



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**LICENCIATURA EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA

**“PROPUESTA ECOTECNOLÓGICA DE  
CALEFACCIÓN CON APROVECHAMIENTO  
TERMO-SOLAR”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

P R E S E N T A

**ALEJANDRA ORTÍZ CARRIÓN**

DIRECTOR DE TESIS: M. C. LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA  
CO-ASESOR: DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE

**MORELIA, MICHOACÁN**

**NOVIEMBRE, 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**LICENCIATURA EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA

**“PROPUESTA ECOTECNOLÓGICA DE  
CALEFACCIÓN CON APROVECHAMIENTO  
TERMO-SOLAR”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

P R E S E N T A

**ALEJANDRA ORTÍZ CARRIÓN**

DIRECTOR DE TESIS: M. C. LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA  
CO-ASESOR: DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE

**MORELIA, MICHOACÁN**

**NOVIEMBRE, 2019**



**COORDINACIÓN DE LA LICENCIATURA EN  
CIENCIAS AMBIENTALES**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CAMPUS MORELIA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**COMITÉ ACADÉMICO**

No. de Oficio: CA 07/065/2019

ASUNTO: Aprobación de Cambio de Título de Proyecto y Asignación de Simodales.

**LIC. ALEJANDRO REBOLLAR VILLAGÓMEZ**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**ENES, Unidad Morelia**  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **07 Sesión Ordinaria del Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia celebrada el día **12 de agosto del 2019**, se acordó aprobar la solicitud de cambio de título de proyecto y asignación de jurado para el examen profesional de la alumna **Alejandra Ortiz Carrión** con número de cuenta **414000018**, quien desarrolla el trabajo titulado: **"Propuesta ecotecnológica de calefacción con aprovechamiento termo-solar"** bajo la dirección como Tutor del **M. en C. Luis Bernardo López Sosa** y como Co-Tutor el **Dr. Carlos Alberto García Bustamante**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente:** M. en C. Alfredo Fernando Fuentes Gutiérrez.  
**Vocal:** M. en C. Benjamín Villalobos Castañeda.  
**Secretario:** M. en C. Luis Bernardo López Sosa.  
**Suplente 1:** Dr. Ricardo Musule Lagunes.  
**Suplente 2:** M. en C. Mario Morales Máximo.

Asimismo, informo a usted y a los honorables miembros del jurado, que el Comité Académico aprobó un plazo de hasta 30 días hábiles para recibir la revisión del manuscrito de tesis, y en su caso, el voto aprobatorio.

Sin más por el momento, me despido y aprovecho para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Morelia, Michoacán, a 13 de agosto de 2019.

**DR. JOSÉ DE JESÚS ALFONSO FUENTES JUNCO**  
**PRESIDENTE DEL COMITÉ ACADÉMICO**

C.c.p.  Alumno   
 Tutor   
 Archivo

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de su gran comunidad estudiantil y por brindarme todas las herramientas para poder prepararme profesionalmente. Estoy agradecida con la UNAM por otorgarme la Beca de Manutención durante cuatro años y la Beca de Capacitación en Métodos de Investigación, con la cual pude hacer una estancia académica en el extranjero.

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores, por esta gran experiencia como estudiante universitaria, y por la oportunidad que tuve de conocer gente increíble dentro de ésta. Mi experiencia universitaria no fue fácil, sin embargo me brindó un gran crecimiento profesional y espiritual.

A todo el personal de estas instituciones, pues siempre me brindaron su apoyo al necesitarlo.

Al grupo de ecotecnologías por brindarme un espacio para la realización de esta Tesis.

A todos los profesores que han ayudado a mi formación, todas sus enseñanzas son invaluableles.

A todos los miembros de mi jurado, M. en C. Alfredo Fuentes, M. en C. Benjamín Villalobos, Dr. Ricardo Musule, M. en C. Mario Morales, y por último a mi Asesor M. en C. Bernardo López y mi co-asesor Dr. Carlos García. Gracias por su apoyo en la realización de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

Dedico este trabajo a todas las personas importantes en mi vida, pues ellas son el motor y luz de mi alegría. Dedico el esfuerzo que tomó la realización de este trabajo a mis dos padres, pues ellos le han dedicado mucho más esfuerzo y amor a mi educación, toda la vida estaré agradecida con ustedes. Gracias papá por todo el amor y apoyo que me das y gracias mamá por tu infinita paciencia, consejos y amor, no sabes cuánto te amo. A mi hermano es una persona única y muy valiosa, siempre me sentiré orgullosa de él, y le dedico toda mi admiración y amor. También le debo mucho a mi hermosa abuelita, la persona más tierna y cariñosa, gracias por tanto amor. Mis abuelos Juan, Sofía y Pancho, que me enseñaron a siempre ser optimista, alegre, y que la felicidad es estar rodeada de toda la familia.

Gracias a todas las personas que me han guiado y apoyado incondicionalmente. A mi tía y madrina Maripaz, muchas gracias por tu compañía y por comprarme esta computadora, que fue la herramienta principal con la que realicé el presente trabajo. Agradezco a mis tíos y primos, con ustedes paso momentos inolvidables, sobre todo a Fer, te quiero como a otra hermana. También agradezco a Juanita Rodríguez que siempre me ha dado los mejores consejos y palabras de aliento para seguir adelante. Otra parte importante en mi vida son mis amigos: Itzel, Luis Armando, Karina, Michelle, Tabata, Fer Melchor, Valeria, Nayeli, Aníbal, los amo a todos y saben que contarán conmigo en las buenas y en las malas.

En resumen, les agradezco a todos por formar parte de mi vida, y ser un gran motivo de felicidad para mí.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	1
GLOSARIO.....	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....	4
1.1. El balance nacional de energía y el sector residencial.....	4
1.2. Las necesidades energéticas básicas y la matriz de consumo energético en el sector residencial rural y urbano. ....	4
1.2.1. El sector rural. ....	5
1.2.2. El sector urbano y mixto. ....	6
1.3. El confort térmico en el sector residencial. ....	8
1.4. Los sistemas de acondicionamiento térmico. ....	10
1.5. Los sistemas convencionales de acondicionamiento térmico en la matriz de consumo energético residencial.....	11
1.6. Los impactos asociados al consumo energético residencial. ....	13
1.7. El acondicionamiento térmico y el impacto ambiental. ....	15
1.8. Pregunta de investigación .....	16
1.9. Objetivos .....	16
1.9.1. General.....	16
1.9.2. Específicos .....	16
1.10. Hipótesis.....	17
1.11. Justificación.....	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. Los sistemas alternativos de acondicionamiento térmico.....	18
2.2. Ejemplos de sistemas termo-solares pasivos desarrollados. ....	19
2.3. Principios básicos del funcionamiento de los sistemas termo-solares. ....	22
2.3.1. Transferencia de calor en sistemas de acondicionamiento de aire. ....	22
2.3.2. Radiación solar.....	24
2.3.3. Propiedades ópticas de absorción solar.....	25
2.4. Los sistemas termo-solares como estrategia ecotecnológica. ....	28
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	30

