipiente de cocción.

Como se observa el modelo convencional presenta dos desventajas: la primera es que se requiere una reorientación constante de aproximadamente cada 30 minutos para poder aprovechar la radiación solar incidente, la segunda es la dificultad para generar más calor en el interior por la ausencia de reflectores que generen una reflexión interna, consecuencia de esto es una menor temperatura en el recipiente de cocción (84°C).

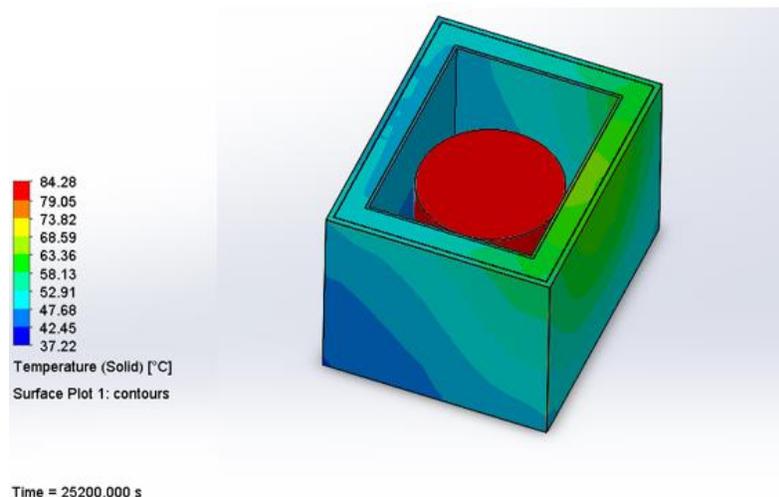
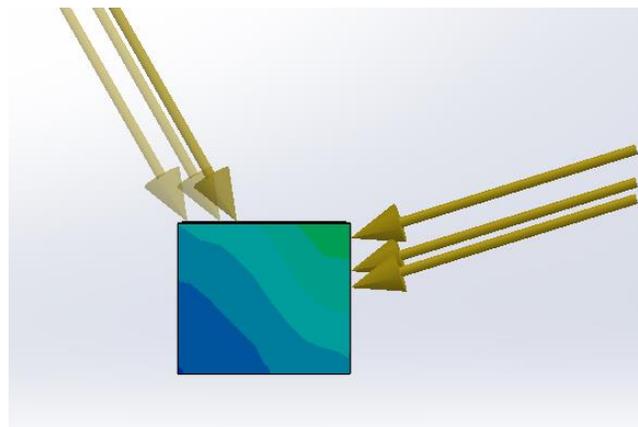


Figura 6.1-1 a) Recorrido aparente de los rayos solares b) distribución de temperatura en estufa solar tipo caja convencional. Fuente: Elaboración propia.

Modelo prisma hexagonal

Para el modelo prisma hexagonal se observa en la Figura 6.1-2a la misma forma que recorren los rayos en la estufa, incidiendo sobre las dos ventanas por lo que no requiere reorientación constante y como se observa en la misma figura estas caras poseen temperaturas cercanas a los 80°C. El uso de ventanas que permitan el paso de los rayos solares combinado con los reflectores internos provoca una concentración de calor mayor al interior de la estufa, logrando alcanzar temperaturas en el recipiente de cocción de 115°C, (Figura 6.1-2b) superando en 31° al modelo convencional.

