

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

RESIDENCIA PROFESIONAL

PROYECTO:

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR,
EN TUXTLA GUTIERREZ CHIS.”**

ALUMNO:

ULISES ROBLES ORDÓÑEZ

ASESOR INTERNO:

CARLOS RIOS ROJAS

INGENIERIA MECANICA

**25 DE NOVIEMBRE DEL 2013, TUXTLA GUTIERREZ
CHIAPAS**



ÍNDICE

CONTENIDO	PÁG.
1. Introducción.....	1
2. Justificación.....	2
3. Objetivo.....	3
3.1. Objetivo general.....	3
3.2. Objetivos específicos.....	3
4. Características generales del área de trabajo.....	4
5. Problema a resolver.....	9
6. Alcances y limitaciones.....	11
7. Marco teórico.....	12
7.1. Conducción.....	12
7.2. Convección.....	14
7.3. Radiación.....	15
7.4. Intercambiadores de calor.....	18
7.4.1. Carcasa y tubo.....	18
7.4.2. Tipos de intercambiadores de calor según su operación...20	
7.4.2.1 Flujo paralelo.....	20
7.4.2.2. Contraflujo.....	21
7.4.2.3. Flujo cruzado.....	22
7.5. Redes generalizadas de resistencias térmicas.....	23



7.6. Convección interna forzada.....	24
8. Memoria de cálculo.....	26
8.1. Cálculo de la transferencia de calor en el calentador solar...26	
8.2. Cálculo del calor generado por el colector solar.....27	
8.3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h_i).....28	
8.4. Cálculo del calor agregado en la cámara térmica.....30	
9. Resultados.....	35
9.1. Diseño del colector solar en diferentes vistas.....35	
9.2. Pruebas experimentales realizadas en el prototipo del colector solar.....39	
Conclusión.....	47
Anexos.....	48
Fuentes de información.....	56



1. Introducción

De acuerdo con las estadísticas la demanda de energía eléctrica a nivel aumenta con el paso del tiempo debido al crecimiento de la industria y población. Su disponibilidad se ha convertido en un problema para regiones alejadas de la red eléctrica; por lo que siempre se han desarrollado nuevas fuentes de energía.

La energía solar es la energía que se aprovecha a partir de la radiación del sol. Esta radiación solar es el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el sol, de la que se puede aprovechar la energía térmica para un gran número de situaciones: calentamientos de espacios, calentamiento en procesos alimenticios, invernaderos e incubadoras de huevos.

Este proyecto consiste en una investigación y el diseño de intercambiadores de calor. El diseño del colector solar fue posible gracias a los libros de textos de transferencia de calor, publicaciones de radiación solar, y software's de SolidWorks y EES, los cuales ayudaron a resolver algunos problemas planteados en el diseño.

Al final del proyecto se tiene como meta, diseñar un colector solar que aporte la cantidad de calor necesaria para una cámara térmica la cual mantendrá su espacio interior entre 30°C y 45 °C durante 24 horas, temperaturas adecuadas para que en propuestas futuras la cámara térmica se utilice como una incubadora.

2. Justificación

En la actualidad el planeta se encuentra en una situación muy complicada con las grandes masas de contaminación, El progreso tecnológico, por una parte y el acelerado crecimiento demográfico, por la otra, producen la alteración del medio, llegando en algunos casos a atentar contra el equilibrio biológico de la Tierra.

La relación del hombre con su ambiente se ha visto afectada también por el proceso urbanístico, lo que ha llevado a la destrucción de áreas verdes para dar paso a nuevas construcciones habitacionales, donde las áreas recreativas son cada vez más escasas, por lo que se ha optado por energías limpias que no contaminen más de lo que ya esta degradado el planeta entre las energías se encuentran las producidas por el viento o por el sol, que en este caso lo que se va a utilizar es la energía solar.

Por lo tanto, al necesitar de la energía del sol para producir otras energías se tiene que llevar un proceso para poder recolectarla y poder transmitirla por lo que es necesario el diseño y simulación de un colector solar, el cual estará hecho con un intercambiador de calor.

Dicho colector solar será diseñado en función a un análisis térmico y del aprovechamiento de la energía limpia que en este caso es la solar, sin embargo para poder llevar a la realidad este proyecto es necesario hacer una simulación térmica del sistema y ver cómo se comporta a través de un software.

Se pretende que el colector solar desempeñe la función de calentador para que una cámara sellada herméticamente pueda ser utilizada como incubadora de huevos o para otros fines según se necesite.

3. Objetivos de la Residencia Profesional

3.1. Objetivo general:

- Diseñar y simular un colector solar, adaptado a las condiciones climáticas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas.

3.2. Objetivos específicos:

- Determinar el tipo de intercambiador que se planea utilizar a partir de las condiciones dadas.
- Poder saber la temperatura óptima del colector solar para poder hacer la transferencia de calor necesaria.
- Obtener mediante instrumentos de medición los datos de flujo volumétrico, temperatura y otros datos necesarios para el diseño.

4. Características generales del área de trabajo

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) es una empresa pública federal que ofrece servicios de educación superior tecnológica de calidad, que coadyuve a la conformación de una sociedad justa y humana, la cual se rige por los siguientes aspectos:

➤ **Valores:**



Figura 1: Pensamientos a través del tiempo

Con el fin de guiar y orientar las acciones cotidianas de todo su personal, el ITTG define los siguientes valores institucionales:

El ser humano

Es el factor fundamental del quehacer institucional, constituyéndose en el valor central, para incidir en su calidad de vida.

El espíritu de servicio

Es la actitud proactiva que distingue a la persona por su profesionalismo en su desempeño, proporcionando lo mejor de sí mismo.



El liderazgo

Es la capacidad para la conducción innovadora, participativa y visionaria de la operación y desarrollo institucional.

El trabajo en equipo

Es el proceso humano realizado de manera armónica con actitud proactiva, multiplicando los logros del objetivo común.

La calidad

Es la cultura que motiva a mejorar la forma de ser y hacer, fundamentada en las convicciones del ser humano.

El alto desempeño

Cumplir y elevar estándares de calidad, sustentado en el desarrollo humano.

El respeto al medio ambiente

Mediante la concientización a sus alumnos que el medio ambiente es primero antes que nada.

➤ Misión

Formar de manera integral a profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.



➤ **Visión**

Ser una institución de excelencia en la educación superior tecnológica del sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región.

➤ **Objetivos**

- Elevar la calidad de la educación para que los estudiantes mejoren su nivel de logro educativo, cuenten con medios para tener acceso a un mayor bienestar y contribuyan al desarrollo nacional.
- Ampliar las oportunidades educativas para reducir desigualdades entre grupos sociales, cerrar brechas e impulsar la equidad.
- Impulsar el desarrollo y utilización de tecnologías de la información y la comunicación en el sistema educativo para apoyar el aprendizaje de los estudiantes, ampliar sus competencias para la vida y favorecer su inserción en la sociedad del conocimiento.
- Ofrecer una educación integral que equilibre la formación en valores ciudadanos, el desarrollo de competencias y la adquisición de conocimientos, a través de actividades regulares del aula, la práctica docente y el ambiente institucional, para fortalecer la convivencia democrática e intercultural.
- Ofrecer servicios educativos de calidad para formar personas con alto sentido de responsabilidad social, que participen de manera productiva y competitiva en el mercado laboral.



➤ **Ofertas educativas**

- **Licenciaturas:**

Ingeniería Mecánica

Ingeniería en Sistemas Computacionales

Ingeniería Industrial

Ingeniería Electrónica

Ingeniería Eléctrica

Ingeniería Bioquímica

Ingeniería Química

Ingeniería en Gestión Empresarial

- **Maestrías:**

Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

- **Educación a Distancia**

Ingeniería en sistemas computacionales

Ingeniería industrial

➤ **Ubicación del ITTG**

Carretera Panamericana Km. 1080, A.P 599, C.P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Tel: (961) 6150380 Fax: (961) 6151687.

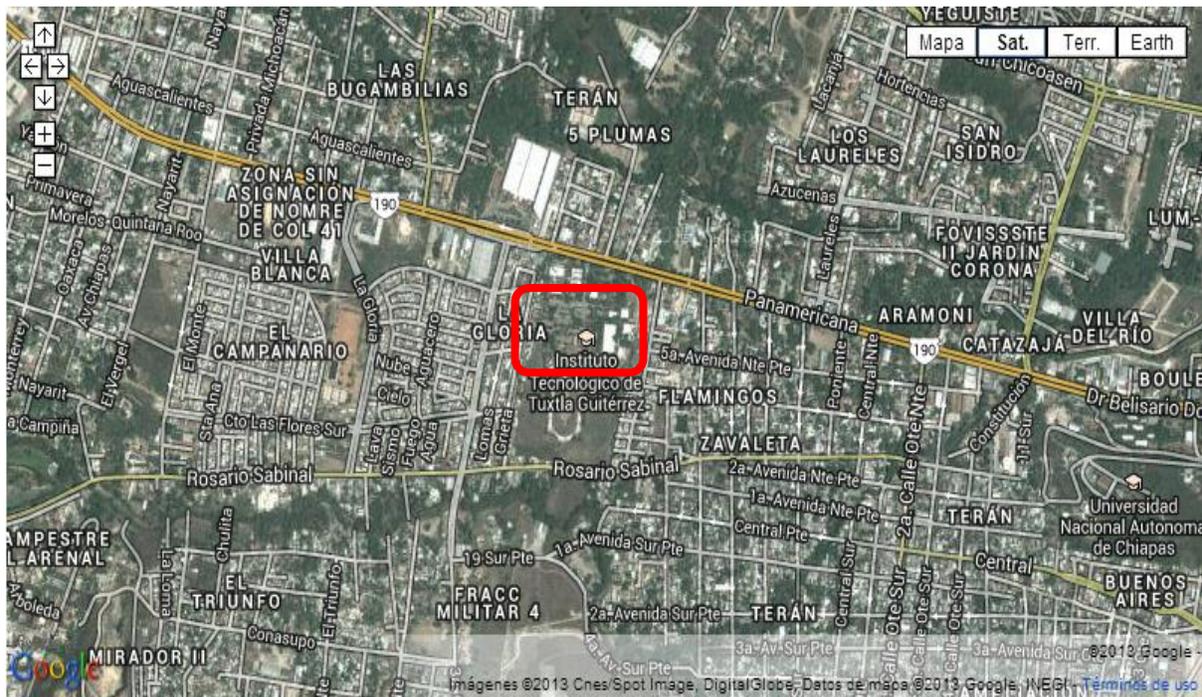


Figura 2: Localización del ITTG en Google Maps

5. Problema a resolver

El principal propósito del diseño y simulación del colector solar es el de calentar un fluido (agua) que pasa a través de tuberías las cuales están expuestas a la radiación solar y condiciones climatológicas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. En este caso, el fluido al ser calentado absorbe cierta cantidad de energía de la cual se necesitará para poder aportar energía calorífica al ser pasada en forma de serpentín en una cámara sellada, la cual se pretende utilizar como incubadora de huevos u otros fines según sean las necesidades. Se ha optado por esta fuente de energía (solar) debido a que la mayor parte de la generación de energía por plantas termoeléctricas se realiza mediante la combustión de combustible, la cual es sumamente contaminante y debido a los problemas ambientales actuales, el aprovechamiento de la energía sin impacto ambiental es una alternativa para este proyecto, debido a que será aprovechada la radiación solar para calentar agua y a su vez aprovechar la energía calorífica generada por el colector solar.

¿Porque energía solar?

Los combustibles contaminantes dañan el medio ambiente al liberar gases, los cuales se quedan atrapados en la atmosfera, aumentando el efecto invernadero y esté a su vez el incremento de la temperatura global del planeta. Por lo tanto es necesario generar nuevas fuentes de energía no contaminantes (denominadas de manera común “verdes”) y de una fuente renovable.



Figura 3: Emisiones de gases contaminantes en zonas industriales

El acelerado crecimiento de la población de escasos recursos ha obligado a las comunidades a extenderse a zonas cada vez más alejadas de las ciudades. Estas comunidades no cuentan con energía eléctrica y al ser de bajos recursos su calidad de vida no es la deseable. Este problema se puede resolver mediante la generación de alimentos en estas zonas por medio de una fuente térmica para crear aplicaciones como incubadoras solares y secadores de alimentos. Este proyecto de Residencia Profesional pretende ofrecer una alternativa de solución a este problema.

Se han generado proyectos de tipo térmicos donde se estudia la energía solar y la calorífica para generar fuentes térmicas para diversas aplicaciones, desde calentar agua para climatizar edificios en invierno hasta generación de electricidad por parte de grandes plantas termosolares.

Este proyecto pretende realizar un cauteloso análisis en el diseño del intercambiador de calor para que funcione como una pequeña planta termosolar. Con el análisis se conocerán los parámetros necesarios para diseñar el intercambiador de calor en Tuxtla Gutiérrez que proporcionará la máxima eficiencia de absorción solar.

6. Alcances y limitaciones

Dentro de los alcances de este proyecto es disminuir el consumo eléctrico de las fuentes térmicas convencionales. Ya que generalmente los radiadores de calor, o calentadores de casas comerciales manejan una elevada potencia eléctrica, y su consumo de energía es muy alto. La construcción de este prototipo, permitirá realizar pruebas y determinar la transferencia de calor solar, para que la cámara térmica alcance la temperatura adecuada y con ello lograr el objetivo planteado.

Además en este proyecto de Residencia Profesional se describe el método y análisis de la transferencia de calor, con el fin de evaluar el efecto que realiza este colector solar sobre la cámara térmica, manteniéndola a una temperatura constante durante el día y pueda ser utilizada para distintos propósitos, una de ellas, como incubadora de huevos. Los principales factores limitantes para el desarrollo de los cálculos fueron la asignación de cada valor del coeficiente de calor por convección dentro de la cámara térmica y fuera de ella, porque se depende mucho de las condiciones ambientales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Condiciones tales como temperatura ambiente, radiación solar, ángulo de irradiación solar, humedad, entre otros; por lo que si se desea mover el prototipo a una nueva ubicación no funcionará de igual manera. Este proyecto debe diseñarse para funcionar aun en condiciones climáticas no favorables, es decir debe almacenar suficiente calor para funcionar incluso en días nublados, por lo que el dimensionamiento debe realizarse cuidadosamente.