3.1. Desarrollo metodológico.....	30
3.2. El diseño y dimensionamiento del dispositivo propuesto.....	31
3.3. Determinación de materiales a utilizar.....	32
3.4. La simulación del sistema. ....	34
3.4.1. Propiedades de los materiales estudiados.....	35
3.4.2. Fuente de Calor.....	36
3.5. La construcción física.....	37
3.6. La caracterización del sistema. ....	39
3.6.1. Análisis del desempeño térmico.....	39
3.6.2. Análisis termodinámico de eficiencia energética. ....	40
3.7. Estimación de costos del prototipo y prospectiva económica-ambiental.....	41
3.8. Análisis de espectrofotometría .....	42
3.9. Análisis de flujo de calor.....	42
3.10. Diseño de experimento.....	43
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1. Diseño final del prototipo.....	45
4.2. Comportamiento de la simulación en ENERGY 2D.....	46
4.3. Prototipo construido. ....	51
4.4. Resultados del Análisis de desempeño térmico. ....	54
4.4.1. Comportamiento térmico de los cuatro prototipos.....	54
4.4.2. Comportamiento térmico al interior de las cámaras de prueba. ....	63
4.4.3. Análisis Termográfico.....	66
4.5. Resultados del Análisis de varianza.....	68
4.6. Resultados del Análisis termodinámico de eficiencia energética. ....	68
4.7. Estimación del costo por prototipo. ....	70
4.8. Prospectiva económica-ambiental.....	70
4.9. Discusión.....	74
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	83
REFERENCIAS.....	86
ANEXOS .....	91
ANEXO 1. Datos obtenidos en la simulación de ENERGY 2D.....	91



ANEXO 2. Comportamiento térmico al interior de las cámaras de prueba.....	93
ANEXO 3. Imágenes termográficas. ....	98
ANEXO 4. Tabla de temperaturas máximas del diseño experimental con distintas concentraciones de MAT 1 (Hollín/grava). ....	102
ANEXO 5. Datos para el cálculo de la eficiencia energética. ....	102
ANEXO 6. Costo de materiales para la construcción de los prototipos.....	103
ANEXO 7. Cálculo del flujo de calor en los reservorios.....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición del consumo energético trimestral residencial por tipo de combustible, en el sector rural y urbano. Comparación de 1992 y 2008. ....	6
Figura 2. Consumo de energía residencial trimestral, dividida por sectores y tipo de combustible. ....	7
Figura 3. Consumo de energía por uso final, 2014. ....	12
Figura 4. Esquema de funcionamiento de la pared CERT, desde una vista lateral. ....	19
Figura 5. Fotografía del muro de quincha con el sistema de Mercado y Esteves incorporado, y cubierta adosada. ....	20
Figura 6. Prototipo a escala del sistema de calefacción radiante de Mercado et. al y esquema de su funcionamiento. ....	21
Figura 7. Disposición constructiva de la ventilación pasiva solar de Giraldo y Herrera y patrones de flujo de aire. ....	21
Figura 8. Diagrama de flujo de las etapas metodológicas del presente trabajo. ...	30
Figura 9. Prototipo de calefactor solar de Saxena y Srivastava (2014). ....	31
Figura 10. Dibujo de la vista lateral de cada dispositivo, elaborado en ENERGY 2D ....	35
Figura 11. Simulación de los cuatro prototipos en funcionamiento, con el sol como fuente de calor. ....	36
Figura 12. Diseño en SolidWorks del dispositivo finalizado ....	45
Figura 13. Inicio de la simulación. ....	46
Figura 14. Simulación al transcurrir una hora. ....	47
Figura 15. Simulación al transcurrir dos horas. ....	47
Figura 16. Simulación al transcurrir tres horas. ....	48
Figura 17. Simulación al transcurrir cuatro horas. ....	48
Figura 18. Simulación al transcurrir cinco horas. ....	49
Figura 19. Simulación al transcurrir seis horas. ....	49
Figura 20. Gráfica de los resultados de la simulación en ENERGY 2D. ....	50
Figura 21. Prototipo construido. ....	51
Figura 22. Sistema de prueba para el análisis de desempeño térmico. ....	53
Figura 23. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (13/03). ....	55

Figura 24. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (14/03). .....	56
Figura 25. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (15/03). .....	57
Figura 26. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (16/03). .....	58
Figura 27. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (17/03). .....	59
Figura 28. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (18/03). .....	59
Figura 29. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (19/03). .....	60
Figura 30. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (20/03). .....	61
Figura 31. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (21/03). .....	62
Figura 32. Comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras (13/03). ....	63
Figura 33. Comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras (15/03). ....	64
Figura 34. Comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras (19/03). ....	65
Figura 35. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 7:00 horas. ....	66
Figura 36. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 13:00 horas. ....	66
Figura 37. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 16:00 horas. ....	67
Figura 38. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 19:00 horas. ....	67
Figura 39. Calefactor eléctrico de convección forzada, tipo 'torre', marca Lasko..	71
Figura 40. Análisis de reflectividad para cada composición en los reservorios. ....	77
Figura 41. Descripción de la doble absorción de la grava. ....	79
Figura 42. Análisis del flujo total de calor para cada composición en los reservorios. .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Respuesta subjetiva promedio para cada rango de velocidad de aire, en condiciones normales.....	10
Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados en la construcción de los prototipos.....	33
Tabla 3. Datos utilizados en la simulación .....	36
Tabla 4. Datos típicos de un experimento de un solo factor.....	43
Tabla 5. Análisis de varianza para modelos con un solo factor y efectos fijos .....	44
Tabla 6. Composición de los cuatro prototipos, ya construidos.....	52
Tabla 7. Resultados de análisis de varianza .....	68
Tabla 8. Datos utilizados para el cálculo de la eficiencia .....	69
Tabla 9. Eficiencia energética de los cuatro dispositivos. ....	69
Tabla 10. Costo final de los cuatro prototipos construidos. ....	70
Tabla 11. Costo anual de electricidad por el uso del calefactor eléctrico Lasko (2019).....	72
Tabla 12. Absortividad solar .....	78

## **RESUMEN**

El presente trabajo de tesis muestra la construcción de un dispositivo para generar calentamiento de aire mediante el uso de energía termo-solar. A diferencia de los sistemas de calentamiento de aire convencionales, el dispositivo que se desarrolló funciona utilizando una fuente de energía alternativa; producto del aprovechamiento de la energía solar para operar sistemas termo-solares, los cuales permiten un incremento de temperatura idóneo para calefacción de espacios. El dispositivo pasivo propuesto tiene como función generar gradientes de temperatura mayores a los gradientes de temperatura presentes en el ambiente.