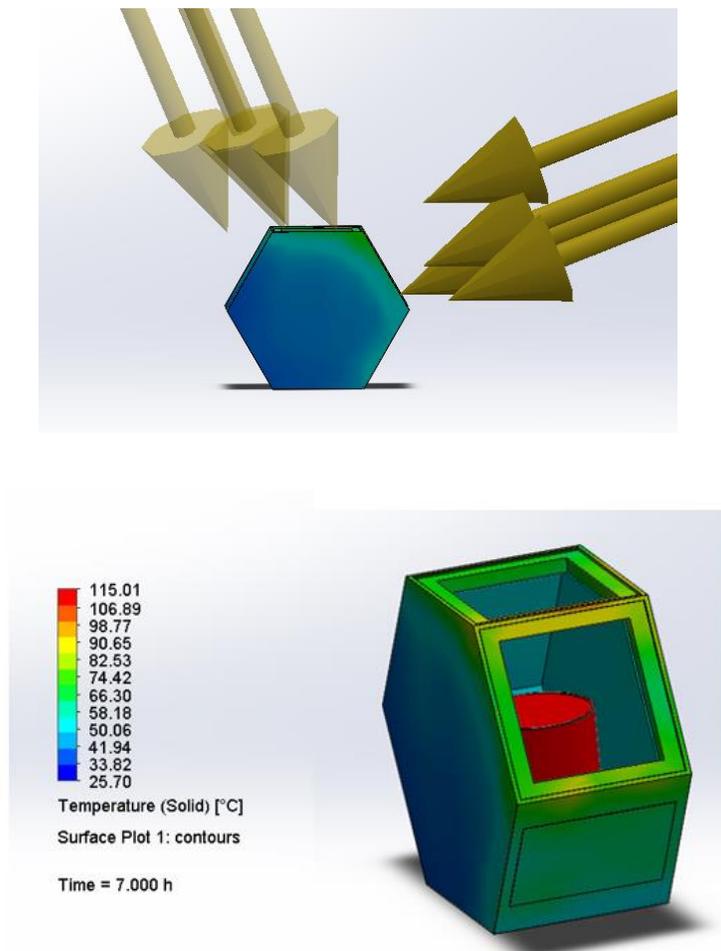


Figura 6.1-2 a) Recorrido aparente de los rayos solares b) distribución de temperatura en estufa solar tipo caja "prisma hexagonal". Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Temperatura del agua

La temperatura del agua registrada es un promedio de las variaciones que existen en el recipiente de cocción. Para las primeras tres horas transcurridas de exposición solar la estufa solar caja convencional alcanza una temperatura de 51°C mientras que el modelo propuesto alcanzo la temperatura de 56°C una hora antes, por lo que, se observa la ventaja que tiene el empleo de reflectores inclinados, confirmando la hipótesis. Después de siete horas de exposición se observa que la estufa caja convencional alcanzo la máxima de temperatura de 81° C, para la estufa solar caja “prisma hexagonal” el agua alcanzo 112°C (Figura 6.1-3). La temperatura del agua en una olla habitual no excede los 100°C, sin embargo, al cerrar la olla diseñada con una tapa a su medida, el programa la considera como si fuera de presión. En estas ollas, el agua puede alcanzar una temperatura de hasta 130°C. (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, 2024)

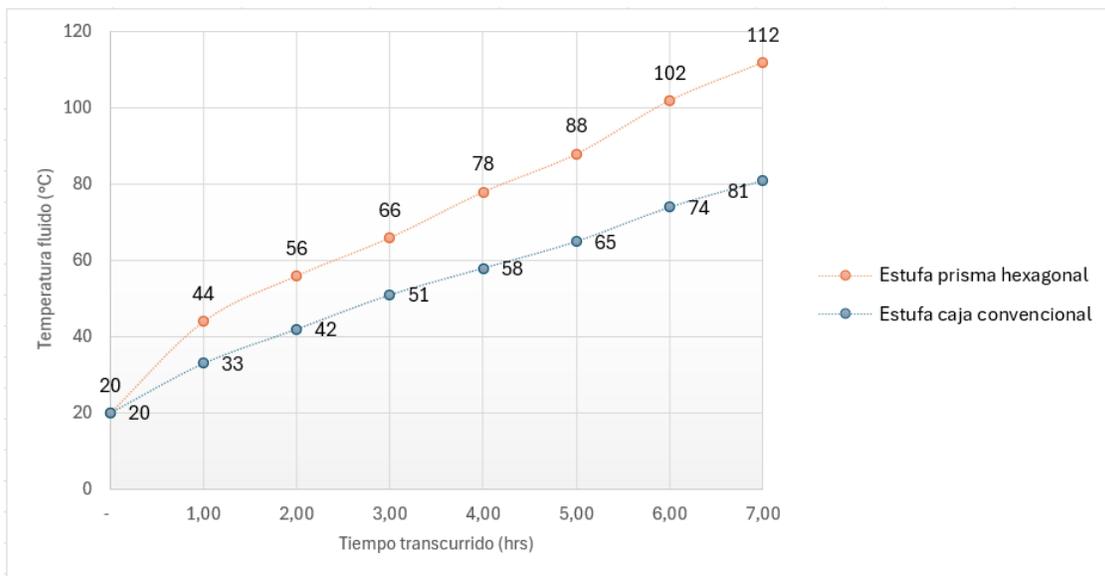


Figura 6.1-3 Temperatura del agua. Fuente: Elaboración propia mediante datos de SolidWorks.

6.1.3 Irradiación

La Figura 6.1-4 muestra la irradiación durante el transcurso de siete horas, se puede apreciar a partir de las 11 am que la irradiancia supera los 900W/m², manteniéndose con niveles altos hasta las 2pm, después de esta hora empieza a descender. Este dato corresponde con lo mencionado en la bibliografía ya que en estas horas es donde existe mayor intensidad de radiación y es por eso que se recomienda usar las estufas solares en este periodo.