7. Marco teórico

Antes de hablar de transferencia de calor se tendría que hablar sobre la termodinámica la cual trata de los estados de equilibrio y de los cambios desde un estado de equilibrio hacia otro. Una de las ecuaciones que rige a la termodinámica es la siguiente:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (1)$$

La transferencia de calor es la forma de energía que puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme a un sistema que pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (2)$$

El calor puede transferirse por tres métodos diferentes:

- Conducción
- Convección
- Radiación

7.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre partículas. La conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos o gases. En los líquidos y gases la conducción se debe a las colisiones y difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las

moléculas en una redícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. Como aparece en la figura 4 [1].

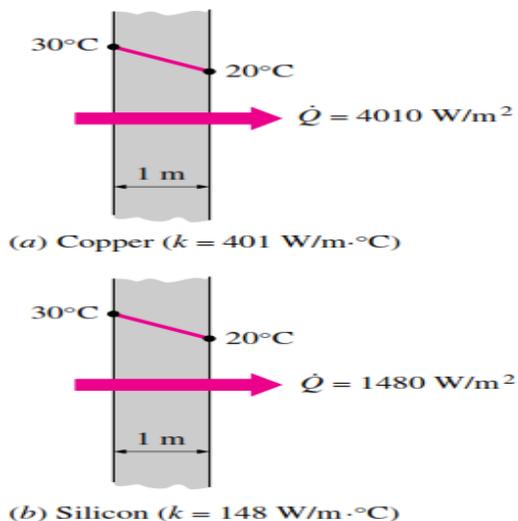


Figura 4: La velocidad de conducción de calor a través es directamente proporcional a su conductividad térmica

La velocidad de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y el área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de la capa.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura, A es el área de transferencia de calor, Δx el espesor de la capa y k la conductividad térmica del material.

La conductividad térmica de un material se refiere a la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor y valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante.

La dependencia con respecto a la temperatura de la conductividad térmica causa una complejidad considerable en análisis térmicos. Por lo tanto, es práctica común evaluar la conductividad térmica k a la temperatura promedio y tratarla como constante en los cálculos [1].

7.2. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprenden los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento del fluido mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo del fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura.

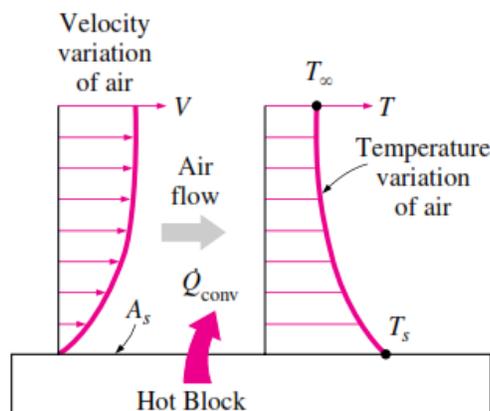


Figura 5: Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección

Existen dos fenómenos en la transferencia de calor por convección: convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como bombas, viento o turbinas; y convección natural ó libre si el movimiento es causado por fuerzas de empuje que son inducidas por la diferencia de densidad debido a la variación de la temperatura en el fluido.

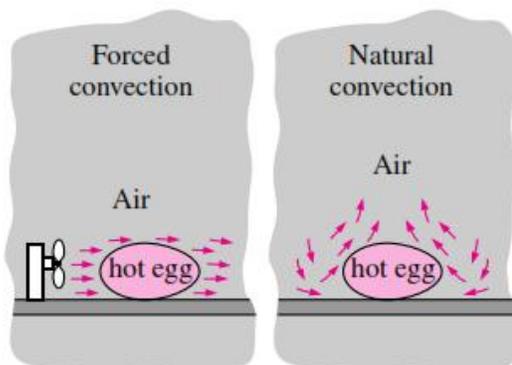


Figura 6: Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y natural

La rapidez de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, A_s es el área de superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección. La T_s representa la temperatura de la superficie y T_∞ temperatura del fluido. El coeficiente de transferencia de calor por convección se determina de manera experimental considerando la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades y velocidad del fluido [1].

7.3. Radiación

El tercer tipo de transferencia de calor es la radiación, es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado en los cambios de las configuraciones de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción o convección, la radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto.

La transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío. De esta manera llega la energía a la tierra la energía del sol.

La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura de T_s se expresa por la ley de Stefan-Boltzman como:

$$Q_{emitida,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (5)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ es la constante de Stefan-Boltzman.

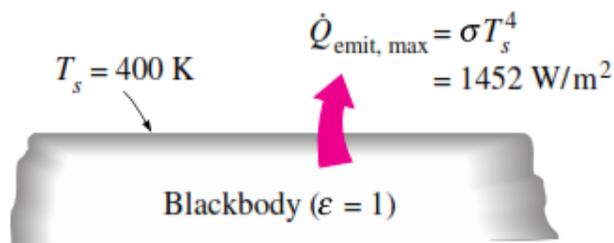


Figura 7: La radiación de un cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica

La superficie idealizada que emite radiación a esta velocidad máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación de cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa:

$$\dot{Q}_{emitida} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (6)$$

En donde ϵ es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo de 0 a 1, es una medida de tanto se acerca una superficie a la de ser un cuerpo negro, para el cual $\epsilon = 1$.

La absorptividad es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Como la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él. Es decir, un cuerpo negro es absorbente perfecto ($\alpha = 1$) del mismo modo que es un emisor perfecto.

En general, tanto ε como α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la emisividad y la absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. En muchas aplicaciones prácticas, las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud y absorptividad promedio de una superficie se considere igual a su emisividad promedio. La velocidad a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de:

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (7)$$

Donde $\dot{Q}_{incidente}$ es la velocidad a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de la superficie. Para las superficies opacas, la parte de la radiación incidente no absorbida por la superficie se refleja [1].

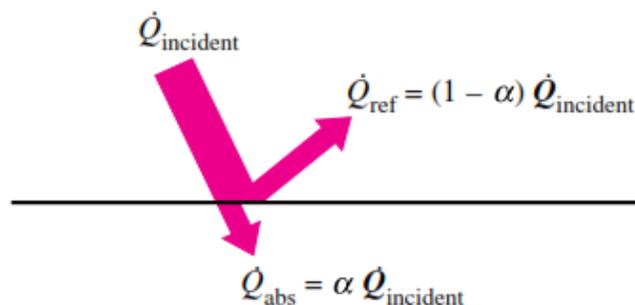


Figura 8: Absorción de la radiación incidente sobre una superficie opaca de absorptividad α

7.4. Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos medios, que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto. Son parte esencial de los dispositivos de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

Un intercambiador típico es el radiador del motor de un automóvil, en el que el fluido caloportador, calentado por la acción del motor, se enfría por la corriente de aire que fluye sobre él y, a su vez, reduce la temperatura del motor volviendo a circular en el interior del mismo.

Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.

Tipos de intercambiadores de calor según su construcción

Si bien los intercambiadores de calor se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños, la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las dos siguientes categorías: carcasa y tubo o plato. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación [2].

7.4.1. Carcasa y tubo

La construcción más básica y común de los intercambiadores de calor es el de tipo tubo y carcasa que se muestra en la figura:

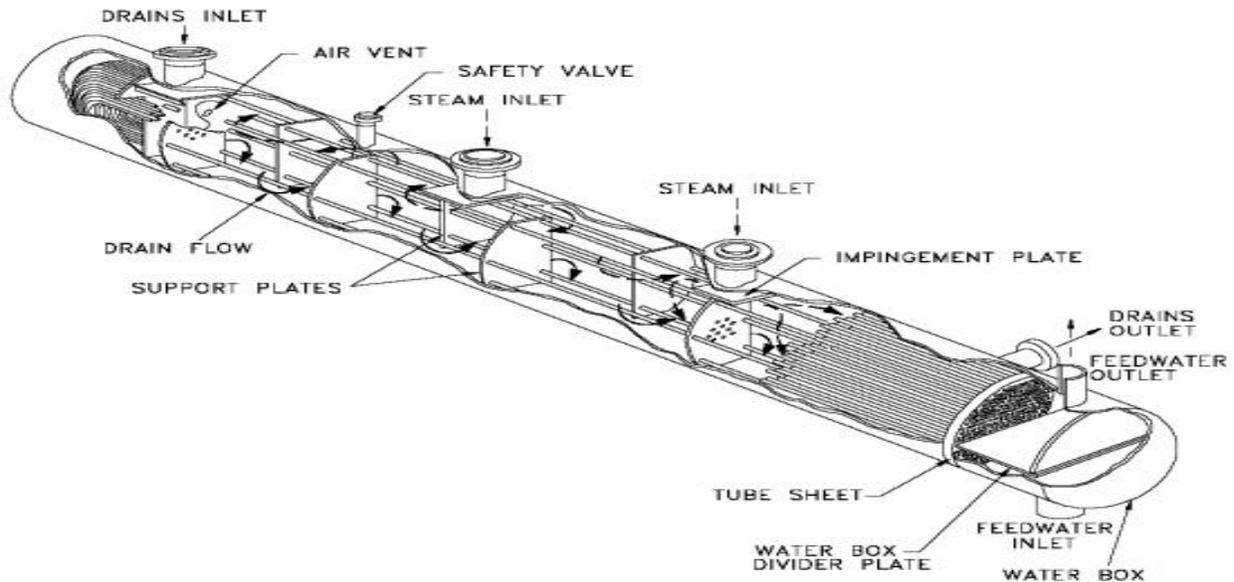


Figura 9: Intercambiador de calor de carcasa y tubo

Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcasa o fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la carcasa por la(s) placa(s) del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado. En sistemas donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos y el líquido con una presión más baja se circula del lado de la cáscara. Esto es debido a los costos en materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones más altas que la cáscara del cambiador con un costo mucho más bajo. Las placas de soporte (support plates) mostradas en la figura, también actúan como baffles para dirigir el flujo del líquido dentro de la cáscara hacia adelante y hacia atrás a través de los tubos [2].

7.4.2. Tipos de intercambiadores de calor según su operación

Ya que los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Las tres categorías son: Flujo paralelo, Contraflujo y Flujo cruzado [2].

7.4.2.1 Flujo paralelo

Como se ilustra en la figura, existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproximan la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente [2].

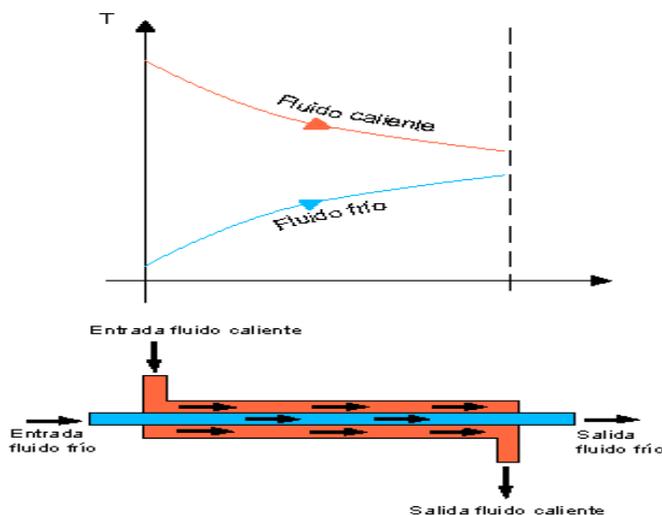


Figura 10: Intercambiador de calor de flujo paralelo

7.4.2.2. Contraflujo

Como se ilustra en la figura, se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos. Ya que el fluido con menor temperatura sale en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que los otros dos tipos mencionados anteriormente. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador [2].

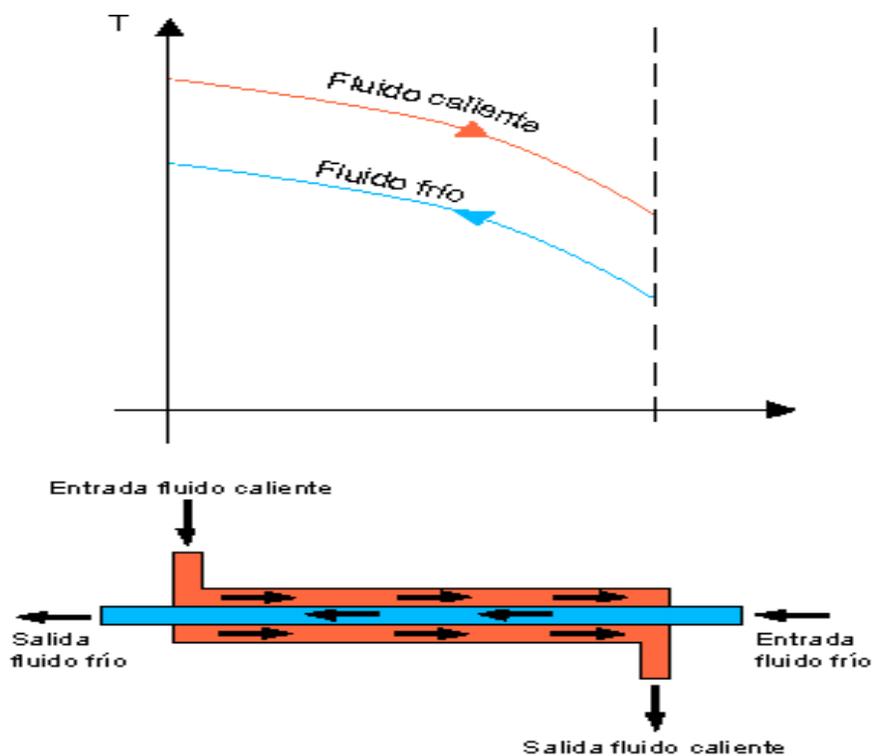


Figura11: Intercambiador en contraflujo

7.4.2.3. Flujo cruzado

En la figura se muestra como en el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90° . Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usado donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico. Un ejemplo típico de este tipo de intercambiador es en los sistemas de condensación de vapor, donde el vapor exhausto que sale de una turbina entra como flujo externo a la carcasa del condensador y el agua fría que fluye por los tubos absorbe el calor del vapor y éste se condensa y forma agua líquida. Se pueden condensar grandes volúmenes de vapor de agua al utiliza este tipo de intercambiador de calor. En la actualidad, la mayoría de los intercambiadores de calor no son puramente de flujo paralelo, contraflujo, o flujo cruzado; estos son comúnmente una combinación de los dos o tres tipos de intercambiador. Desde luego, un intercambiador de calor real que incluye dos, o los tres tipos de intercambio descritos anteriormente, resulta muy complicado de analizar. La razón de incluir la combinación de varios tipos en uno solo, es maximizar la eficacia del intercambiador dentro de las restricciones propias del diseño, que son: tamaño, costo, peso, eficacia requerida, tipo de fluidos, temperaturas y presiones de operación, que permiten establecer la complejidad del intercambiador [2].