La metodología para el desarrollo del presente trabajo contempló: (a) el diseño y dimensionamiento del sistema (b) construcción y caracterización experimental y (c) la evaluación de la pertinencia ecotecnológica del dispositivo. Para ello se realizó un análisis térmico con el fin de conocer la capacidad de calentamiento, funcionalidad y eficiencia energética del dispositivo. En términos de ahorro de energía, se evaluó de forma simultánea el costo y mitigación de impactos ambientales. También se llevó a cabo un análisis de espectrofotometría con el fin de conocer las propiedades ópticas de los materiales utilizados y su relación con la capacidad de calentamiento. Por último, se calculó el flujo total de calor que el reservorio térmico de los cuatro prototipos transfiere.

## **ABSTRACT**

The present thesis work shows the construction of a device to generate air heating using solar-thermal energy. Unlike conventional air heating systems, the device developed works using an alternative energy source; result of the use of solar energy to operate thermo-solar systems, which allows an increase in temperature, suitable for space heating. The purpose of this device is to generate temperature gradients above ambient temperature gradients.

The development of the present work contemplated: (a) the design and dimensioning of the system (b) experimental construction and characterization and (c) evaluation of the eco-technological relevance of the device. For this study, a thermal analysis was carried out in order to determine the heating capacity and energy efficiency of the device. In terms of energy savings, the costs and mitigation of environmental impacts were evaluated simultaneously. A spectrophotometry analysis was also carried out in order to know the optical properties of the materials used and the relationship between these properties and their heating capacity. Finally, the total heat flux transferred by the thermal storage of the four prototypes was calculated.

## GLOSARIO

### **Carbono negro (CN)**

Se trata de un gas originado por la combustión incompleta de combustibles fósiles y quema de leña. Posee un tiempo menor de residencia en la atmósfera que el CO<sub>2</sub> pero un mayor potencial de calentamiento (SEMARNAT, 2017).

### **Combustibles fósiles**

Se denomina así a aquellos combustibles procedentes de depósitos de carbono fósil, como el petróleo, el gas o carbón (IPCC, 2013).

### **Compuestos orgánicos volátiles (COV)**

Se trata de contaminantes atmosféricos químicos orgánicos, los cuales son volátiles en condiciones ambientales (IPCC, 2013).

### **Espectrofotometría**

Método de análisis óptico que estudia los fenómenos de interacción de la luz con la materia. Se encarga de medir la cantidad de energía radiante emitida, reflejada, transmitida o absorbida por las moléculas de una muestra (Arenas y López, 2004).

### **Factor de emisión**

Es un valor representativo útil para estandarizar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera. Es expresado como la masa del contaminante (en el caso del presente trabajo: CO<sub>2</sub> equivalente), dividido por una unidad de peso, volumen o duración (EPA y Universidad de Cartagena, 2015).

### **Fenómeno fototérmico**

Se basa en el incremento de la energía de los átomos, moléculas y electrones al absorber radiación, con lo que se produce un aumento de temperaturas. Dicho fenómeno da lugar a los sistemas termo-solares (Duffie et al., 2013, p.161).

### **Gas de efecto invernadero (GEI)**

Es un componente gaseoso de la atmósfera, de origen natural y antropogénico que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda. Una alta concentración de GEI en la atmósfera contribuye al aumento de temperatura en la superficie terrestre (IPCC, 2013).

### **Joule (J)**

Unidad del sistema internacional utilizada para medir *trabajo*, el cual se define como la *fuerza* (Newton) multiplicada por la *distancia* (metro) (Çengel, 2012, p.5-7).

**MAT**

Material de Almacenamiento Térmico.

**Material particulado (MP)**

Conjunto de partículas sólidas o líquidas (excepto el agua) de origen tanto natural como antropogénico, presentes en suspensión en la atmósfera. Dichas partículas ocasionan impactos negativos a la salud humana, pues se asocian al incremento del riesgo de padecer enfermedades cardiopulmonares (Suárez, 2012).

**Material de cambio de fase**

Materiales que requieren de gran energía térmica para cambiar de fase, lo que los hace convenientes tanto para calefacción como enfriamiento de espacios. Ejemplos de estos son las parafinas, ácidos grasos, sales, etc. (Ruano San José, 2011, p.27).

**Mega (M)**

Prefijo utilizado para expresar múltiplos en el Sistema Internacional de Unidades. Es equivalente a  $10^6$  unidades (Çengel, 2012, p. 5-7).

**Micro ( $\mu$ )**

Prefijo utilizado para expresar múltiplos en el Sistema Internacional de Unidades. Es equivalente a  $10^{-6}$  unidades (Çengel, 2012, p. 5-7).

**Muro trombe**

Consiste en un muro orientado en la posición de mayor incidencia solar, con el fin de absorber y acumular el calor recibido para posteriormente liberarlo dentro de la habitación, consistiendo así en un sistema sencillo de calefacción (Franco, 2011).

**Peta (P)**

Prefijo utilizado para expresar múltiplos en el Sistema Internacional de Unidades. Es equivalente a  $10^{15}$  unidades (Çengel, 2012, p. 5-7).

**Quincha**

Es una técnica constructiva tradicional que toma como base una estructura de madera, donde se colocan delgados bastones de caña y bambú de forma horizontal y, posteriormente dicha estructura es rellena con barro (Rodríguez, 2003).

**Termografía**

Método de medición del calor emitido por la superficie de un cuerpo en forma de radiaciones infrarrojas, sin mantener contacto con dicho cuerpo. Los registros termográficos se llevan a cabo mediante cámaras termográficas (RAE ASALE, 2018).