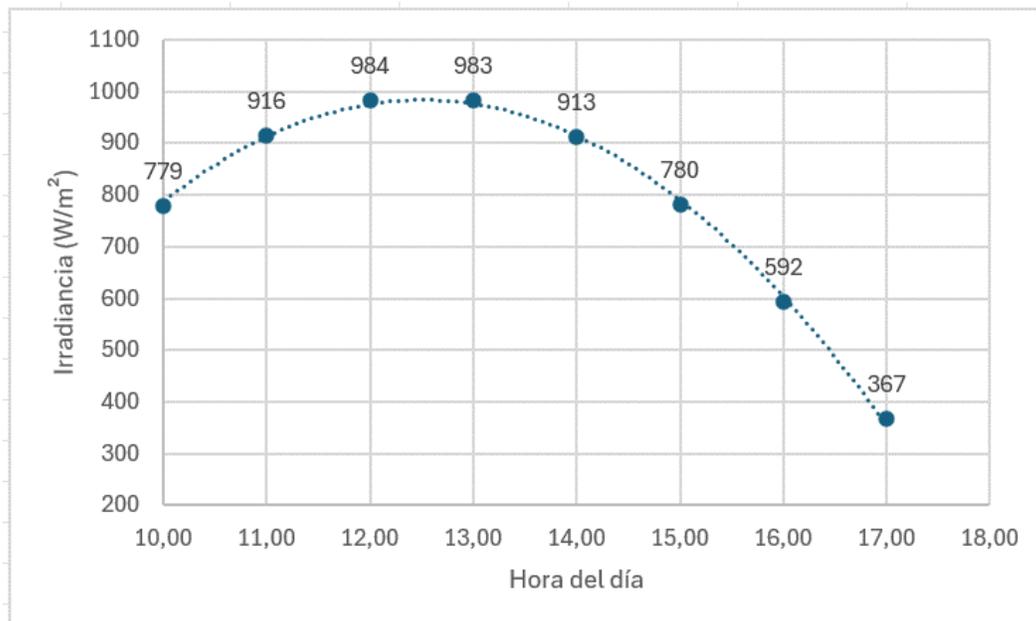


Figura 6.1-4 Irradiación para el día 21 de junio. Fuente: Elaboración propia mediante datos de SolidWorks.

6.2 SIMULACIÓN TÉRMICA PARA EL 21 DE DICIEMBRE

En este escenario al considerarse como el peor se configuró una temperatura ambiente de 20°C y en la opción de nubosidad se estableció un 20%.

6.2.1 Distribución de la temperatura

De manera similar como ocurrió para la simulación del 21 de junio, las superficies con mayores temperaturas son las caras laterales, el cristal y sin duda, el recipiente de cocción.

Este último en la estufa solar tipo caja convencional alcanzo una temperatura de 76 °C y en el modelo prisma hexagonal de 97°C, además se observa que en el resto de la estufa en ambos modelos tiene un color similar que corresponde a una temperatura alrededor de los 45°C (Figura 6.2-1), esto coincide con lo mencionado en la bibliografía ya que en los días soleados de verano los rayos llegan en una misma dirección, mientras que en días nublados o con algún porcentaje de nubes los rayos sufren procesos de dispersión por lo que llegan sin una dirección uniforme (radiación difusa).