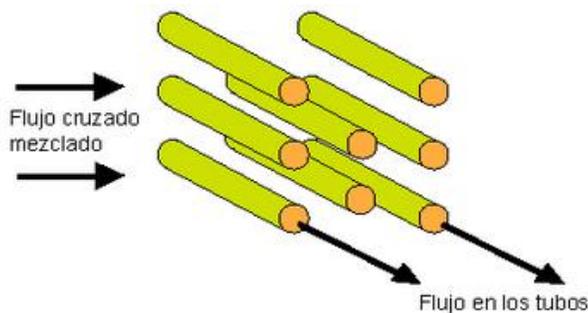


Figura 12: Intercambiador de calor de flujo cruzado

7.5. Redes generalizadas de resistencias térmicas

También se puede usar el concepto de resistencia térmica o la analogía eléctrica para resolver problemas de transferencia de calor en estado estable que comprenden capas en paralelo o disposiciones combinadas serie-paralelo. Aun cuando ese tipo de problemas con frecuencia son bidimensionales o incluso tridimensionales, se puede obtener soluciones aproximadas suponiendo transferencia unidimensional de calor y utilizando la red de resistencia térmica [1].

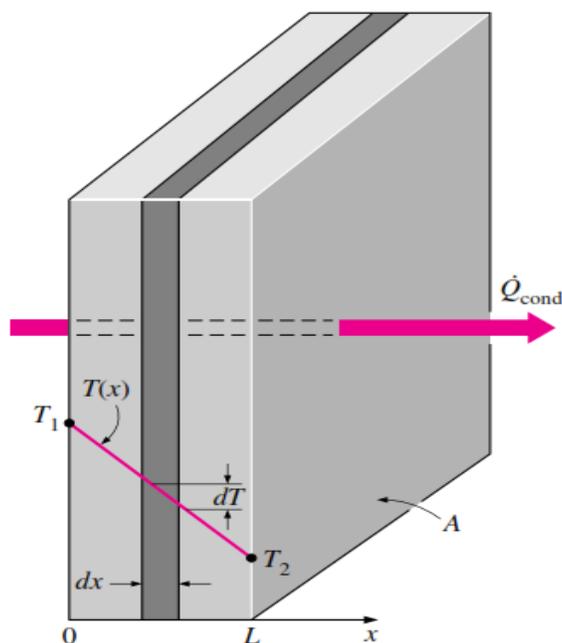


Figura 13: Distribución de temperatura en una pared plana en una línea recta

La resistencia térmica de una pared en contra de la conducción o convección de calor depende de la configuración geométrica y de las propiedades térmicas del medio y para encontrar la transferencia de calor a través de esas paredes se deduce la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_T} \quad (8)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperaturas del medio más caliente al más frío, y R_T es la sumatoria de todas las resistencias térmicas.

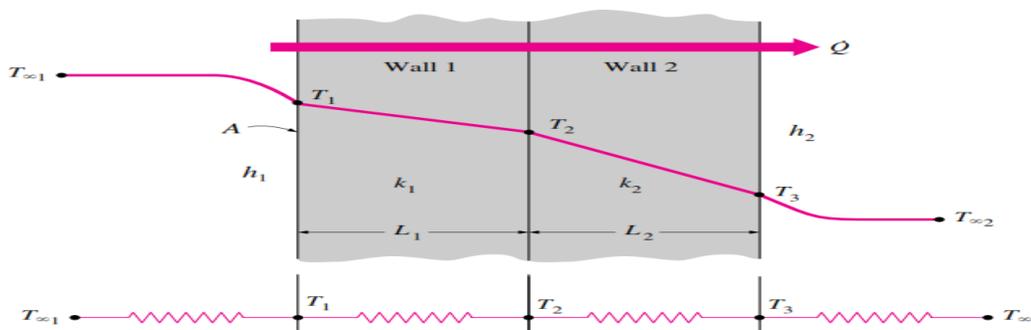


Figura 14: Red de resistencia térmica para la transferencia de calor

Las resistencias térmicas para la conducción y convección son calculadas a partir de las ecuaciones:

$$\text{Conducción: } R_2 = \frac{L_1}{k_1 A}, \quad R_3 = \frac{L_2}{k_2 A}, \quad (9)$$

$$\text{Convección: } R_1 = \frac{1}{h_1 A}, \quad R_4 = \frac{1}{h_2 A}, \quad (10)$$

Y la resistencia térmica total, puede calcularse:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (11)$$

7.6. Convección interna forzada

Es probable que se haya advertido que la mayor parte de los fluidos, en especial los líquidos, se transportan en tubos circulares. Esto se debe a que los tubos con sección transversal circular pueden soportar grandes diferencias de presión entre el interior y el exterior sin sufrir distorsión. En cambio los tubos no circulares se utilizan para los



sistemas de calefacción y enfriamiento de los edificios, donde la diferencia de presión es relativamente baja.

Quizás se debe de mencionar que la fricción entre las capas de fluidos en un tubo puede causar un calentamiento por fricción como resultado de la energía mecánica convertida en energía térmica pero este no se tiene en cuenta en los cálculos y por tanto se descarta.

El flujo de un fluido por un tubo o ducto se puede aproximar como unidimensional y por consiguiente se puede suponer que las propiedades varían solo en una dirección (la del flujo).

Para encontrar las propiedades del fluido que circula en el medio se tiene que encontrar una temperatura media:

$$T_m = \frac{T_{inicial} - T_{final}}{2} \quad (12)$$

8. Memoria de cálculo

8.1. Cálculo de la transferencia de calor en el calentador solar

El colector solar que se utilizará para poder aportar energía térmica a la cámara de madera que simulará las temperaturas en el interior de una incubadora, tiene las especificaciones siguientes:

Número de tubos	8 tubos
Material	Cristal de borosilicato 3.3
Longitud	1.8 m
Diámetro exterior	58 mm
Pared interna	1.6 mm
Pared externa	1.7 mm
Recubrimiento	Nitrato de Aluminio (Al - N /Al)
Pérdida de calor	$< 0.8 \text{ W / (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Expansión térmica	$3.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
Emisividad térmica	$< 8\% \text{ (} 80 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Resistencia al granizo	Granizo de hasta 25 mm
Resistencia a la presión	0.8 MPa (0.56 kg/cm ²)
Coeficiente de absorción	$> 92 \text{ \% (AM 1.5)}$
Temperatura de arranque	$< 25 \text{ } ^\circ\text{C}$
Presión entre tubos (vacío)	$5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
Tolerancia al Congelamiento	$- 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tabla 1: Especificaciones del colector solar

8.2. Cálculo del calor generado por el colector solar

Según la publicación “Actualización de los mapas de irradiación Global solar en la República Mexicana”, realizada los autores por R. Almanza S., E. Cajigal R., J. Barrientos A. en 1997 y publicado en la revista Reportes de insolación de México por Southwest Development Institute, NMSU en 1999, para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, la irradiación solar local varía entre 3.7 y 5.4 $\frac{kW.h}{m^2}$ por día. Considerando la variación de este valor con respecto al mes, se propone un valor medio de 4.7 $\frac{kW.h}{m^2}$. Esta tabla puede apreciarse en la tabla A1 de este trabajo [3].

Entonces, para calcular la cantidad de calor que incide sobre el colector solar, se toma en cuenta la siguiente relación:

$$Q_{inc} = Factor * Area\ exterior \quad (13)$$

Donde el factor es obtenido del apéndice de este trabajo, y el Área exterior es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$A_e = NT \cdot L \cdot \pi \cdot De \quad (14)$$

Considerando el número de tubos (NT), la longitud de los tubos (L) y el diámetro exterior (De) obtenidos de la tabla 1, el área exterior es:

$$A_e = 2.623858 \text{ m}^2$$

Parte del calor incidente solar es disipado a la atmosfera. Según datos del fabricante, este valor es del orden del 8 %. El 92 % restante lo absorbe el agua que circula en el interior de los tubos. Esto puede esquematizarse en la siguiente figura:

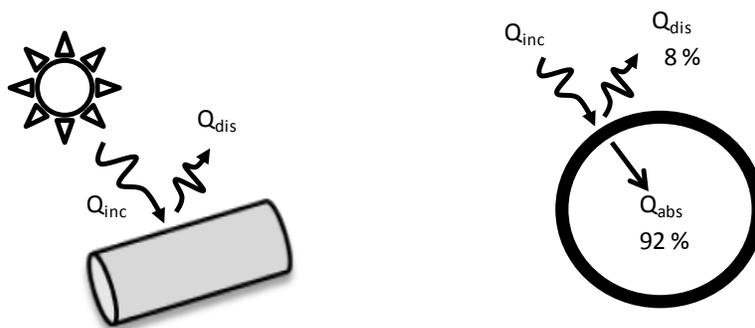


Figura 15: Esquema del balance térmico en los tubos del colector solar

De tal manera que el calor que incide a través de esta área es determinada sustituyendo los datos en la ecuación 12:

$$Q_{inc} = 4.7 * 2.623858 = 12.3321326 \text{ kW} \cdot h$$

El calor que absorbe el equipo es calculado tomando en cuenta el coeficiente de absorción (α). Este cálculo es realizado con la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = \frac{Q_{inc} * \alpha}{1} \tag{15}$$

Sustituyendo los valores a esta ecuación, se obtiene:

$$Q_{abs} = 11.345562 \text{ kW}$$

8.3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h_i)

Aplicando la teoría de Transferencia de Calor:

$$\dot{Q}_{abs} = h_i * A_i * \Delta T_{ln} \tag{16}$$

Donde h_i es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la pared interna del tubo y el agua en $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, A_i es el área de contacto del tubo en m^2 y ΔT_{ln} es la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica.

El área interna es calculada a partir del diámetro interno, el cual considera las dos capas de vidrio del tubo del colector solar, la capa interna cuyo espesor $e_1=1.6$ mm y la exterior $e_2=1.7$ mm, tal como se muestra en la siguiente figura:

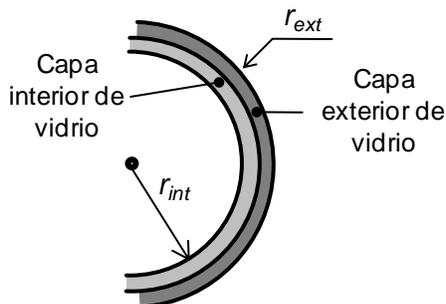


Figura 16: Esquema del balance térmico en los tubos del colector solar

De esta manera, el diámetro interior es calculado a partir del espesor de la capa externa:

$$D_i = D_e - 2(e_1 - e_2) \quad (17)$$

Sustituyendo valores:

$$D_i = 51.4 \text{ mm}$$

El área interna es determinado por la relación:

$$A_i = NT \cdot L \cdot \pi \cdot D_i \quad (18)$$

Considerando los valores de cada término:

$$A_i = 2.325281218 \text{ m}^2$$

El cálculo de la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica es realizado tomando en cuenta la temperatura de entrada $T_{ent} = 30$ °C, la temperatura de salida $T_{sal} = 70$ °C y la temperatura media de la superficie $T_{sup} = 80$ °C:

$$\Delta T_{ln} = \frac{[T_{ent} - T_{sal}]}{\left[\ln \frac{T_{sup} - T_{sal}}{T_{sup} - T_{ent}} \right]} \quad (19)$$

Sustituyendo adecuadamente estos valores, se tiene:

$$\Delta T_{ln} = 24.8534 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se obtiene a partir de la ecuación (16):

$$h_i = \frac{\dot{Q}_{abs}}{A_i * \Delta T_{ln}} \quad (20)$$

$$h_i = 0.19632 \frac{KW}{m^2 \cdot ^\circ C} = 196.32 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

8.4. Cálculo del calor agregado en la cámara térmica

Para simular la cantidad de calor solar que puede agregarse a una incubadora de huevos, se utiliza una cámara térmica hecha de madera y aislada con una capa de espuma de poliuretano con las siguientes características:

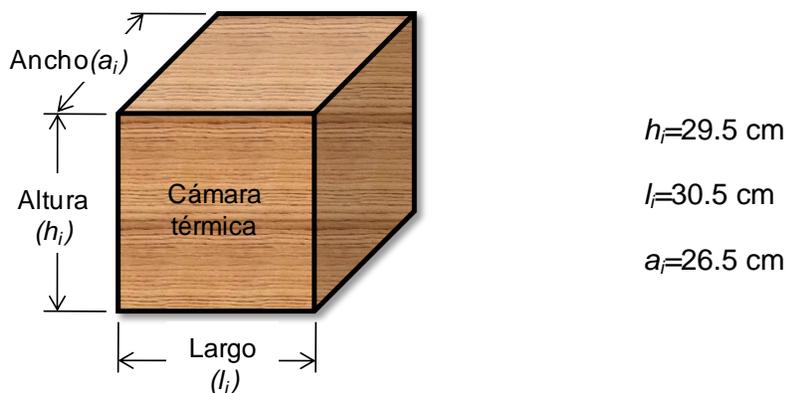


Figura 17: Esquema de la cámara térmica

Con estos valores se calcula el área y el volumen interior de la cámara:

$$\text{Área} = 0.49795 \text{ m}^2 \quad \text{y} \quad \text{vol} = 0.023843 \text{ m}^3$$

Se necesita llevar la temperatura del interior de la cámara de 20 °C a 45 °C en 1 hora para poder llevar a cabo los experimentos que se requieren.