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

### **1.1. El balance nacional de energía y el sector residencial.**

El Balance Nacional de Energía es un documento anual cuyo objetivo consiste en brindar información acerca del desempeño energético del país, y de esta forma, servir como instrumento de planeación para el desarrollo del sector energético. El objetivo del Balance Nacional de Energía es mostrar cifras sobre la oferta y demanda energética anual y, a su vez, y brindar cifras correspondientes a las fuentes de energía nacional (SENER, 2018, p. 11).

En este documento se calcula el consumo de recursos energéticos de los seis principales sectores en el país; sector transporte, sector agropecuario, sector industrial, sector comercial, sector público y sector residencial. En este último se toma en cuenta el consumo de combustibles en hogares tanto urbanos como rurales, los principales usos de energía en este sector son la cocción de alimentos, calentamiento de agua, calefacción, iluminación, enfriamiento de aire y refrigeración (SENER, 2018, p. 121).

Como informa el Balance Nacional de Energía de 2017<sup>1</sup>, el sector residencial consumió en dicho año un total de 751.61 Peta Joules (PJ), donde el combustible más consumido fue la leña con 250.31 PJ, seguido del gas licuado, de la cual se consumieron 246.45 PJ, en tercer lugar se tiene a la energía eléctrica con 212.95 PJ. El cuarto lugar lo ocupa el gas seco con 35.48 PJ consumidos, y por último la energía solar con 6.42 PJ consumidos (SENER, 2018, p.36). Con ello, el consumo residencial representó un 14% del consumo final energético en México en 2017 (*Íbid*). Esto lo convierte en el tercer sector con mayor consumo, después de los sectores transporte e industrial.

### **1.2. Las necesidades energéticas básicas y la matriz de consumo energético en el sector residencial rural y urbano.**

El consumo de energía ha aumentado fuertemente en los últimos años. Aunado a esto, existe la tendencia a la alza del consumo energético per cápita en los últimos cincuenta años (Chefurka, 2007 y SENER, 2011, p.97)<sup>2</sup>. El aumento en

---

<sup>1</sup> El presente trabajo tomó información del Balance Nacional de Energía del año 2017, puesto que se trata del documento más reciente al cual se tuvo acceso.

<sup>2</sup> Chefurka muestra la tendencia mundial de 1966 a 2006. SENER, por su parte muestra la tendencia de 2002 a 2008 en México.



el acceso a fuentes de energía como la electricidad describen otra tendencia de incremento en el consumo energético; entre 1990 y 2014, el porcentaje de viviendas con acceso a electricidad en México se elevó de 94% a 99.2% (Banco Mundial, 2017).

La perspectiva del uso de energía en el sector residencial plantea la mejora de la calidad de vida y el *confort* del individuo en su vivienda. Las necesidades básicas en el sector residencial consisten en: cocción de alimentos, iluminación, calentamiento de agua, refrigeración, entretenimiento, calefacción y enfriamiento del hogar. El nivel de consumo energético para la satisfacción de estas necesidades es determinado por diversos factores, de los cuales se destacan los económicos, estructurales y poblacionales (O'Neill y Chen, 2002 y Pachauri, 2004, citados por Sánchez, 2012, p.2; y Sheinbaum, 1994). Estos tres factores definen las prácticas y estilos de vida que pueden elevar o disminuir el consumo energético residencial.

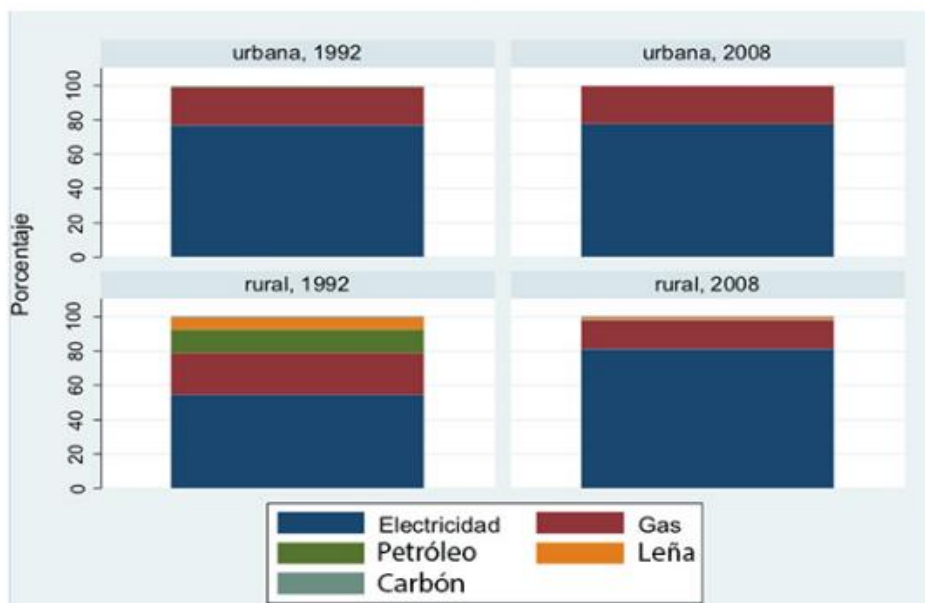
El factor económico tiene una gran relevancia en el consumo energético, debido a que los estratos más altos generalmente tienen un mayor equipamiento eléctrico y más electrodomésticos, lo que aumenta el consumo (Escoto et al., 2016, p.33 y de Buen et al., 2016, p.1). De igual forma, un importante factor poblacional es el contexto de la vivienda, ya sea este *rural o urbano*. La composición del tipo de combustible usado, el acceso a la energía y el número de electrodomésticos varía notablemente entre hogares rurales y urbanos, por ende, hay una gran diferencia en las características del consumo de ambos (Sánchez, 2012, p.2).

### **1.2.1. El sector rural.**

Según el INEGI, una población se considera rural cuando tiene menos de 2,500 habitantes. Gran parte de las zonas rurales son destinadas a actividades primarias (agricultura y ganadería, principalmente). Las principales características en estas zonas son: menor acceso a servicios, baja densidad poblacional y asentamientos dispersos (INEGI, 2010).

La población rural en México ha disminuido de 1992 a 2012 del 23.5% al 21.9%. Se estima que esta tendencia continuará debido a la migración del campo a la ciudad (INEGI, 2012, citado por Escoto et al., 2016, p.36). A su vez, existe una tendencia de disminución en cuanto al consumo energético per cápita en la vivienda. Esto puede deberse a la transición energética del reemplazamiento de combustibles de biomasa a combustibles modernos, por ejemplo, la sustitución de la leña al gas LP para necesidades de cocción, calentamiento de agua y calentamiento de espacios, pues, este último es el combustible de mayor uso en el sector rural y mixto. (Sánchez, 2012, p.4; Franco y Velázquez, 2017). A medida que se da esta transición de combustibles tradicionales a modernos, la composición del consumo en el sector

rural se asemeja cada vez más a la urbana, como se puede observar en el siguiente conjunto de gráficas (Fig. 1).