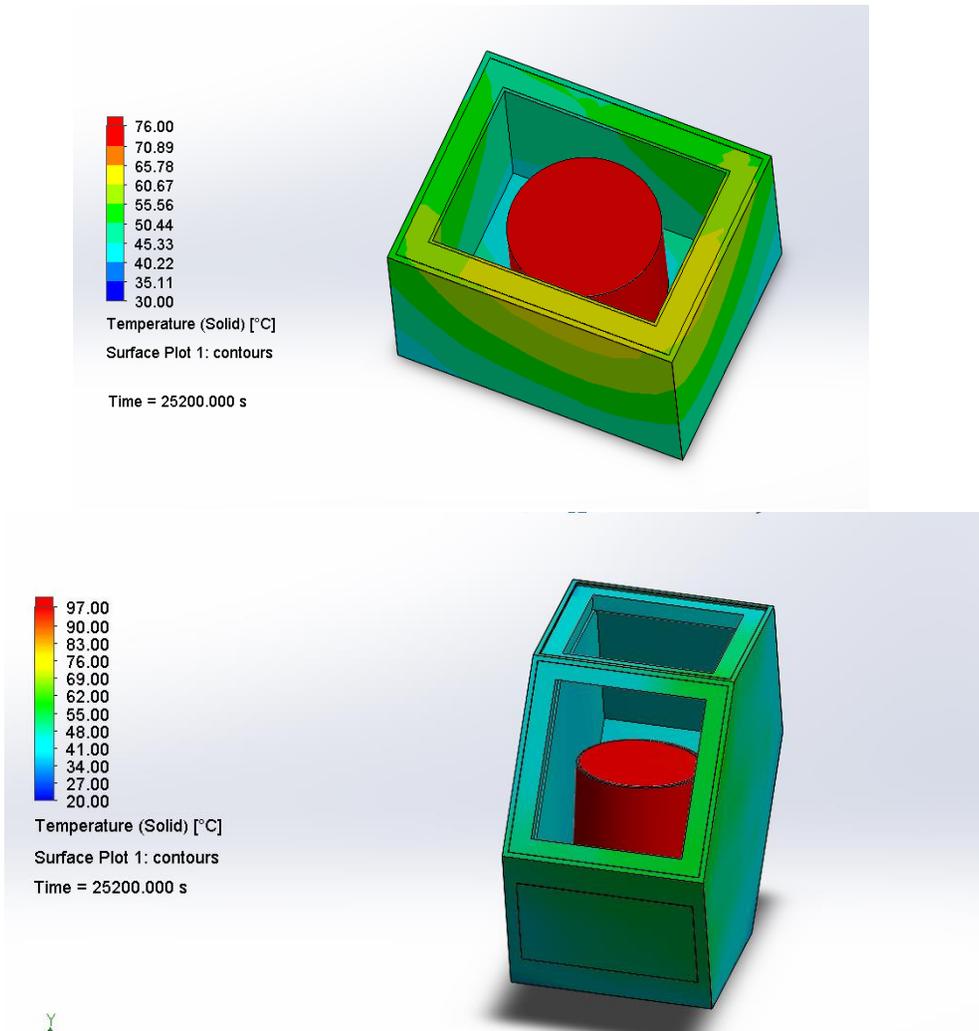


Figura 6.2-1 Distribución de temperatura en ambos modelos. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Temperatura del agua

Los factores meteorológicos para el 21 de diciembre, tales como la baja intensidad de radiación, la dispersión y las temperaturas bajas en el medio ambiente influyeron en que ambos modelos alcanzaran menores temperaturas que el 21 de junio, a pesar de esto el modelo propuesto de estufa solar prisma hexagonal superó la temperatura de la estufa solar tipo caja convencional como se observa en la Figura 6.2-2. En las primeras tres

horas transcurridas de exposición solar la estufa solar caja convencional alcanzo una temperatura de 46°C mientras que en el modelo propuesto obtuvo de 60°C, después de cuatro horas su aumento fue de forma moderada en comparación con el 21 de junio, es decir, con menor rapidez, alcanzando como temperatura máxima 96°C.