Para encontrar las propiedades del aire, es necesario considerar una temperatura media entre la temperatura inicial y final durante este proceso de calentamiento.

$$T_m = \frac{T_{ini} + T_{fin}}{2} = 32.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las propiedades del aire son encontradas a partir de la tabla 3 apéndice B.

$$\rho = 1.155 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_v = 0.7197 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

Para calcular la masa de aire en el interior de la cámara se utiliza la siguiente ecuación:

$$m = \rho * \text{vol} \tag{21}$$

Sustituyendo los valores de la densidad del aire y el volumen interior de la cámara:

$$m = 0.027531 \text{ kg}$$

Posteriormente, se calcula la cantidad de calor necesario para calentar esta masa de aire a partir de la expresión:

$$Q_1 = m * c_v * \Delta T = m * c_v * [T_{fin} + T_{ini}] \tag{22}$$

Entonces, al sustituir los valores,

$$Q_1 = 0.495364 \text{ kJ}$$

Se calcula la cantidad de calor perdido a través de las paredes de la cámara a partir del método de resistencias térmicas. En la siguiente figura se muestra la posición y la geometría de los materiales utilizados en la cámara térmica, las conductividades térmicas de la madera y la espuma de poliuretano, y los coeficientes de transferencia de calor por convección natural tanto en el interior como en el exterior de la cámara. Estos valores fueron obtenidos del libro de textos Transferencia de calor de Cengel [1]

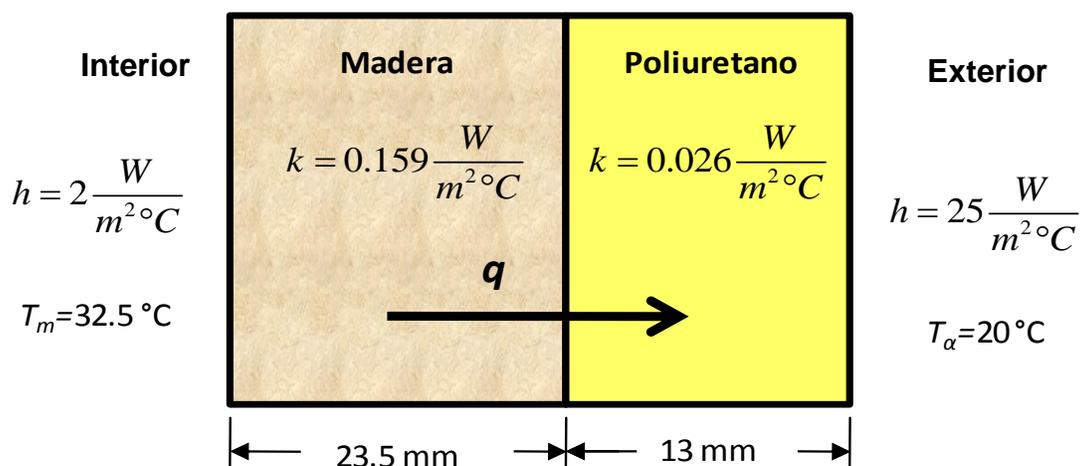


Figura 18: Esquema de la transferencia de calor a través de la cámara térmica

Las resistencias térmicas a la conducción y convección, son calculadas a partir de las expresiones:

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (23)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (24)$$

Donde k es la conductividad térmica del material, h es el coeficiente de transferencia de calor, considerando para el interior un valor de $2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ y para el exterior $25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$. A es el área, determinada previamente y considerada 0.49795 m^2 .

Sustituyendo los valores respectivos en las ecuaciones (23) y (24), se tiene:

Para la conducción:

$$R_2 = \frac{0.0235}{0.159 \cdot 0.49795} = 0.296814423 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{0.013}{0.026 \cdot 0.49795} = 1.004116879 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Para la convección:

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot 0.49795} = 1.004116879 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_4 = \frac{1}{25 \cdot 0.49795} = 0.08032935 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Por lo tanto, tal como se explicó en el marco teórico, la resistencia total es:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 2.385377532 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Y el calor perdido a través de las paredes de la cámara térmica es determinado a través de la expresión:

$$\dot{Q}_2 = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_m - T_{amb}}{R_T} \quad (25)$$

Donde T_{amb} es considerado 20 °C.

Se obtiene así la razón de pérdida de calor:

$$\dot{Q}_2 = 5.24026 \text{ W}$$

Finalmente, para calcular la cantidad de calor que debe suministrarse a la cámara térmica, debe tomarse en cuenta la cantidad de calor suministrada al aire interior para que la temperatura vaya de 20 °C a 45 °C y también la pérdida de calor a través de las paredes de esta cámara:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (26)$$

Debe recordarse que \dot{Q}_1 debe suministrarse en 1 hora, de tal forma que este valor debe considerar un factor de conversión de tiempo:

$$\dot{Q}_T = 0.495364 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + 5.24026 \text{ W} = \frac{495.364 \text{ J}}{3600 \text{ s}} + 5.24026 \text{ W} = 5.3770 \text{ W}$$

Para calcular del flujo másico necesario para llevar a cabo este proceso de calentamiento es necesario conocer las propiedades del agua a la temperatura media:

$$T_{med,agua} = \frac{T_{ent} + T_{sal}}{2} \quad (27)$$

Si se consideran las temperaturas T_{ent} y T_{sal} , la temperatura media del agua es:

$$T_{med,agua} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

Y con este valor se puede determinar a través de la tabla 2 mostrada en el apéndice A de este trabajo que:

$$C_p = 4.182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

Finalmente, se calcula el flujo másico del agua por el serpentín dentro de la cámara térmica con la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{Q}_T}{C_p \cdot \Delta T} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 0.00003215 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se observa que el flujo másico del agua a través del serpentín de la cámara térmica es demasiado pequeño, es decir, 0.03215 g/s. No será necesaria una bomba para hacer circular el agua desde el calentador solar a la cámara térmica puesto que la circulación natural que se genera como consecuencia al cambio de densidad del agua es suficiente.

9. Resultados

Se realizó el diseño del colector solar en SolidWorks. Los resultados obtenidos son mostrados a continuación.