**Figura 1. Composición del consumo energético trimestral residencial por tipo de combustible, en el sector rural y urbano. Comparación de 1992 y 2008 (Sánchez, 2012, p.5, con información de INEGI 2008).**

### 1.2.2. El sector urbano y mixto.

Un asentamiento se considera urbano cuando posee más de 15,000 habitantes. Las zonas urbanas poseen mayor densidad poblacional que las rurales, así mismo, poseen un mayor acceso a servicios, infraestructura, equipamiento doméstico y una tasa de crecimiento poblacional superior al sector rural. Es necesario incluir otro tipo de asentamientos: los mixtos, que poseen entre 2,500 y 15,000 habitantes, por ende, se trata de una zona de transición entre los asentamientos rurales y urbanos, por lo tanto, posee características de ambos sectores (INEGI, 2010; Franco y Velázquez, 2017).

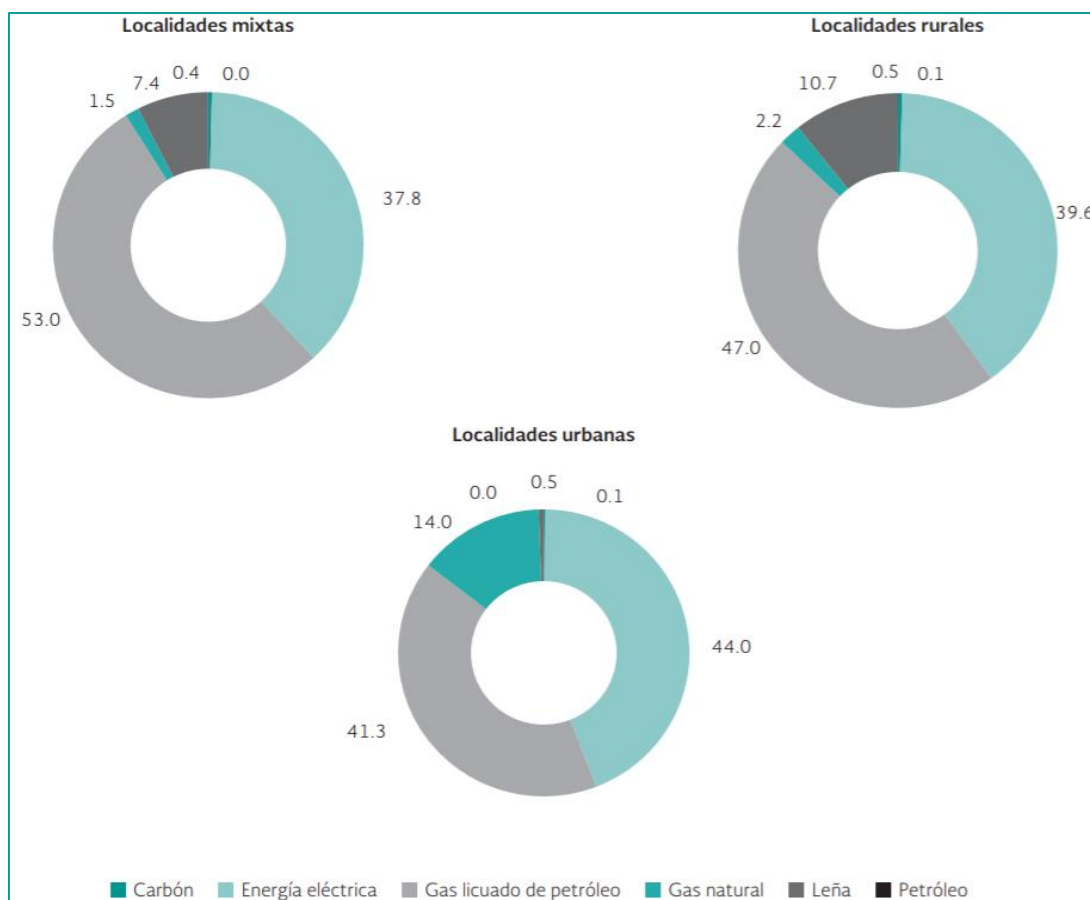
En 2014, el INEGI, por medio de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH), estimó un total de 31.7 millones de hogares, donde el 78% de éstos se ubicaban en localidades de 2,500 y más habitantes; es decir localidades urbanas y mixtas. Con ello, sólo el 22% de los hogares pertenecen al sector rural (citado por Franco y Velázquez, 2017).

Como se mencionó anteriormente, los hogares urbanos se caracterizan por poseer un mayor acceso a fuentes de energía, siendo la electricidad el tipo de combustible preferido en este sector (Franco y Velázquez, 2017). De igual forma, los hogares rurales están asociados a un menor nivel económico en comparación

con los hogares urbanos, pues la distribución de ingresos es notoriamente mayor en el sector urbano que en el rural (Maserá et al., 1993, p.3).

El nivel de ingresos económicos es también un factor fundamental en los patrones de consumo, por ende, el consumo energético del sector urbano es superior al del sector rural. La afirmación anterior concuerda con estimaciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) (citado por Franco y Velázquez, 2017, p. 163), donde se muestra el consumo energético trimestral en Mega Joules (MJ) de los hogares pertenecientes a los tres sectores, en el año 2014. Según estos datos, los hogares pertenecientes a las localidades urbanas son los que poseen un mayor gasto energético, pues consumen 4,860.7 MJ trimestralmente, seguidos de los hogares en localidades mixtas, con un consumo de 3,526.4 MJ, y por último, los hogares rurales, con un consumo de 2,554.6 MJ. Con ello se muestra que la brecha entre el consumo de los hogares rurales y los hogares urbanos es bastante amplia.

El consumo energético tampoco posee una composición homogénea entre los tres diferentes sectores. El siguiente conjunto de gráficas (Fig. 2) muestra la composición del consumo en los tres sectores, dividido por tipo de combustible.



**Figura 2. Consumo de energía residencial trimestral, dividida por sectores y tipo de combustible (Franco y Velázquez, 2017, p. 165).**

Como se muestra en la Figura 2, el combustible más utilizado en el sector urbano fue la electricidad y, en el sector rural y mixto fue el gas LP. También se observa que la leña posee un uso casi nulo en el sector urbano, y a su vez, el gas natural no representa un consumo importante para el sector rural ni para el mixto.