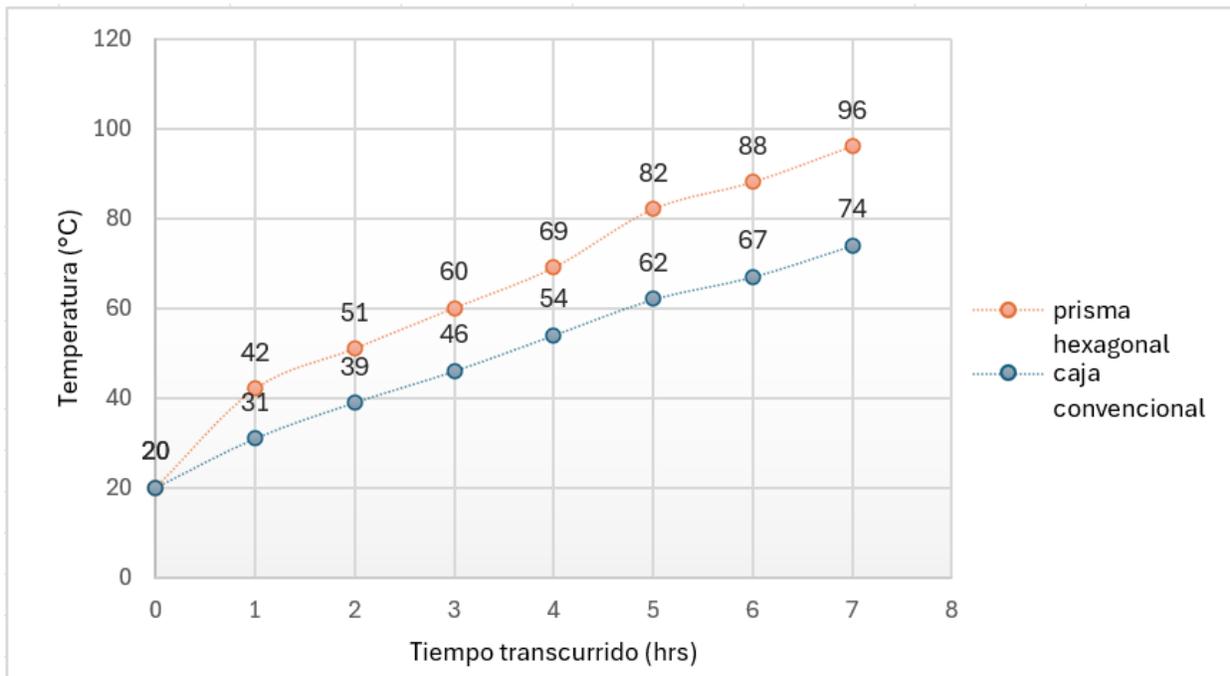


Figura 6.2-2 Temperatura del agua. Fuente: Elaboración propia mediante datos de SolidWorks.

6.2.3 Irradiación

Durante diciembre, existe una mayor presencia de nubes y precipitaciones, estas condiciones meteorológicas reducen la cantidad de radiación solar que llega a la superficie y provocan un aumento de la radiación difusa. La Figura 6.2-3 presenta la irradiación para el 21 de diciembre durante el periodo de siete horas, se observa un

comportamiento irregular debido a una baja temperatura en el ambiente y la condición establecida de un 20% de nubes en el cielo.

También se aprecia que la radiación máxima es de 614 W/m² lo que comprueba que diciembre es el mes menos apto en el hemisferio norte para el uso de estufas solares, ya que la radiación que sería aprovechada es inferior a la de verano.

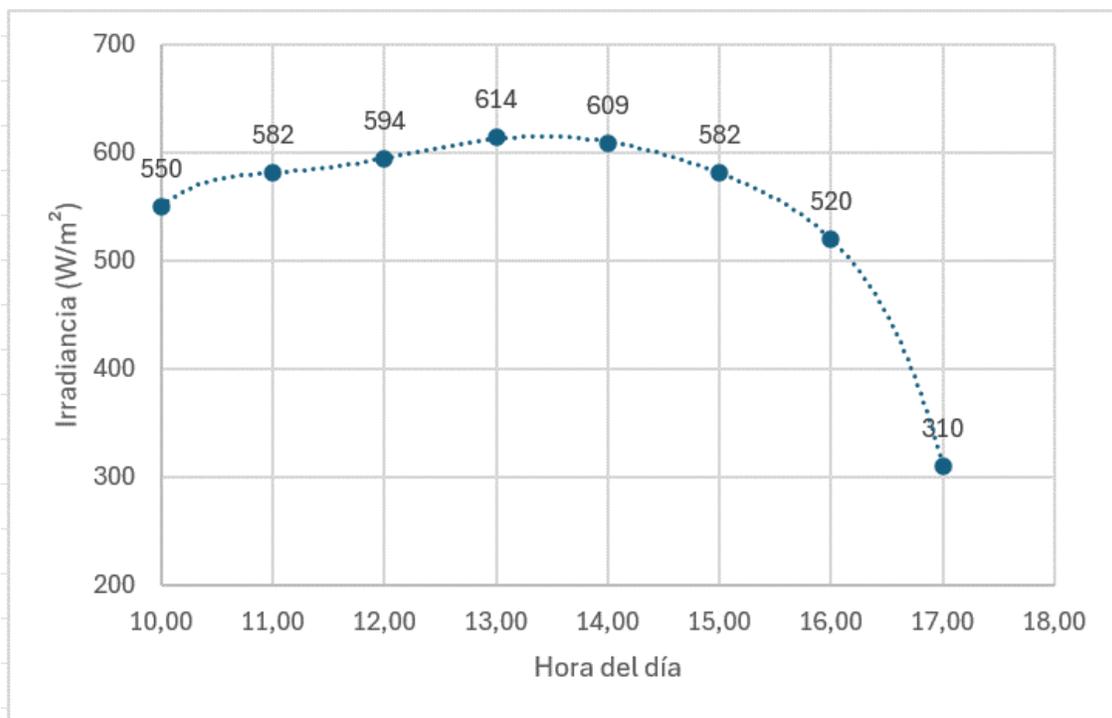


Figura 6.2-3 Irradiación para el día 21 de diciembre. Fuente: Elaboración propia mediante datos de SolidWorks.

6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Existen diversas pruebas para comprobar el funcionamiento de las estufas solares, entre las que se encuentran los parámetros de eficiencia térmica y la potencia de cocción. (Kundapur & Sudhir, 2009)

6.3.1 Análisis de eficiencia térmica

Para la obtención de la eficiencia térmica de ambos modelos de estufa solar se realizaron las siguientes consideraciones:

- Se considero al calor específico del agua como constante ya que posee la misma densidad durante todo el periodo.
- El recipiente de cocción ubicado en el interior de la estufa es un sistema cerrado.
- La pérdida de calor hacia el medio ambiente por las paredes de la estufa solar es mínima.