9.1 Diseño del colector solar en diferentes vistas

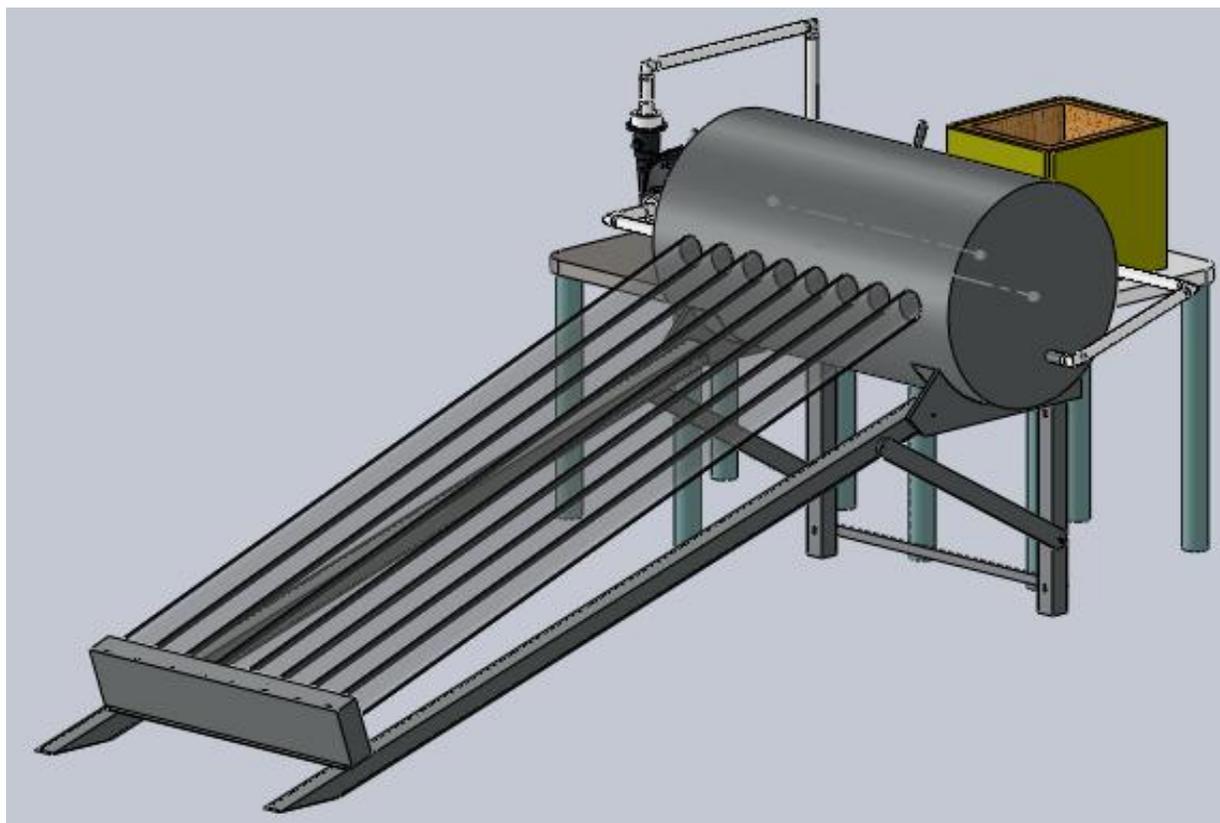


Figura 19: Vista isométrica del colector solar

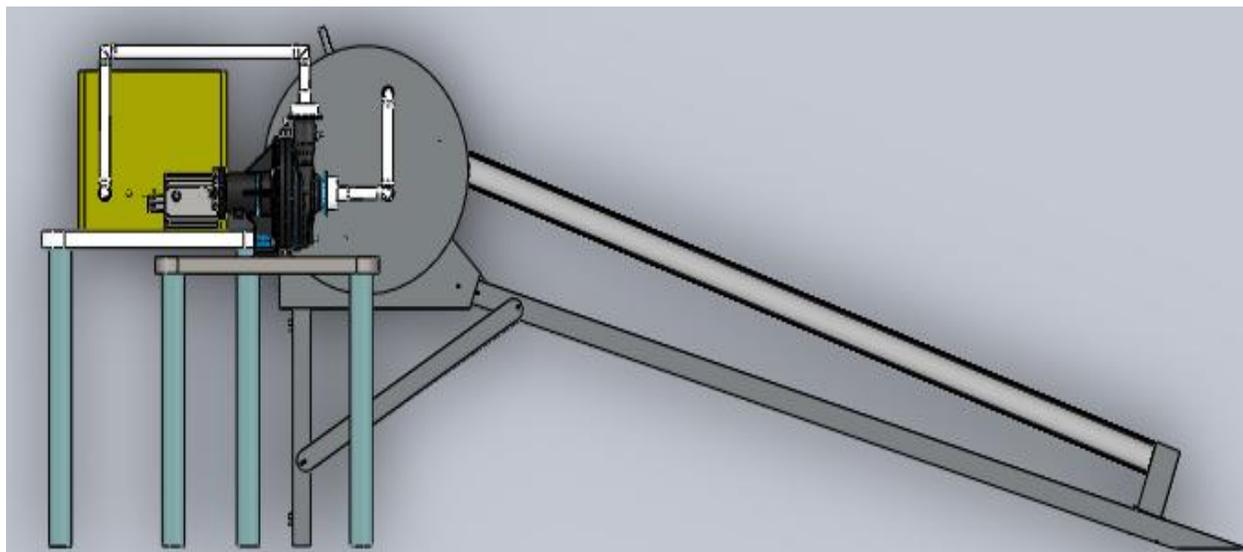


Figura 20: Vista lateral derecha del colector solar

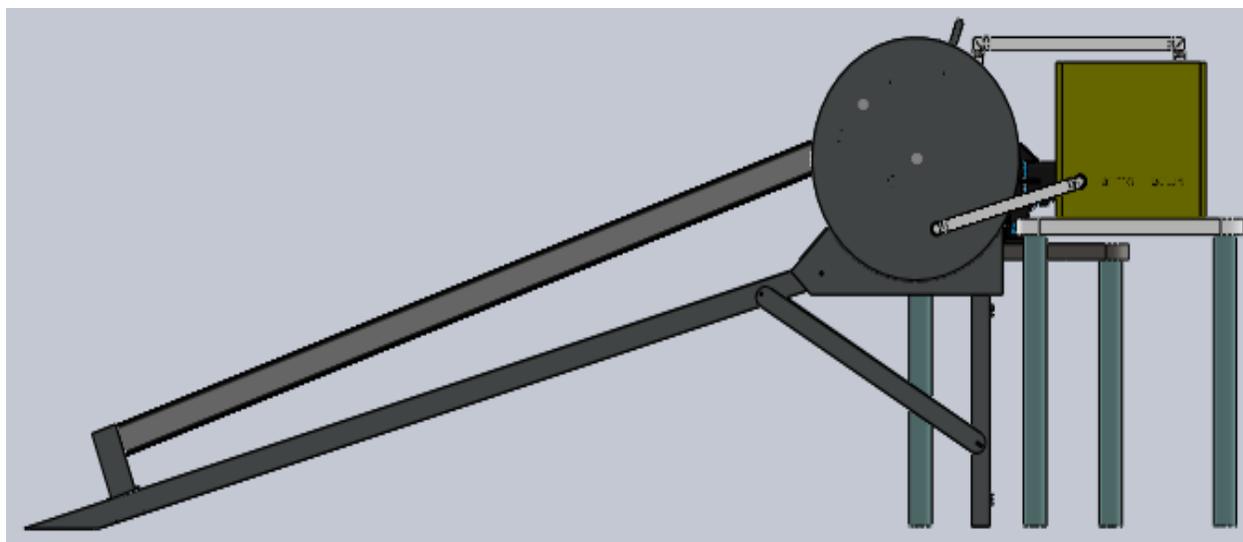


Figura 21: Vista lateral izquierda del colector solar

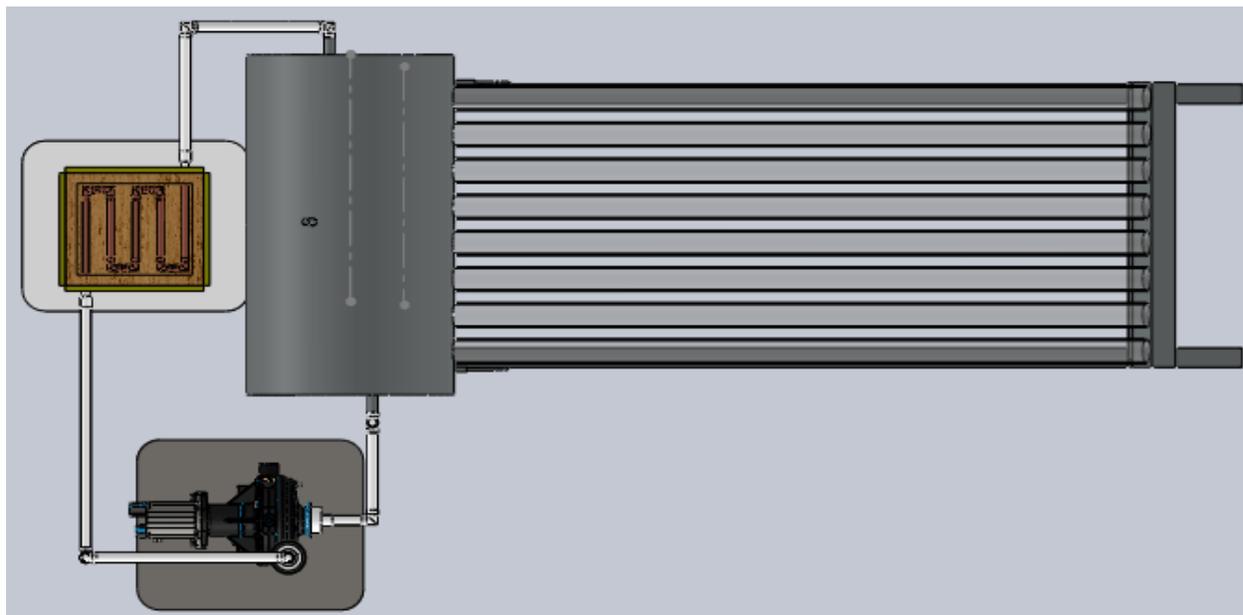


Figura 22: Vista superior del colector solar

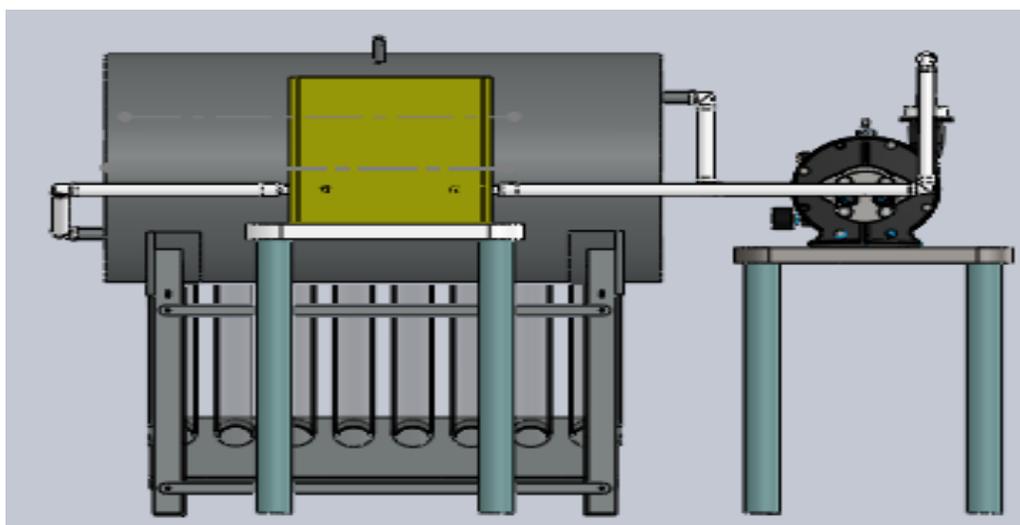


Figura 23: Vista posterior del colector solar

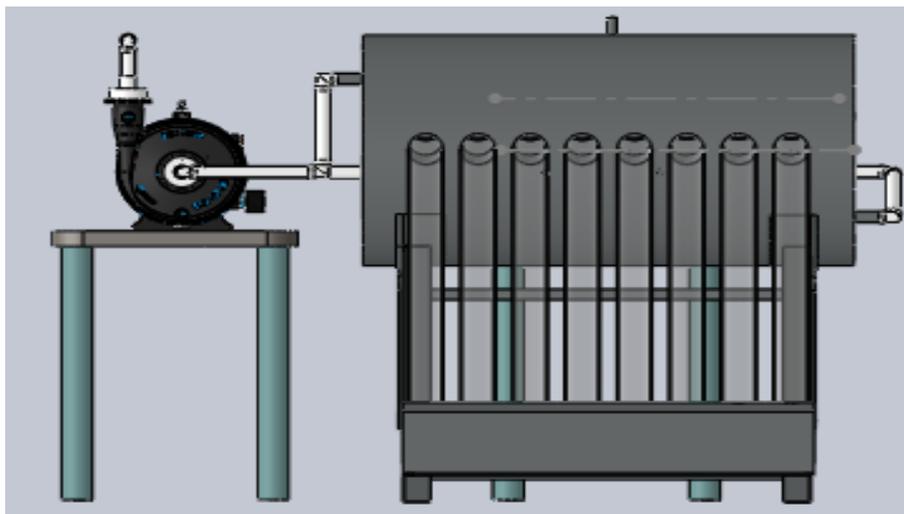


Figura 24: Vista frontal del colector solar

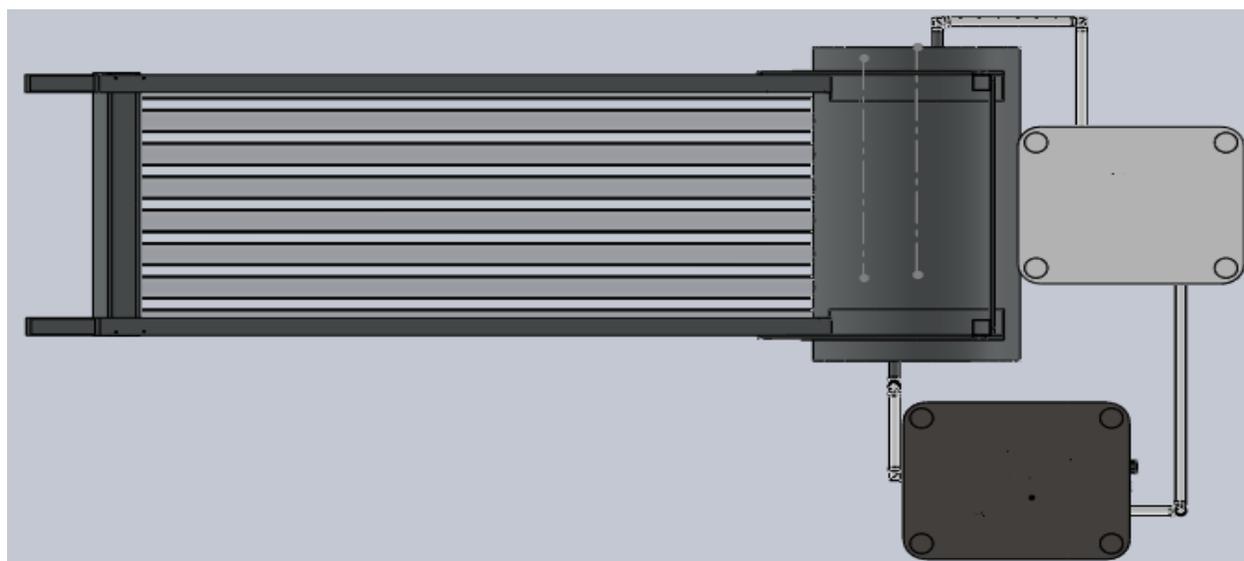


Figura 25: Vista inferior del colector solar

Nota: Piezas principales desglosadas en apéndice D

9.2. Pruebas experimentales realizadas en el prototipo del colector solar

T_1 : Temperatura del agua de la salida del contenedor hacia la cámara térmica.

T_2 : Temperatura del agua a la entrada de la cámara térmica.

T_3 : Temperatura del agua a la salida de la cámara térmica.

T_{int} : Temperatura del espacio en el interior de la cámara térmica.

T_{amb} : Temperatura del ambiente

Fecha	Hora	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_{int} (°C)	T_{amb} (°C)
13-nov-13	07:32:58 p.m.	79.22363	73.9895	68.82117	41.53198	23.34143
13-nov-13	07:37:33 p.m.	79.2666	74.10364	68.9447	42.8103	23.34143
13-nov-13	07:42:50 p.m.	79.17664	73.91431	69.10718	44.44714	23.40857
13-nov-13	07:48:24 p.m.	79.16992	73.99353	69.0481	44.97217	23.48645
13-nov-13	07:53:07 p.m.	78.95508	73.729	68.84802	43.73413	23.53076
13-nov-13	07:57:31 p.m.	79.02625	73.90088	68.96082	45.13062	23.6167
13-nov-13	08:02:00 p.m.	78.85303	73.69141	68.93396	44.86743	23.67578
13-nov-13	08:06:26 p.m.	78.76575	73.48596	68.52576	43.50183	23.71069
13-nov-13	08:10:48 p.m.	78.68652	73.41614	68.32568	43.16345	23.69055
13-nov-13	08:15:08 p.m.	78.5791	73.24561	68.01416	41.95898	23.63147
13-nov-13	08:19:29 p.m.	78.51196	73.20935	67.896	41.67297	23.55359
13-nov-13	08:23:48 p.m.	78.41797	73.04956	67.80603	41.48767	23.48914
13-nov-13	08:28:08 p.m.	78.3468	73.01599	67.62073	41.34937	23.42603
13-nov-13	08:32:27 p.m.	78.25415	72.85486	67.58447	41.09558	23.33875
13-nov-13	08:36:46 p.m.	78.21387	72.84815	67.6449	41.86633	23.29175
13-nov-13	08:41:04 p.m.	78.14539	72.69507	67.43811	41.57092	23.25147
13-nov-13	08:45:23 p.m.	78.06079	72.54602	67.34815	41.15332	23.20044
13-nov-13	08:49:44 p.m.	77.93323	72.53528	67.10645	41.03919	23.16821
13-nov-13	08:54:08 p.m.	77.85803	72.28955	66.97351	40.30469	23.08765
13-nov-13	08:58:32 p.m.	77.81104	72.37817	66.82849	40.50073	23.03125
13-nov-13	09:02:59 p.m.	77.68079	72.18481	66.90906	40.65649	22.98962
13-nov-13	09:07:23 p.m.	77.66065	72.21033	66.901	41.84351	23.00708
13-nov-13	09:11:42 p.m.	77.51563	71.97669	66.60022	40.68335	22.99634
13-nov-13	09:16:01 p.m.	77.47266	71.95252	66.4928	40.67529	22.99365
13-nov-13	09:20:20 p.m.	77.3988	71.91089	66.50891	40.9519	23.00977



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

13-nov-13	09:24:39 p.m.	77.26184	71.74841	66.43372	40.73975	22.98962
13-nov-13	09:28:57 p.m.	77.16113	71.63696	66.0658	40.13013	22.95606
13-nov-13	09:33:15 p.m.	77.05774	71.49194	65.9342	39.55273	22.89966
13-nov-13	09:37:34 p.m.	76.99194	71.42883	65.74622	39.40369	22.86877
13-nov-13	09:41:52 p.m.	76.92346	71.36707	65.96777	40.22412	22.86475
13-nov-13	09:46:11 p.m.	76.79321	71.12671	65.65759	39.86292	22.84595
13-nov-13	09:50:29 p.m.	76.75427	71.21265	65.54749	39.93811	22.85266
13-nov-13	09:54:47 p.m.	76.64148	71.03003	65.27893	39.23987	22.83118
13-nov-13	09:59:06 p.m.	76.55554	71.01123	65.52869	40.00659	22.85266
13-nov-13	10:03:24 p.m.	76.42395	70.76953	65.30042	39.72461	22.85803
13-nov-13	10:07:43 p.m.	76.37561	70.73059	65.30847	40.1449	22.85669
13-nov-13	10:12:02 p.m.	76.22656	70.57752	65.07752	39.29627	22.84729
13-nov-13	10:16:21 p.m.	76.14063	70.54797	65.04932	39.63733	22.81372
13-nov-13	10:20:39 p.m.	76.05335	70.40564	64.98218	39.72998	22.82849
13-nov-13	10:24:58 p.m.	75.95129	70.33984	64.73377	39.23315	22.82446
13-nov-13	10:29:17 p.m.	75.86401	70.27405	64.69348	39.27612	22.82849
13-nov-13	10:33:36 p.m.	75.8009	70.20288	64.73377	39.8938	22.79761
13-nov-13	10:37:54 p.m.	75.6156	69.99207	64.58606	39.39026	22.78284
13-nov-13	10:42:14 p.m.	75.54175	69.96387	64.34973	39.4668	22.79358
13-nov-13	10:46:33 p.m.	75.50281	69.87122	64.36585	39.92334	22.76807
13-nov-13	10:50:51 p.m.	75.44775	69.85779	64.53235	41.21912	22.7627
13-nov-13	10:55:11 p.m.	75.30945	69.75574	64.59143	41.94959	22.78284
13-nov-13	10:59:30 p.m.	75.22217	69.67517	64.41284	42.01672	22.78687
13-nov-13	11:03:49 p.m.	75.05029	69.44421	64.26379	40.71692	22.80298
13-nov-13	11:08:09 p.m.	75.04224	69.46167	64.0946	40.94251	22.79895
13-nov-13	11:12:28 p.m.	74.83814	69.18237	63.98047	39.92737	22.75195
13-nov-13	11:16:49 p.m.	74.75354	69.12598	63.60852	39.61047	22.71838
13-nov-13	11:21:10 p.m.	74.63806	68.96216	63.53735	39.04248	22.6687
13-nov-13	11:25:31 p.m.	74.56958	68.96484	63.47961	39.56482	22.62708
13-nov-13	11:29:52 p.m.	74.4823	68.91516	63.6582	40.34363	22.63245
13-nov-13	11:34:12 p.m.	74.37891	68.74866	63.46082	40.45911	22.61231
13-nov-13	11:38:32 p.m.	74.20032	68.57275	63.24866	39.55945	22.62708
13-nov-13	11:42:51 p.m.	74.20032	68.65198	63.24463	40.21338	22.6217
13-nov-13	11:47:11 p.m.	74.06067	68.46265	63.35339	40.60547	22.64856
13-nov-13	11:51:33 p.m.	74.11169	68.55127	63.25806	42.13623	22.66736
13-nov-13	11:55:55 p.m.	73.97607	68.58215	63.36951	42.49475	22.69556
14-nov-13	12:00:15 a.m.	73.72632	68.24646	63.24866	41.2688	22.73853
14-nov-13	12:04:35 a.m.	73.69275	68.07996	62.73303	40.30872	22.67542