El consumo de energía es un factor necesario para el desarrollo y el bienestar de la población, tanto en el sector urbano como en el rural. La importancia en el consumo de energía a nivel residencial radica en la capacidad de satisfacción de necesidades dentro del hogar. Estas necesidades pueden clasificarse de la siguiente manera (Franco y Velázquez, 2017; Ortiz-Moreno et al., 2014):

- Conservación de alimentos.
- Cocción de alimentos.
- Calentamiento de agua.
- Abastecimiento y purificación de agua.
- Manejo de residuos.
- Entretenimiento y computación (Computadoras, televisiones, celulares, entre otros).
- Iluminación.
- Acondicionamiento térmico (Enfriamiento y calentamiento del espacio).

A continuación, se describe de forma más detallada la necesidad referente al acondicionamiento térmico de espacios; dicho acondicionamiento está estrechamente ligado al confort térmico.

### **1.3. El confort térmico en el sector residencial.**

El *confort térmico* es un término con dos connotaciones; la fisiológica y la psicológica. La primera es relativa al sistema termo regulatorio y actividad metabólica del individuo, la cual, está ligada a la búsqueda del equilibrio térmico con el ambiente; el nivel de arropamiento también es un factor importante. Por otra parte, la connotación psicológica del individuo está ligada a costumbres que varían entre cada individuo y su nivel de adaptación térmica (Nicol y Humphreys, 2002). La Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) define al confort térmico como *'aquella condición que expresa satisfacción con el ambiente térmico, la cual, es determinada por evaluaciones subjetivas'* (ASHRAE, 2017). Por ende, la percepción térmica se compone de variables de carácter fisiológico y psicológico, en conjunto con las variantes climáticas donde el individuo se desarrolla.

El modelo adaptativo que propone Auliciems (1981) plantea que el confort térmico es resultado de la respuesta fisiológica a los parámetros ambientales, tanto de interiores como de exteriores, en conjunto con experiencias y factores socio-

culturales de la gente. El rango de confort térmico no es estático; éste varía dependiendo de la fisiología del individuo y su nivel de aclimatación, por lo cual el rango de condiciones ambientales preferidas variará dependiendo de los componentes térmicos a los que se esté habituado. Diversos estudios han demostrado que los habitantes de edificios naturalmente ventilados, es decir, edificios pasivos, poseen un rango de confort térmico más amplio, en comparación con los habitantes de edificios que utilizan constantemente sistemas de acondicionamiento de aire convencionales (de Dear et al., 1997).

El confort térmico es un aspecto crucial al habitar un edificio pues, la exposición prolongada a condiciones térmicas incómodas genera, en diferente medida, pérdida de capacidades físicas y mentales en los individuos (Auliciems y Szokolay, 1997, p.50). La pérdida de la coordinación, en la habilidad para concentrarse e inclusive cambios en el estado de ánimo y actitud violenta, ejemplifican lo anterior. A su vez, el estrés térmico puede generar también daños a la salud al debilitar la capacidad de resistencia a una infección por microorganismos, e incluso provocar enfermedades más graves ligadas a fallos en los sistemas respiratorio, circulatorio, cerebrovascular, endocrino y renal (*íbid*).

Para considerar a un edificio térmicamente 'cómodo' se han utilizado diferentes métodos, en los cuales se ha destacado el modelo de escalas como las de Bedford (1936) y ASHRAE (1985). Existen siete categorías en ambas escalas, donde se le asigna determinado número a cada sensación térmica, como se muestra a continuación: demasiado caluroso (3), caluroso (2), ligeramente caluroso (1), neutral (0), ligeramente frío (-1), frío (-2), demasiado frío (-3). Se han creado, a su vez, diversos métodos para el cálculo del confort térmico a través de ecuaciones como la de Fanger (1982), donde se hace un balance de calor, dispuesto de tal modo que dé como resultado 'cero', debido a que Fanger considera que la producción de calor neta del cuerpo, debe tener un almacenamiento igual a cero. La ecuación de Fanger se representa de la siguiente manera (Ec. 1):

$$H - E - C - R = 0 \quad (1)$$

Donde:  $H$  = Calor metabólico.

$E$  = Pérdida de calor por evaporación.

$C$  = Pérdida de calor por convección.

$R$  = Pérdida de calor por radiación.

De la misma manera, Auliciems (1981) propone una fórmula (Ec. 2) muy práctica de acuerdo al modelo adaptativo, para establecer un rango de temperatura 'neutro' ( $T_n$ ), es decir, un rango de temperatura ambiental ideal en interiores para alcanzar el confort térmico. Dicha fórmula es aplicable tanto para edificios pasivos como edificios con sistemas convencionales de acondicionamiento térmico.

$$T_n = 17.6 + 0.31 * T_m \quad (2)$$

Los valores 17.6 y 0.31 son constantes calculadas a partir de largas bases de datos al poseer una correlación con el rango óptimo de  $T_n$ .

La temperatura promedio ambiental ( $T_m$ ) posee una gran influencia sobre el rango de temperatura preferida por la gente. Auliciems y Szokolay (1997, p.59) proponen calcular dos rangos de confort térmico para cada zona geográfica; uno que calcule  $T_n$  utilizando la temperatura promedio  $T_m$  del mes más caluroso y otra con el mes más frío. Para calcular un rango de temperatura neutro, al resultado de la ecuación anterior se le agrega un gradiente de temperatura; Auliciems y Szokolay (*íbid*) proponen agregar un gradiente de 5°C (2.5 °C abajo y 2.5 °C arriba de la temperatura neutra), es decir, si la temperatura neutra es de 26 °C, el rango de confort será de 23.5 °C a 28.5 °C.

Hablar de confort térmico no sólo se reduce a hablar de temperatura, hay otros factores ambientales que son clave al definir la sensación térmica. Uno de los factores más importantes es la humedad relativa, pues se ha demostrado que a mayor humedad el estrés térmico y propagación de enfermedades entre individuos incrementa. ASHRAE (2017) establece un límite máximo de 80% de humedad a bajas temperaturas. A medida que la temperatura ambiental incrementa, el porcentaje de humedad relativa recomendado será menor. Aunque ASHRAE no sugiere un límite mínimo de humedad, la falta de ella tiene un efecto deshidratante en la piel y las membranas mucosas. Otro factor clave a considerar es la velocidad del aire, pues como se muestra en la Tabla 1, este componente tiene un efecto al contacto con la piel, el cual varía dependiendo la velocidad del aire.