Para poder aplicar la ecuación de la eficiencia se requiere conocer la irradiancia promedio de los días 21 de junio y 21 de diciembre. Para el primer día se tomó una irradiancia promedio de 738 W/m^2 ya que durante las siete horas de exposición de las estufas solares hubo cielo despejado. Mientras que para diciembre existen condiciones adversas como mayor cantidad de viento, humedad en el ambiente, menor temperatura, precipitaciones y nubes, factores que afectan directamente en la intensidad de la radiación solar.

Además, la duración de las horas de luz en estos días es menor y considerando que en días nublados prioritariamente no se ven rayos de sol por la mañana sino por casi el medio día y hasta las 2pm, solo se consideraron las horas entre las 10:00-14:00 para obtener la irradiación promedio, resultando en 736 W/m².

Estos valores se sustituyen en la ecuación 3.3 junto con el área de apertura mostrada en la Tabla 4.4-1 que para el modelo convencional es de 0.12 m² y para la estufa prisma hexagonal 0.096 m², obteniendo los resultados de eficiencia térmica para ambos modelos. (Tabla 6.3-1) A continuación se muestra como se hizo el cálculo de eficiencia térmica para el 21 de junio en la estufa solar tipo caja, asumiendo que para la estufa solar prisma hexagonal se hace de la misma manera:

$$\eta = \frac{m_w C_{pw} \Delta T}{I_{av} * A_c * \Delta t} \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{2kg * \frac{4168J}{KgK} * 56^{\circ}C}{789 \frac{W}{m^2} * 0.12m^2 * 25200s}$$

$$\eta = 0.21$$

TABLA 6.3-1 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN AMBOS MODELOS DE ESTUFA SOLAR.

	Escenario 21 de junio		Escenario 21 de diciembre	
	Caja convencional	Prisma hexagonal	Caja convencional	Prisma hexagonal
Eficiencia [%]	21	40	18	33

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que para el día con mayor cantidad de horas de luz solar (21 junio), la estufa solar tipo caja tuvo una eficiencia de 21% mientras que la estufa solar tipo prisma hexagonal 40%. En diciembre con condiciones adversas la eficiencia de la estufa solar tipo caja “prisma hexagonal” disminuyo poco en comparación del escenario de verano debido a los reflectores inclinados en su interior que influyen favorablemente en la recolección de energía.

6.3.2 Análisis de potencia de cocción

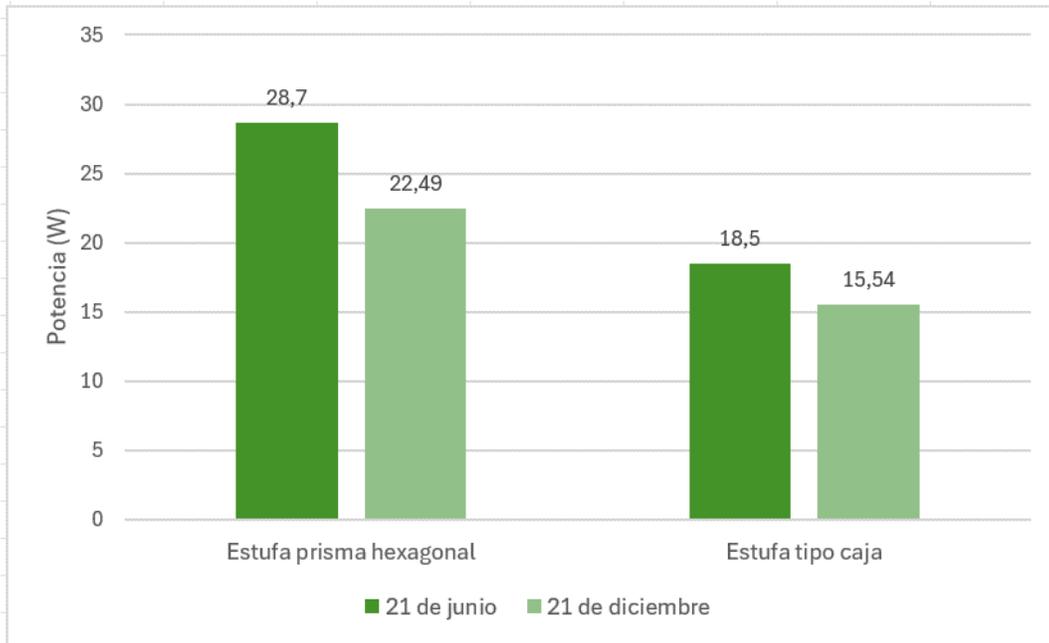
Para el cálculo de la potencia en los diferentes días de simulación, se realizará un ejemplo con los datos obtenidos para el 21 de junio de la estufa solar tipo caja convencional. Al aplicar la ecuación 3.4 se mantiene constante la masa del fluido y el calor específico, con lo que se obtiene la siguiente potencia:

$$P = \frac{T_{w2} - T_{w1}}{t} m_w C_{pw} \quad (3.8)$$

$$P = \frac{81^{\circ}C - 25^{\circ}C}{25200 \text{ s}} 2 \text{ kg} * 4168 \text{ J/kg K}$$

$$P = 18.52 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que el cálculo de las otras potencias se realiza de la misma manera se obtienen los siguientes resultados.



*Figura 6.3-1 Valores de potencia de ambos modelos de estufa solar respecto al día de simulación.
Fuente: Elaboración propia.*

La Figura 6.3-1 muestra el comparativo de la estufa solar tipo caja y la estufa solar prisma hexagonal. El valor de potencia obtenida para el modelo propuesto (28.7 W), es superior a la estufa tipo caja (18.5 W) en el día para mayor radiación que es el 21 de junio. Se observa que para el día menos recomendado para el uso de estufas solares (21 de diciembre) ambas potencias bajaron por las condiciones meteorológicas, la estufa prisma hexagonal fue de 22.49 W mientras que en la estufa tipo caja fue de 15.54 W.

TABLA 6.3-2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL 21 DE JUNIO.

	Convencional	Prisma hexagonal
Temperatura del agua (°C)	81	112
Eficiencia térmica (%)	21	40
Potencia de cocción (W)	18.5	28.7
Costo de elaboración (\$)	1440	3506
Volumen de la estufa (m ³)	0.07	0.17

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se observó que por su diseño el modelo hexagonal requiere menor reorientación para seguir el movimiento aparente del Sol, además capta mayor cantidad de radiación solar lo cual provoca mayor reflexión interna de luz en el interior.
- La opción “Flow Freezing” ayudo a realizar un análisis más completo tomando 7 horas de exposición solar lo cual al programa le llevo procesar un aproximado de 8 min, en vez de 14hrs que habría requerido de no activar dicha opción.

- Se pudo evaluar el funcionamiento de ambos modelos de estufa solar mediante la simulación térmica, analizando los parámetros térmicos como la eficiencia y potencia de cocción.
- El modelo propuesto de estufa solar “prisma hexagonal” alcanzo una temperatura de 112° C, superior en comparación con la estufa solar tipo caja (81°C) para el día con mejores condiciones atmosféricas.
- El modelo propuesto obtuvo una mayor eficiencia térmica (40%) y potencia de cocción (28.7W) para el día con mayor cantidad de radiación (21 de junio) que el modelo de estufa solar tipo caja convencional (21% y 18.5 W).
- Si bien la estufa prisma hexagonal supero las deficiencias del modelo convencional como su menor temperatura o la necesidad de redireccionarse, el modelo propuesto tiene un costo más elevado como se observa en la Tabla 6.3-2, esto debido a que la estufa tiene un mayor volumen y por ende requiere más material reflejante, el cual es de mayor precio que los otros materiales.

7.2 RECOMENDACIONES

- Es importante el uso de programas de dinámica de fluidos computacional en el diseño de prototipos en ingeniería como lo es SolidWorks ya que permite visualizar la funcionalidad de un modelo antes de desarrollarlo experimentalmente.
- Se sugiere tomar como referencia el presente trabajo para poder llevar el modelo propuesto a la parte experimental.
- Se recomienda incentivar a la población con programas sobre los beneficios de aprovechar la radiación solar como combustible para cocinar, además de una mayor difusión para cambiar el paradigma de que solo las cocinas solares están dirigidas a comunidades rurales, sino que también representan una alternativa de para cualquier persona que quiera cocinar de forma más ecológica sin contaminar al ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Environment Australia. (2002). Emissions from domestic solid fuel burning appliances.

Bayray, M. (2013). Theoretical and Experimental Comparison of Box Solar Cookers with and without Internal Reflector. *Solar World Congress*.

Brown, C. A. (2010). Energía del Sol. *Revista Digital Universitaria*.

Camilo Arancibia, R. B. (2020). Energía del Sol. *Ciencia*.

CDC. (2021). *Preparación para emergencias relacionadas con el agua*. Obtenido de Centros para el control y prevención de enfermedades: <https://www.cdc.gov/healthywater/emergency/es/>

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. México: Mc Graw Hill.

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2020). Resultados de pobreza en México 2020 a nivel nacional.