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

14-nov-13	12:08:56 a.m.	73.62024	68.09204	62.66858	40.09522	22.61096
14-nov-13	12:13:20 a.m.	73.60815	68.11487	62.88879	41.67029	22.58948
14-nov-13	12:17:44 a.m.	73.42419	67.97791	62.91296	42.30945	22.54651
14-nov-13	12:22:06 a.m.	73.28723	67.74829	62.54102	40.7384	22.4834
14-nov-13	12:26:27 a.m.	73.09522	67.54016	62.24829	39.42249	22.40418
14-nov-13	12:30:49 a.m.	73.03345	67.60461	62.45374	40.48596	22.41089
14-nov-13	12:35:10 a.m.	72.85083	67.31458	62.1731	39.31506	22.36255
14-nov-13	12:39:31 a.m.	72.84009	67.34143	61.97034	39.46411	22.36926
14-nov-13	12:43:52 a.m.	72.78369	67.328	62.08313	40.18787	22.35986
14-nov-13	12:48:14 a.m.	72.64002	67.11182	62.02808	40.20398	22.3894
14-nov-13	12:52:36 a.m.	72.61316	67.11047	61.94348	40.49402	22.35584
14-nov-13	12:56:57 a.m.	72.48425	67.09033	61.99854	41.36011	22.36255
14-nov-13	01:01:18 a.m.	72.33521	66.89966	61.92065	40.79077	22.37463
14-nov-13	01:05:40 a.m.	72.29895	66.88623	61.83472	41.25806	22.39478
14-nov-13	01:10:00 a.m.	72.18481	66.79761	61.67896	40.97473	22.42029
14-nov-13	01:14:22 a.m.	72.1687	66.80298	61.90454	42.7915	22.43774
14-nov-13	01:18:44 a.m.	71.95789	66.60156	61.77564	42.91101	22.427
14-nov-13	01:23:05 a.m.	71.84375	66.4176	61.47083	40.74915	22.42297
14-nov-13	01:27:26 a.m.	71.76453	66.39075	61.12573	39.79846	22.34241
14-nov-13	01:31:46 a.m.	71.6759	66.34509	61.19959	40.74512	22.33167
14-nov-13	01:36:09 a.m.	71.67725	66.32898	61.44531	42.51624	22.37195
14-nov-13	01:40:32 a.m.	71.33215	66.047	61.25598	41.43396	22.38538
14-nov-13	01:44:53 a.m.	71.42212	66.07117	61.1405	42.22888	22.37866
14-nov-13	01:49:15 a.m.	71.37378	66.16785	61.28149	43.58374	22.40015
14-nov-13	01:53:37 a.m.	71.27576	65.97717	61.30029	43.56226	22.35852
14-nov-13	01:57:58 a.m.	71.17236	65.92883	61.25598	43.82678	22.35046
14-nov-13	02:02:19 a.m.	71.12671	65.9718	61.19421	44.08057	22.37598
14-nov-13	02:06:40 a.m.	70.93201	65.78784	61.11231	43.9342	22.38538
14-nov-13	02:11:01 a.m.	70.82861	65.58911	60.82361	43.32459	22.35718
14-nov-13	02:15:23 a.m.	70.75745	65.5354	60.83032	43.61194	22.32764
14-nov-13	02:19:45 a.m.	70.65942	65.56897	60.73767	43.31653	22.2699
14-nov-13	02:24:06 a.m.	70.63525	65.44812	60.5	42.38464	22.12219
14-nov-13	02:28:27 a.m.	70.48084	65.3501	60.64502	43.29639	22.07922
14-nov-13	02:32:49 a.m.	70.36536	65.18091	60.56177	43.60523	22.06714
14-nov-13	02:37:11 a.m.	70.31836	65.13391	60.45837	43.66565	22.03491
14-nov-13	02:41:32 a.m.	70.23511	65.09766	60.37781	43.30847	22.00403
14-nov-13	02:45:52 a.m.	70.10083	64.99695	60.17639	43.21716	21.92078
14-nov-13	02:50:12 a.m.	69.98132	64.7821	60.10657	42.51086	21.83081



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

14-nov-13	02:54:33 a.m.	69.91687	64.70288	60.04211	42.89356	21.80798
14-nov-13	02:58:54 a.m.	69.82269	64.66931	60.00049	42.95532	21.79724
14-nov-13	03:03:15 a.m.	69.75171	64.60486	60.0542	43.63208	21.8147
14-nov-13	03:07:36 a.m.	69.62683	64.39807	59.89978	43.25745	21.81873
14-nov-13	03:11:57 a.m.	69.56909	64.42896	59.73865	43.23999	21.80261
14-nov-13	03:16:17 a.m.	69.46838	64.39404	59.8031	43.74622	21.83215
14-nov-13	03:20:38 a.m.	69.34485	64.17517	59.72388	43.38367	21.84827
14-nov-13	03:24:58 a.m.	69.29785	64.10266	59.51306	42.96204	21.8053
14-nov-13	03:29:37 a.m.	69.10315	63.98047	59.3103	41.67969	21.74219
14-nov-13	03:34:30 a.m.	69.0575	63.7898	59.05652	40.64844	21.61597
14-nov-13	03:39:19 a.m.	68.99707	63.85156	59.1908	41.60986	21.65625
14-nov-13	03:43:59 a.m.	68.84265	63.74548	59.17065	42.53235	21.66431
14-nov-13	03:48:29 a.m.	68.59424	63.44873	59.07398	42.11475	21.74085
14-nov-13	03:52:57 a.m.	68.66541	63.36682	58.91687	42.50952	21.77576
14-nov-13	03:57:26 a.m.	68.5835	63.49841	58.84302	42.33899	21.83215
14-nov-13	04:01:53 a.m.	68.52441	63.49707	58.91956	42.59143	21.8335
14-nov-13	04:06:12 a.m.	68.41834	63.31848	58.98669	42.83044	21.85901
14-nov-13	04:10:31 a.m.	68.276	63.07275	58.80676	42.64111	21.89661
14-nov-13	04:14:49 a.m.	68.23572	63.15735	58.57044	41.54675	21.89124
14-nov-13	04:19:08 a.m.	68.24915	63.33728	58.55029	41.79919	21.84692
14-nov-13	04:23:26 a.m.	68.08667	63.17615	58.68591	42.63977	21.88452
14-nov-13	04:27:46 a.m.	67.95508	62.89282	58.54492	42.79956	21.92346
14-nov-13	04:32:05 a.m.	67.95642	62.8606	58.41467	42.87476	21.99194
14-nov-13	04:36:24 a.m.	67.89868	62.94653	58.41736	42.87878	22.03626
14-nov-13	04:40:42 a.m.	67.78455	62.84583	58.35022	42.71497	22.02148
14-nov-13	04:45:01 a.m.	67.63684	62.71155	58.39722	42.61292	22.0094
14-nov-13	04:49:20 a.m.	67.57507	62.61755	58.21326	42.62634	22
14-nov-13	04:53:38 a.m.	67.51062	62.50745	58.06824	42.33899	21.96509
14-nov-13	04:57:57 a.m.	67.36426	62.38525	57.98633	41.65283	21.94495
14-nov-13	05:02:15 a.m.	67.2085	62.02539	57.53247	39.99451	21.90601
14-nov-13	05:06:34 a.m.	67.2273	62.15698	57.63184	41.27954	21.88989
14-nov-13	05:10:52 a.m.	66.99365	62.02539	57.74597	41.89587	21.89929
14-nov-13	05:15:10 a.m.	66.98023	61.81592	57.63452	41.90259	21.88721
14-nov-13	05:19:28 a.m.	66.94666	61.81189	57.26257	40.73303	21.85498
14-nov-13	05:23:46 a.m.	66.79761	61.64002	56.97656	38.87463	21.77576
14-nov-13	05:28:05 a.m.	66.69287	61.56482	56.95105	39.14453	21.76233
14-nov-13	05:32:23 a.m.	66.64856	61.53931	56.98193	39.51917	21.7583
14-nov-13	05:36:42 a.m.	66.58814	61.49365	57.05847	40.46179	21.75159



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

14-nov-13	05:41:00 a.m.	66.55859	61.53259	57.13904	41.00427	21.77441
14-nov-13	05:45:18 a.m.	66.32629	61.35132	56.94031	40.49268	21.68042
14-nov-13	05:49:37 a.m.	66.33972	61.26672	56.91211	40.40405	21.64282
14-nov-13	05:53:55 a.m.	66.29541	61.30566	56.84497	40.4967	21.60925
14-nov-13	05:58:14 a.m.	66.21216	61.32044	56.86646	41.12109	21.57971
14-nov-13	06:02:32 a.m.	66.07922	61.16199	56.69727	39.61182	21.49243
14-nov-13	06:06:51 a.m.	66.00806	60.99817	56.52808	39.23853	21.40784
14-nov-13	06:11:09 a.m.	65.88049	60.83167	56.27698	38.27844	21.32593
14-nov-13	06:15:28 a.m.	65.88855	60.9552	56.39111	40.1073	21.37024
14-nov-13	06:19:47 a.m.	65.76367	60.7699	56.45557	40.32617	21.40247
14-nov-13	06:24:06 a.m.	65.51392	60.30261	55.95606	37.599	21.43066
14-nov-13	06:28:25 a.m.	65.48303	60.35767	55.60828	36.65637	21.44409
14-nov-13	06:32:44 a.m.	65.48438	60.46375	55.77478	37.55737	21.46423
14-nov-13	06:37:03 a.m.	65.38635	60.37915	55.86475	38.26233	21.5354
14-nov-13	06:42:43 a.m.	64.37793	60.02197	55.54114	36.49793	21.59045
14-nov-13	06:48:03 a.m.	65.13123	60.16028	55.22156	36.40527	21.56226
14-nov-13	06:53:07 a.m.	65.01172	59.99109	55.30884	36.81751	21.5166
14-nov-13	06:57:53 a.m.	64.91504	59.79639	55.16919	36.75708	21.52197
14-nov-13	07:02:53 a.m.	64.90698	59.91455	55.20007	37.40967	21.51929
14-nov-13	07:07:16 a.m.	64.77136	59.84607	55.30615	37.42041	21.55957
14-nov-13	07:11:51 a.m.	64.61963	59.60303	55.0094	36.65906	21.61462
14-nov-13	07:16:18 a.m.	64.69885	59.75342	55.05103	37.94006	21.67773
14-nov-13	07:21:00 a.m.	64.59277	59.7655	55.22156	38.64771	21.72339
14-nov-13	07:25:21 a.m.	64.49609	59.56409	55.10742	37.92127	21.70728
14-nov-13	07:29:40 a.m.	64.43567	59.67822	55.22022	38.98071	21.71936
14-nov-13	07:33:58 a.m.	64.38464	59.56543	55.09265	38.42481	21.66162
14-nov-13	07:38:18 a.m.	64.31213	59.50501	55.05237	38.38989	21.64417
14-nov-13	07:42:38 a.m.	64.2544	59.60974	55.14771	39.64539	21.72742
14-nov-13	07:46:58 a.m.	64.14832	59.45532	55.0094	38.28113	21.79187
14-nov-13	07:51:20 a.m.	64.05029	59.33313	54.85364	38.27307	21.81335
14-nov-13	07:55:53 a.m.	64.0221	59.3291	54.90869	39.15125	22.08997
14-nov-13	08:00:48 a.m.	63.99658	59.37207	54.96375	39.28821	22.40015
14-nov-13	08:06:20 a.m.	63.76025	59.06726	54.83752	39.23987	22.58142
14-nov-13	08:10:41 a.m.	63.771	59.05786	54.78516	39.2439	22.75195
14-nov-13	08:15:23 a.m.	63.65283	59.03369	54.78784	39.75012	22.91577
14-nov-13	08:21:24 a.m.	61.93005	58.15015	51.85925	36.87793	22.87146
14-nov-13	08:26:49 a.m.	63.4541	58.86047	54.50183	37.93469	23.65161
14-nov-13	08:31:30 a.m.	63.33325	58.60132	54.23328	37.31702	23.7738