**Tabla 1. Respuesta subjetiva promedio para cada rango de velocidad de aire, en condiciones normales. Fuente: (Auliciems y Szokolay, 1997, p.14)**

< 0,25 m/s	Inadvertido.
0.25 - 0.5 m/s	Agradable.
0.5 - 1 m/s	Percepción leve del viento.
1 - 1.5 m/s	Muy ventoso.
> 1.5 m/s	Corrientes de aire molestas.

#### **1.4. Los sistemas de acondicionamiento térmico.**

Howell (2017) define al acondicionamiento térmico como: ‘*El proceso de tratamiento del aire, en el cual se controla simultáneamente su temperatura, humedad, limpieza (purificación) y movimiento*’, sus funciones pueden dividirse en: enfriamiento de aire, ventilación y calefacción. El propósito de los sistemas de aire

acondicionado es el de proporcionar confort térmico al individuo, y en procesos de manufactura conservar la calidad del producto terminado. Para que un dispositivo logre lo anterior, éste debe cumplir con los requisitos del espacio a acondicionar. La utilización de un equipo de aire acondicionado erróneo puede obstaculizar la obtención del confort térmico, y a su vez, generan un mayor gasto energético.

Todas las viviendas deben contar con un sistema de ventilación eficiente con el fin de aportar confort y sustituir constantemente el aire al interior, pero cuando esto falla o es insuficiente, el dispositivo más común al que se recurre en el sector residencial mexicano es el ventilador. Datos del INEGI revelan que, en 2012, casi ocho millones de viviendas mexicanas contaban con ventiladores (citado por CONUEE y SENER, 2016 p.64). Estos dispositivos generan un flujo de aire forzado al interior de la habitación; la mayoría de ventiladores para uso doméstico funcionan con electricidad.

A su vez, otro de los electrodomésticos más comunes para acondicionamiento térmico en el sector residencial mexicano es el *minisplit*, el cual es un acondicionador de aire tipo dividido, constituido por dos cuerpos (uno al interior del espacio a acondicionar y otro al exterior de éste), el cual funciona por medio de un compresor y el flujo de refrigerante. La función principal del *minisplit* es la del enfriamiento de aire, pero algunos modelos desempeñan también la función de deshumidificadores, calefacción, ventilación y purificación de aire (NOM-026, 2015).

En cuanto al calentamiento de aire, el tipo más común de dispositivos utilizados con este fin en el sector residencial mexicano consisten en calefactores eléctricos, cuyas resistencias eléctricas generan aire caliente (por convectoros o acumuladores). El segundo tipo más común de calefactores son los radiadores, los cuales constan de una caldera de gas natural, propano o aceite, conectada a una red de tuberías que transportan agua caliente proveniente de esta caldera a través de las habitaciones. El uso de los sistemas de calefacción se concentra principalmente al norte del país (Homify México, 2018 e INEGI et al., 2018).

### **1.5. Los sistemas convencionales de acondicionamiento térmico en la matriz de consumo energético residencial.**

Anteriormente se mencionó que el sector al que se pertenece (sea rural, urbano o mixto) y el ingreso económico son factores importantes que inciden en el consumo energético residencial. De la misma forma, hay otros factores socio-demográficos importantes que definen el nivel de consumo, tales como el incremento en el número de hogares e integrantes de éstos y los patrones de consumo. Estos últimos son resultado del cada vez mayor *equipamiento* destinado

al acondicionamiento térmico, el cual, como se abordó anteriormente, consiste en dispositivos como el aire acondicionado, ventilador y calefacción. La necesidad de confort de la sociedad actual deriva en mayores niveles de consumo energético (GCE, 2014). Sin embargo, existen también factores externos que conforman el consumo residencial, como el crecimiento económico, las condiciones climatológicas de la región (las cuales están sujetas a un gradual cambio climático), la urbanización y características jurídico-normativas (Franco y Velázquez, 2017).

Para conocer el consumo residencial por dispositivo doméstico y uso final, Franco y Velázquez (2017) utilizaron datos de la ENIGH 2014, donde se indagó en el consumo de combustibles y la presencia de dispositivos y, a su vez, utilizó datos de la Encuesta Nacional sobre Uso del Tiempo 2014 (ENUT) para conocer el tiempo de uso de los diferentes dispositivos. Se tomaron en cuenta tres elementos básicos: la saturación de aparatos, su potencia promedio y las horas de uso. La estimación de indicadores fue complementada con información de SENER (2011).

Como primer resultado, se encontró que los equipos de aire acondicionado y calefactores se concentraban principalmente en viviendas urbanas. Sin embargo, el dispositivo más común para acondicionamiento térmico fue el ventilador; se contabilizó un total de 24 millones de estos aparatos en el sector residencial. En cuanto a los calefactores en conjunto con los enfriadores de aire comunes como el *minisplit*, se contabilizó un total de 4.5 millones. Los ventiladores tienen una mayor presencia en los hogares de estrato económico medio-bajo, mientras que los calefactores y enfriadores de aire predominan en el estrato económico alto (Franco y Velázquez, 2017).

Como segundo resultado de este análisis se obtuvo la siguiente gráfica de pastel (Fig. 3), donde se da a conocer el porcentaje que representa el consumo derivado de cada actividad doméstica sobre el total del gasto energético.

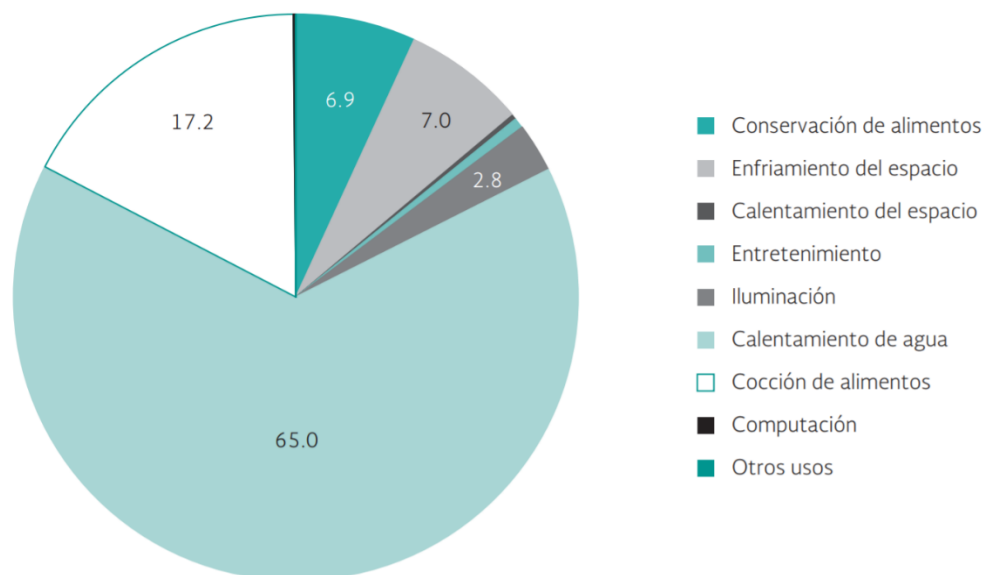


Figura 3. Consumo de energía por uso final, 2014 (Franco y Velázquez, 2017, p. 170).