Estévez, R. (2018). Pioneros del diseño sostenible. *Eco inteligencia*.

García, A. O. (2021). *Seiscubos*. Obtenido de Aspectos geométricos de la relación Sol-Tierra: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/aspectos-geometricos>

García, J. (2002). La cocina solar. Un sistema de aprovechamiento directo de la energía solar. *Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*.

González, L. (2017). *Historia de la cocina solar*. Obtenido de <https://www.terra.org/categorias/comunidad-cocina-solar/historia-de-la-cocina-solar>

González, M., & Campuzano, H. (2014). Modelo térmico para estimar la potencia de cocción estándar de cocinas solares. *Nova Scientia*.

Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 129-134.

- Huashan, L., & Yongwang, L. (2011). Solar constant values for estimating solar radiation. *Energy*.
- INEGI. (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares*. México.
- INEGI. (2020). *Clima en Puebla*. Obtenido de <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/territorio/clima.aspx?tema=me&e=21>
- Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2018). *Secador solar de granos contribuye al desarrollo de más de 500 familias en Portoviejo*. Obtenido de <https://www.geoenergia.gob.ec/secador-solar-de-granos-contribuye-al-desarrollo-de-mas-de-500-familias-en-portoviejo>
- Julia, Manuel, & Tagüeña. (2008). *Fuentes renovables de energía y desarrollo sustentable*. México: ADN editores.
- Larsen, M. H. (2014). Medidas de reflectancia espectral para espejos utilizados en la captación de energía solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- Lenin. (2022). Alimentación familiar. *Salud Alimentaria*.
- Liu, B., & Jordan, R. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *ScienceDirect*.
- Lopez, P. (2022). México, entre los cinco países que tienen mayor potencial de energía solar. *Gaceta UNAM*.

- Lorenzo, J. A. (2021). *Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia*. Obtenido de SUNFIELDS: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>
- M. Gonzales, L. B. (2018). Cocinas solares: alternativa energética para el medio rural. *Universidad intercultural Indígena de Michoacán*.
- Manrique, J. (1984). *Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototermicas*. Harla.
- Martínez, H. (1999). Diseño teórico experimental de una estufa solar tipo caja con reflectores. *Tesis de Maestría*. México.
- Martínez, M. (2017). La hora solar pico equivalente, definición e interpretación. *Engineering, Environmental Science, Physics*.
- Martínez, M., & Guevara, G. (2008). Cocina solar en México. *Revista Solar*.
- Maza, M. A. (2013). *Energía solar térmica*. México: Limusa.
- Meinel, A. B., & Meinel, M. P. (1976). *Applied Solar Energy: An Introduction*. Addison-Wesley.
- Mejía, E. R. (2008). Cocinas Solares a la Vanguardia en México. *Revista Solar de la ANES*.
- NREL. (2023). *RE Data Explorer*. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory : <https://www.nrel.gov/>
- Organización Mundial de la Salud . (2005). *Air Quality Guidelines Global Update* . Copenhague, Dinamarca.

- Pilatowsky, Figueroa, & Martínez. (2009). *Sistemas de calentamiento solar de agua* (2 ed.). México: Trillas.
- Rincon, E., Moreno, L., & Vera, F. (1997). Desarrollo de cocinas solares con base en concentradores del tipo CPC. *Memoria del Congreso de Energía Solar*.
- Riveros, D. (2011). Notas de solarimetría. *Asociación Nacional de Energía Solar*.
- Salazar, M. (2022). Cocinar con ayuda del sol: los emprendedores que impulsan una revolución solar en México. *Noticias ambientales*.
- SEGALMEX. (2021). *Granos básicos de México*. Obtenido de Seguridad alimentaria mexicana: <https://www.gob.mx/segalmex>
- Sharma, S. (2004). Solar Cookers. *Encyclopedia of Energy*.
- Sherak, M. (2022). *A look at Solar Radiation in SOLIDWORKS Flow Simulation*. Obtenido de Computer Aided Technology: <https://www.cati.com/blog/a-look-at-solar-radiation-in-solidworks-flow-simulation/>
- The World Bank Group. (2019). *Global Solar Atlas*. Recuperado el 30 de septiembre de 2023, de <https://globalsolaratlas.info/map>
- Tiwari, G. (2002). *Solar Energy: Fundamentals, Design, Modeling and Applications*. Nueva Delhi: Narosa.
- Toro, Á. M. (2015). Modelación matemática y energética del tubo absorbedor de una central solar térmica con concentradores cilíndrico-parabólicos. *Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*.

Unidas, N. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Recuperado el 15 de agosto de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Vega, J. C., & Ramírez, S. (2014). *Fuentes de energía: renovables y no renovables*. Colombia: Alpha Editorial.