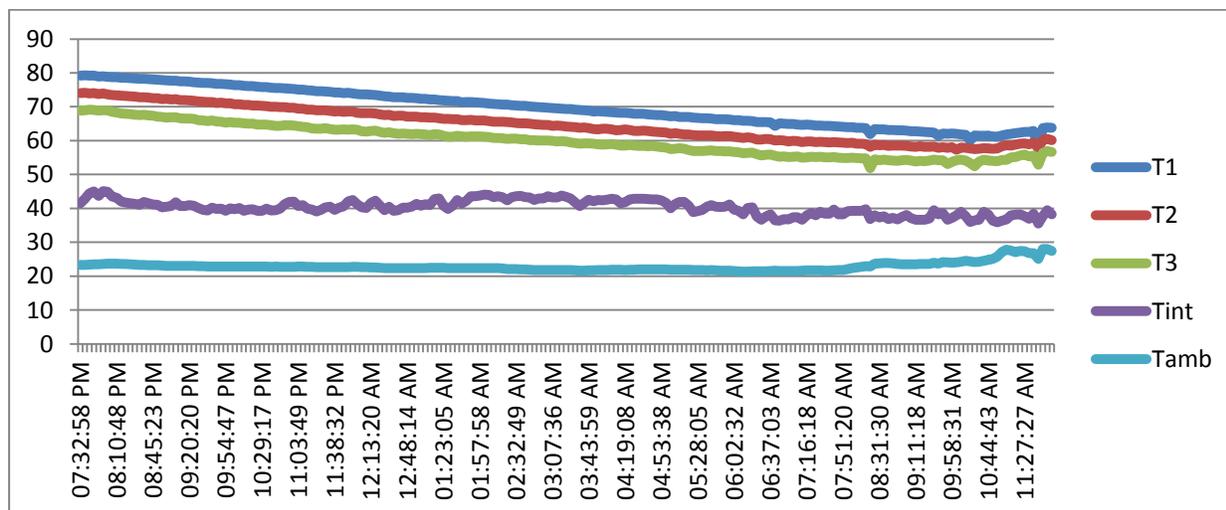


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

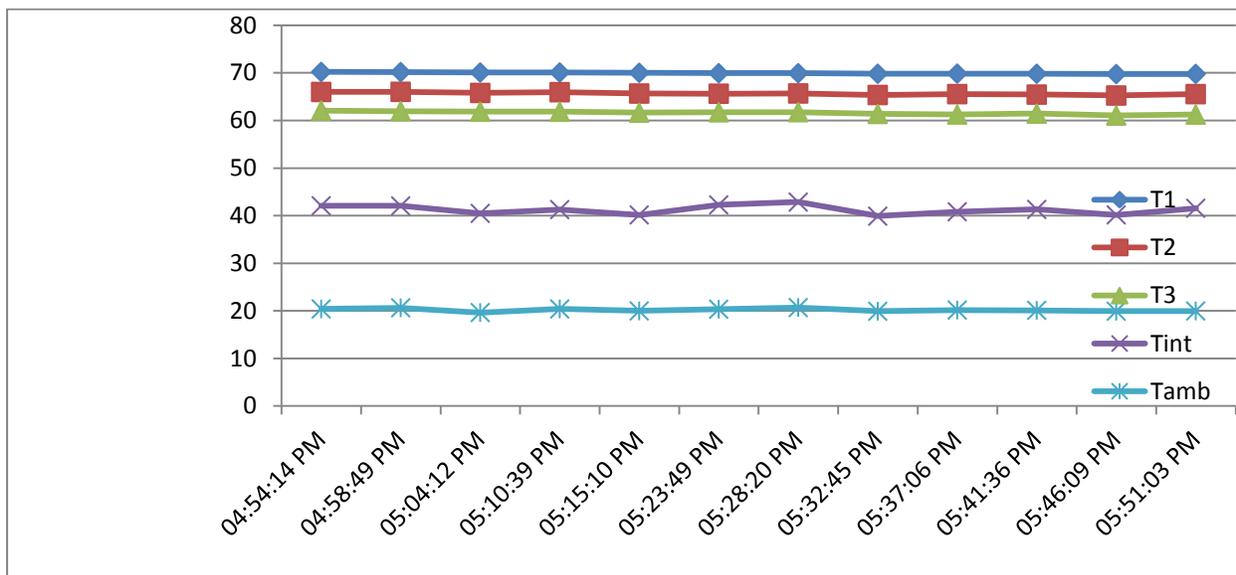
14-nov-13	08:36:02 a.m.	63.28223	58.68457	54.35681	37.68628	23.89868
14-nov-13	08:40:42 a.m.	63.16138	58.47913	54.25073	36.83765	23.8396
14-nov-13	08:45:14 a.m.	63.15601	58.49793	54.08826	37.1908	23.76306
14-nov-13	08:49:56 a.m.	63.08081	58.48853	54.03589	36.73425	23.58313
14-nov-13	08:55:04 a.m.	63.0083	58.56372	54.22656	37.49561	23.48377
14-nov-13	08:59:41 a.m.	62.94653	58.43213	54.26148	38.03674	23.47571
14-nov-13	09:04:59 a.m.	62.75183	58.27234	54.16077	37.11963	23.47705
14-nov-13	09:11:18 a.m.	62.74512	58.16492	53.82507	36.66711	23.51196
14-nov-13	09:15:57 a.m.	62.64307	58.34216	54.01843	36.61475	23.60999
14-nov-13	09:21:01 a.m.	62.56116	58.17969	53.93921	36.60132	23.6261
14-nov-13	09:25:59 a.m.	62.49133	58.19312	54.11646	36.97998	23.54553
14-nov-13	09:37:19 a.m.	62.35974	58.27368	54.38367	39.49634	23.95105
14-nov-13	09:42:51 a.m.	61.40906	57.92053	54.17017	38.20325	23.67981
14-nov-13	09:48:30 a.m.	62.13684	58.02527	54.17688	38.58862	24.19678
14-nov-13	09:53:23 a.m.	62.02673	57.83728	53.07312	36.59998	24.04773
14-nov-13	09:58:31 a.m.	62.0979	58.10315	53.78479	37.19751	23.95911
14-nov-13	10:04:59 a.m.	62.00525	57.29077	54.24268	37.94141	24.01685
14-nov-13	10:11:36 a.m.	61.81995	57.9823	54.36353	38.98071	24.28406
14-nov-13	10:17:27 a.m.	61.76758	57.84131	54.11511	37.67285	24.48682
14-nov-13	10:22:46 a.m.	59.9978	57.67883	53.3927	36.02393	24.36194
14-nov-13	10:28:40 a.m.	61.50574	57.54456	52.42053	36.44287	24.12695
14-nov-13	10:35:02 a.m.	61.45471	57.62647	53.85461	36.66711	24.22229
14-nov-13	10:39:59 a.m.	61.4574	57.82251	54.3689	38.99548	24.50293
14-nov-13	10:44:43 a.m.	61.39966	57.68286	54.15942	38.18579	24.77417
14-nov-13	10:50:15 a.m.	61.24524	57.60901	54.00903	36.37305	25.12463
14-nov-13	10:55:05 a.m.	61.18213	57.73254	53.93787	35.93665	25.78528
14-nov-13	10:59:45 a.m.	61.49231	58.31934	54.28967	36.36902	27.12671
14-nov-13	11:05:45 a.m.	61.82666	58.59729	54.34741	36.72754	27.85852
14-nov-13	11:10:52 a.m.	62.02271	58.51807	55.03626	37.94678	27.56714
14-nov-13	11:17:12 a.m.	62.18652	58.77856	55.19739	38.14014	27.0448
14-nov-13	11:22:15 a.m.	62.40405	59.06055	55.59619	38.27307	27.47986
14-nov-13	11:27:27 a.m.	62.54773	59.18274	55.87817	37.63794	27.36841
14-nov-13	11:33:44 a.m.	62.54236	58.91553	55.34375	36.93835	26.75476
14-nov-13	11:39:56 a.m.	62.88208	59.4325	55.66467	38.4718	26.75745
14-nov-13	11:48:24 a.m.	57.79297	57.75671	52.87708	35.49085	25.04407
14-nov-13	11:59:43 a.m.	63.7146	60.18848	56.38843	37.69971	27.96191
14-nov-13	12:04:57 p.m.	63.85156	60.48523	56.95105	39.44263	27.96863
14-nov-13	12:09:53 p.m.	63.82471	60.14417	56.69861	38.21265	27.47046

14-nov-13	04:54:14 p.m.	70.20557	66	62.0885	42.09998	20.40747
14-nov-13	04:58:49 p.m.	70.17468	66.0282	61.97168	42.06641	20.65051
14-nov-13	05:04:12 p.m.	70.09546	65.79724	61.86023	40.48999	19.65283
14-nov-13	05:10:39 p.m.	70.09412	65.95703	61.84815	41.28491	20.40747
14-nov-13	05:15:10 p.m.	70.03101	65.67102	61.65747	40.16504	19.98853
14-nov-13	05:23:49 p.m.	69.93835	65.63074	61.73267	42.27185	20.3551
14-nov-13	05:28:20 p.m.	69.94775	65.69116	61.75281	42.86401	20.71228
14-nov-13	05:32:45 p.m.	69.82556	65.36353	61.38757	39.9126	19.92407
14-nov-13	05:37:06 p.m.	69.85645	65.55151	61.27881	40.83106	20.17517
14-nov-13	05:41:36 p.m.	69.82422	65.44946	61.45471	41.32251	20.12012
14-nov-13	05:46:09 p.m.	69.76245	65.25342	61.05188	40.1731	19.93079
14-nov-13	05:51:03 p.m.	69.79199	65.55017	61.2627	41.5669	19.98181

Tabla X: Resultados medidos en el equipo experimental



Grafica X1: Comportamiento de las temperaturas a través del tiempo



Grafica X2: Comportamiento de las temperaturas a través del tiempo

Conclusión

Durante el proceso del diseño hubo ciertos problemas físicos como son la temperatura y la radiación solar debido a que no es la misma en todos los instantes del tiempo, por lo que se tomaron ciertas consideraciones y suposiciones en el diseño obteniendo la mayor eficacia y eficiencia del mismo.

La forma de intercambio de calor entre el colector y el sol fue por radiación y la forma de intercambio de calor entre el serpentín y la cámara térmica fue por convección natural aunque en los cálculos se realizó como convección forzada pero dichos cálculos arrojaron que no era necesario instalar una bomba para hacer circular el agua por todo el sistema, pero para fines de estudio se instaló en el prototipo.

Se llegó a las temperaturas óptimas del colector solar de acuerdo al cálculo y datos experimentales, con ello se pudo saber qué cantidad de calor generaba el colector solar y así aprovechar dicha fuente de energía para una cámara térmica.

Se deben tomar en cuenta la problemática que puede ocurrir en el transcurso del proyecto para una adecuada toma de resultados. Como un ejemplo se puede mencionar que durante una de las pruebas se tuvo el sobrecalentamiento de la bomba debido a las temperaturas muy altas generadas en el calentador solar. Estas temperaturas no fueron consideradas en la adquisición de los elementos. La solución fue el cambio de bomba.

A demás se obtuvieron mediciones reales en el colector como son las temperaturas tanto entrada como salida, el flujo másico, el flujo volumétrico y pérdidas de calor durante el proceso de transferencia.

Finalmente, se le dio solución a la problemática planteada ya que se cumplió la meta la cual era calentar la cámara en un rango de 30°C a 45 °C durante 24 horas. Con el dispositivo se mantuvo la cámara térmica en el rango estimado.

Anexos

Apéndice A

Tabla A-1. Insolación global media inclinación a a latitud en México en kWh/m²-Día

Fuentes: Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana (R. Almanza S., E. Cajjal R., J. Barrientos A. 1997)
Reportes de insolación de México. Southwest Technology Development Institute, NMSU, 1999

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Min	Max	Med
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	8.3	8.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4.0	4.0	7.2	5.8
Baja California Sur	La Paz	4.4	5.5	6.0	6.6	6.5	6.6	6.3	6.2	5.9	5.8	4.9	4.2	4.2	6.6	5.7
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5.0	5.6	6.6	7.3	7.0	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	3.9	7.3	5.5
Baja California	San Javier	4.2	4.8	5.3	6.2	6.5	7.1	6.4	6.3	6.4	5.1	4.7	3.7	3.7	7.1	5.5
Baja California Sur	S. José del Cabo	5.0	5.6	5.8	5.9	6.9	6.1	5.8	6.2	5.8	5.8	5.2	4.4	4.5	6.3	5.7
Campeche	Campeche	4.8	5.7	6.0	5.3	5.4	4.9	4.9	5.3	5.2	5.4	5.0	4.3	4.4	6.0	5.2
Chiapas	Arriaga	5.1	5.4	5.5	5.9	5.6	5.2	5.9	5.5	5.1	5.3	5.1	4.7	4.7	5.9	5.4
Chiapas	Juan Aldama	4.4	5.1	4.9	4.5	4.5	4.1	4.4	4.5	4.1	4.3	4.4	4.2	4.1	5.1	4.5
Chiapas	San Cristóbal	4.0	4.3	4.5	4.5	4.8	4.7	5.4	5.3	4.6	4.2	3.9	3.7	3.7	5.4	4.5
Chiapas	Tapachula	5.4	4.9	4.8	4.6	4.7	4.7	5.2	5.1	4.6	4.1	4.3	4.1	4.1	5.4	4.7
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	3.8	4.4	4.6	4.8	5.3	5.1	5.4	5.3	4.9	4.4	4.1	3.7	3.7	5.4	4.7
Chihuahua	Chihuahua	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.4	6.4	6.5	6.6	6.6	6.0	5.2	5.3	6.9	5.9
Chihuahua	Guaohochi	3.3	3.5	3.9	4.4	5.1	5.3	5.4	5.6	5.7	5.1	4.9	4.4	3.3	6.9	6.4
Chihuahua	Cd. Juárez	6.0	7.2	7.3	7.3	6.9	6.5	6.3	6.5	6.6	7.4	6.6	5.9	5.9	7.4	6.7
Coahuila	Riendas Negras	3.1	3.6	4.2	4.5	4.6	6.0	6.7	6.3	4.9	4.1	3.3	2.9	2.9	6.7	4.5
Coahuila	Satillo	3.8	4.2	4.8	5.1	5.6	5.9	5.9	5.6	5.2	4.4	3.6	3.3	3.3	5.9	4.8
Colima	Colima	4.4	5.1	5.3	5.8	6.0	5.2	4.9	5.0	4.6	4.4	4.4	3.9	3.9	6.0	4.9
D.F.	Taouabaya	5.4	6.0	6.4	5.9	5.3	5.1	4.5	4.9	4.5	4.8	5.2	4.5	4.5	6.4	5.3
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7.0	7.5	6.8	6.0	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	3.9	7.5	5.7
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6.0	6.0	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	4.4	6.6	5.6
Guerrero	Acapulco	4.8	5.3	6.1	5.9	5.6	5.1	5.3	5.4	4.9	5.2	5.0	4.7	4.7	6.1	5.3
Guerrero	Agua Blanca	5.8	5.9	6.0	5.8	5.8	5.4	5.6	5.6	5.5	5.6	5.5	5.5	5.4	6.0	5.7
Guerrero	Chilpancingo	4.1	4.5	4.9	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	4.7	4.4	4.1	3.8	3.8	5.2	4.7
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.6	6.0	5.7	5.9	5.6	5.3	4.9	4.6	4.2	4.2	6.8	5.4
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	4.1	6.2	5.9
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4.0	4.0	7.7	5.6
Jalisco	L. de Moreno	4.5	5.3	6.1	6.7	7.2	6.1	5.8	5.6	5.5	5.0	4.7	4.0	4.0	7.2	5.5
Jalisco	Puerto Vallarta	5.2	5.7	6.0	5.8	5.7	5.5	5.6	5.7	5.5	5.6	5.2	4.7	4.7	6.0	5.5
México	Chapingo	4.5	5.1	5.6	5.8	5.9	5.4	5.2	5.0	4.7	4.6	3.9	3.9	3.9	5.9	5.1
Michoacán	Morelia	4.2	4.9	5.5	5.8	5.9	5.2	5.0	5.1	4.9	4.6	4.3	3.7	3.7	5.9	4.9
Nayarit	Tepic	3.9	4.3	4.8	5.5	6.1	5.3	4.9	5.3	4.4	4.4	4.0	4.6	3.9	6.1	4.8
Nuevo León	Monterrey	3.2	3.6	4.1	4.3	4.8	6.5	6.1	5.6	5.0	3.8	3.3	3.0	3.0	6.1	4.4
Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6.0	5.4	5.9	5.6	5.0	4.9	4.8	4.4	4.4	6.0	5.3
Oaxaca	Salina Cruz	5.4	6.3	6.6	6.4	6.1	5.0	5.6	5.9	5.2	5.9	5.7	5.2	5.0	6.6	5.8
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5.0	4.7	4.4	4.4	6.4	5.5
Querétaro	Querétaro	5.0	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.3	5.4	5.0	4.4	4.4	4.4	6.9	5.9
Quintana Roo	Chetumal	3.9	4.7	5.4	5.7	5.3	4.7	4.9	5.0	4.5	4.4	4.0	3.7	3.7	5.7	4.7
Quintana Roo	Cozumel	3.9	4.6	5.3	5.7	5.2	4.8	4.9	4.9	4.6	4.4	4.0	3.8	3.8	5.7	4.7
San Luis Potosí	Río Verde	3.6	4.0	4.6	4.9	5.4	5.6	5.8	5.8	5.1	4.3	3.7	3.3	3.3	5.8	4.7
San Luis Potosí	San Luis Potosí	4.3	5.3	5.6	6.4	6.3	6.1	6.4	6.0	5.5	4.7	4.2	3.7	3.7	6.4	5.4
Sinaloa	Culiacán	3.6	4.2	4.8	5.4	6.2	6.2	5.4	5.1	5.2	4.6	4.2	3.4	3.4	6.2	4.9
Sinaloa	Los Mochis	4.9	5.4	5.8	5.9	5.8	5.5	5.3	5.5	5.5	5.8	4.9	4.3	4.3	5.5	5.4
Sinaloa	Mazatlan	3.9	4.8	5.4	5.7	5.7	5.6	4.8	4.9	4.7	5.0	4.5	3.9	3.9	5.7	4.9
Sonora	Ciudad Obregón	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.7	6.4	6.5	6.8	7.3	6.0	5.2	5.3	7.26	6.5
Sonora	Guaymas	4.5	5.7	6.5	7.2	7.3	6.8	5.9	5.8	6.3	5.9	5.1	5.6	4.5	7.3	6.0
Sonora	Hermosillo	4.0	4.6	5.4	6.6	6.3	6.6	6.9	6.6	6.7	6.0	4.7	3.9	3.9	6.6	6.0
Tamaulipas	Soto la Marina	3.4	4.2	4.9	4.9	5.1	5.3	5.4	5.4	4.9	4.6	3.7	3.2	3.2	5.4	4.6
Tamaulipas	Tampico	3.3	4.1	4.7	6.4	5.0	4.9	4.9	4.9	4.6	4.6	3.7	3.2	3.2	6.4	4.5
Tlaxcala	Tlaxcala	4.6	5.1	5.5	5.4	5.5	5.2	5.3	5.2	5.1	4.9	4.7	4.0	4.0	5.6	5.1

Tabla A1. Datos de radiación solar en la República Mexicana

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Saturation Pressure $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$		Enthalpy of Vaporization $h_{\text{fg}}, \text{kJ/kg}$	Specific Heat $c_{\text{p}}, \text{J/kg} \cdot \text{K}$		Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$		Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient $\beta, 1/\text{K}$
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255×10^{-3}	1.261×10^{-5}	1.58	1.00	0.798×10^{-3}
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232×10^{-3}	1.296×10^{-5}	1.44	1.00	0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213×10^{-3}	1.330×10^{-5}	1.33	1.01	0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197×10^{-3}	1.365×10^{-5}	1.24	1.02	0.970×10^{-3}
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183×10^{-3}	1.399×10^{-5}	1.16	1.02	1.025×10^{-3}
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170×10^{-3}	1.434×10^{-5}	1.09	1.05	1.145×10^{-3}
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160×10^{-3}	1.468×10^{-5}	1.03	1.05	1.178×10^{-3}
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150×10^{-3}	1.502×10^{-5}	0.983	1.07	1.210×10^{-3}
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142×10^{-3}	1.537×10^{-5}	0.947	1.09	1.280×10^{-3}
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134×10^{-3}	1.571×10^{-5}	0.910	1.11	1.350×10^{-3}
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122×10^{-3}	1.641×10^{-5}	0.865	1.15	1.520×10^{-3}
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111×10^{-3}	1.712×10^{-5}	0.836	1.24	1.720×10^{-3}
260	4,688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102×10^{-3}	1.788×10^{-5}	0.832	1.35	2.000×10^{-3}
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094×10^{-3}	1.870×10^{-5}	0.854	1.49	2.380×10^{-3}
300	8,581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086×10^{-3}	1.965×10^{-5}	0.902	1.69	2.950×10^{-3}
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078×10^{-3}	2.084×10^{-5}	1.00	1.97	
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070×10^{-3}	2.255×10^{-5}	1.23	2.43	
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060×10^{-3}	2.571×10^{-5}	2.06	3.73	
374.14	22,090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043×10^{-3}	4.313×10^{-5}			

Tabla A2. Propiedades del agua saturada

Apéndice B

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206

Tabla B1. Propiedades del aire a presión atmosférica

Apéndice C

Properties of insulating materials
(at a mean temperature of 24°C)

Material	Thickness, <i>L</i> mm	Density, ρ kg/m ³	Thermal Conductivity, <i>k</i> W/m · K	Specific Heat, c_p kJ/kg · K	<i>R</i> -value (for listed thickness, <i>L/k</i>), K · m ² /W
Blanket and Batt					
Mineral fiber (fibrous form processed from rock, slag, or glass)	50 to 70 mm	4.8–32	—	0.71–0.96	1.23
	75 to 90 mm	4.8–32	—	0.71–0.96	1.94
	135 to 165 mm	4.8–32	—	0.71–0.96	3.32
Board and Slab					
Cellular glass		136	0.055	1.0	—
Glass fiber (organic bonded)		64–144	0.036	0.96	—
Expanded polystyrene (molded beads)		16	0.040	1.2	—
Expanded polyurethane (<i>R</i> -11 expanded)		24	0.023	1.6	—
Expanded perlite (organic bonded)		16	0.052	1.26	—
Expanded rubber (rigid)		72	0.032	1.68	—
Mineral fiber with resin binder		240	0.042	0.71	—
Cork		120	0.039	1.80	—
Sprayed or Formed in Place					
Polyurethane foam		24–40	0.023–0.026	—	—
Glass fiber		56–72	0.038–0.039	—	—
Urethane, two-part mixture (rigid foam)		70	0.026	1.045	—
Mineral wool granules with asbestos/ inorganic binders (sprayed)		190	0.046	—	—

Tabla C1. Propiedades de materiales aislantes

Properties of building materials (*Concluded*)
(at a mean temperature of 24°C)

Material	Thickness, <i>L</i> mm	Density, ρ kg/m ³	Thermal Conductivity, <i>k</i> W/m · K	Specific Heat, c_p kJ/kg · K	<i>R</i> -value (for listed thickness, <i>L/k</i>), K · m ² /W
Roofing					
Asbestos-cement shingles		1900	—	1.00	0.037
Asphalt roll roofing		1100	—	1.51	0.026
Asphalt shingles		1100	—	1.26	0.077
Built-in roofing	10 mm	1100	—	1.46	0.058
Slate	13 mm	—	—	1.26	0.009
Wood shingles (plain and plastic/film faced)		—	—	1.30	0.166
Plastering Materials					
Cement plaster, sand aggregate	19 mm	1860	0.72	0.84	0.026
Gypsum plaster:					
Lightweight aggregate	13 mm	720	—	—	0.055
Sand aggregate	13 mm	1680	0.81	0.84	0.016
Perlite aggregate	—	720	0.22	1.34	—
Siding Material (on flat surfaces)					
Asbestos-cement shingles	—	1900	—	—	0.037
Hardboard siding	11 mm	—	—	1.17	0.12
Wood (drop) siding	25 mm	—	—	1.30	0.139
Wood (plywood) siding lapped	10 mm	—	—	1.21	0.111
Aluminum or steel siding (over sheeting):					
Hollow backed	10 mm	—	—	1.22	0.11
Insulating-board backed	10 mm	—	—	1.34	0.32
Architectural glass	—	2530	1.0	0.84	0.018
Woods					
Hardwoods (maple, oak, etc.)	—	721	0.159	1.26	—
Softwoods (fir, pine, etc.)	—	513	0.115	1.38	—

Tabla C2. Propiedades de materiales de construcción

Typical values of convection heat transfer coefficient

Type of convection	$h, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Free convection of gases	2–25
Free convection of liquids	10–1000
Forced convection of gases	25–250
Forced convection of liquids	50–20,000
Boiling and condensation	2500–100,000

Tabla C3. Valores para h

Apéndice D



Figura D1: Caja térmica y en su interior serpentín de tubos de cobre

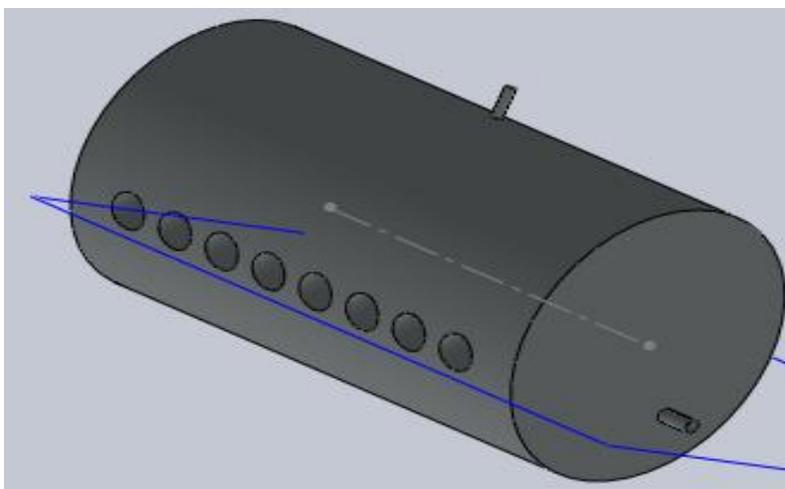


Figura D2: Contenedor de agua caliente

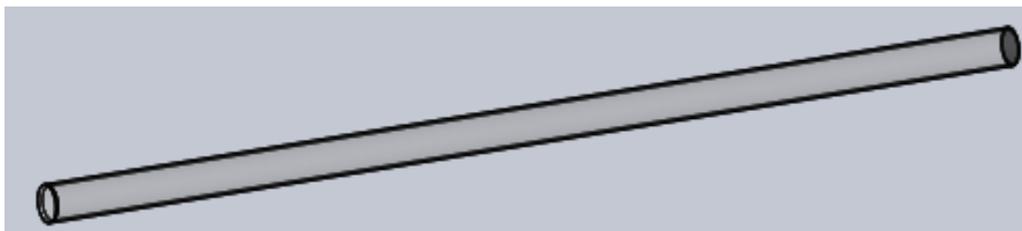


Figura D3: Tubo de vidrio con aleaciones de aluminio



Figura D4: Tubo de cobre utilizado en el serpentín de la cámara térmica

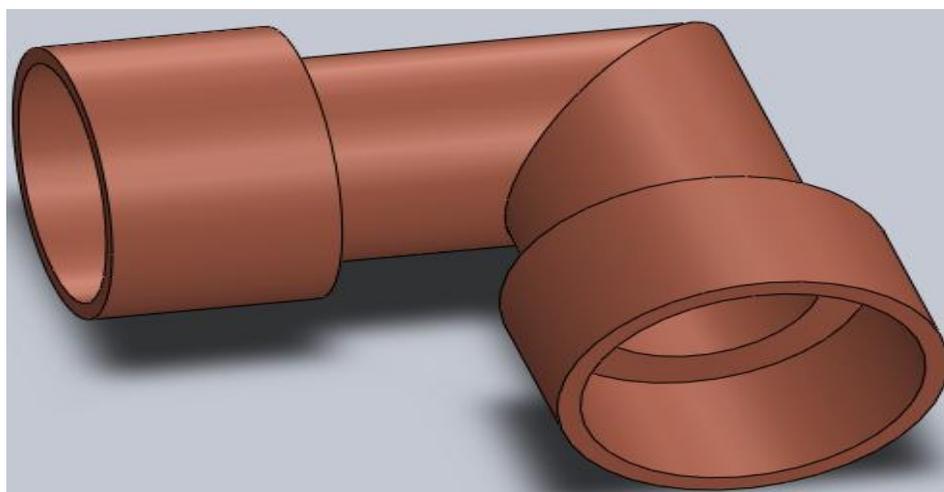


Figura D5: Codo de cobre utilizado en el serpentín de la cámara térmica



Fuentes de información

- [1] A. Cengel, Yunus (1998). Transferencia de calor. 2 da edición., Mc Graw Hill.
- [2] Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de calor. Recuperado de <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>.
- [3] Almanza, S. (1999). Insolación global en México. Recuperado de http://solar.nmsu.edu/wp_guide/Apen_A.htm.