El enfriamiento del espacio representó un 7% del consumo residencial a nivel nacional, ocupando el tercer lugar en cuanto a gasto energético por uso final. Los aparatos considerados en esta categoría fueron el ventilador y aire acondicionado (Franco y Velázquez, 2017). En cuanto al calentamiento del espacio, según SENER (2011, p.94) el consumo energético por este uso final representó en 2008 un porcentaje del 1.2% en el sector residencial mexicano.

No es de extrañar que el enfriamiento del espacio represente un porcentaje importante en la matriz de consumo energético residencial, pues la mayoría de los dispositivos de acondicionamiento de aire, como el *minisplit*, son considerados electrodomésticos de alto consumo. Estos aparatos consumen entre 139 y 274 kWh<sup>3</sup> al mes<sup>4</sup>, suponiendo un uso de 4 horas diarias (CIME, s.f.). Como se mencionó anteriormente, la calefacción por radiadores es uno de los tipos de calefacción más común en el sector residencial, utilizando como combustible al gas LP. La potencia más común de instalación básica en estos sistemas es de 23-25 kW (TuandCo, 2014), una cantidad considerable, pues suponiendo un uso de 4 horas diarias, el consumo energético sería aproximadamente de 2,880 kWh al mes. Por otro lado, las resistencias eléctricas consumen aproximadamente 180 kWh al mes, al suponer un uso de 4 horas diarias, pues se trata de dispositivos más pequeños y de una menor potencia de calentamiento (CIME, s.f.). Por último, un ventilador común de piso puede llegar a tener un consumo de 15 kWh al mes, suponiendo un uso de 4 horas diarias (*Ibid*).

## **1.6. Los impactos asociados al consumo energético residencial.**

Anteriormente se mencionó que el sector residencial ocupa el tercer lugar en cuanto a consumo energético en México, pues en el año 2017, éste consumió un total de 751.61 PJ. Cabe señalar que sólo un 1.16% de este consumo proviene de energías renovables, principalmente energía solar (SENER, 2018, p.36).

Los impactos negativos asociados al consumo energético residencial pueden dividirse en dos categorías: impactos directos e indirectos. Los impactos directos son aquellos que influyen en la salud del consumidor final, pues la combustión y el uso de la mayoría de combustibles conlleva a la emisión de diversos tipos de gases de efecto invernadero (GEI). Algunos GEI emitidos por el consumo de combustible a nivel residencial son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), gases fluorocarbonados (FC), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), y material particulado (MP) (Maser et al., 1993; INE-UNAM, 2010; citados por Franco y Velázquez, 2017).

---

<sup>3</sup> KiloWatts-hora.

<sup>4</sup> En el presente trabajo, un mes supone una duración de 30 días.

La leña es el combustible más usado en el sector residencial. Los impactos directos de este combustible son variados, pues su combustión produce una gran cantidad de MP, COV, NO<sub>x</sub>, CO y carbono negro (CN). Usar leña como combustible en un espacio cerrado puede ocasionar un impacto en los pulmones cien veces más grande que fumar cigarro, lo que puede ocasionar respiratorias y cáncer a largo plazo. El uso de queroseno en estufas e iluminación conlleva una peligrosa exposición a contaminantes que pueden provocar cáncer de pulmón. El uso de gas LP, en cambio, reduce significativamente los daños a la salud del consumidor, sin embargo, si hay fugas, existe el riesgo de intoxicación o explosiones. La leña, el queroseno y el gas LP pueden ocasionar incendios. El uso de electricidad posee también impactos directos, pues puede ocasionar electrocución e incendios (Maserá et al., 1993, p.9-10).

Los impactos indirectos se refieren a la contribución de la producción de energía primaria y secundaria para cada sector, a un deterioro con alcances regionales o globales, como el deterioro ambiental y el cambio climático (Maserá et al., 1993, p.10).

El consumo no sostenible de leña, es decir, que excede la capacidad de carga del sistema, puede ocasionar degradación y disminución de bosques, pérdida de biodiversidad, erosión de suelo, degradación y daño a cuerpos acuíferos (Maserá et al., 1993, p.10), así como la emisión de GEI y otros compuestos, explicados en el párrafo anterior. Los impactos directos del uso de energía eléctrica residencial radican en que la mayor parte de la electricidad en México proviene de centrales termoeléctricas, las cuales contribuyen al incremento en la salinidad del agua y el agotamiento de cuerpos acuíferos. En estas centrales se produce energía eléctrica mediante la quema de combustibles fósiles, principalmente gas seco, carbón y combustóleo (SENER, 2018, p.109). En 2015 se consumieron 2,608.89 PJ de combustibles fósiles para la generación de esta energía (*Íbid*). La quema de combustibles fósiles genera una gran emisión de partículas, GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), NO<sub>x</sub>, óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), lo cual produce lluvia ácida y contribuye de forma significativa al cambio climático (Maserá et al., 1993, p.11).

En el año 2015, de acuerdo al inventario nacional de emisiones, gases y compuestos de efecto invernadero (INEGyCEI), el sector residencial contribuyó en un 3.1%, al total de emisiones a la atmósfera (INECC, 2018). Lo anterior se traduce en una cifra de 21.28 Mega toneladas (Mton) de CO<sub>2</sub> equivalente, donde un 88.52% de esta cifra consistió en CO<sub>2</sub>, siendo éste el GEI más relevante, seguido del CH<sub>4</sub>, el cual representó un 10.17%, y por último, el N<sub>2</sub>O consistió en un 1.29% (*íbid*). El INEGyCEI considera por separado al carbono negro (CN), pues aún hay incertidumbre acerca del potencial de calentamiento real de éste; en 2015 se emitieron 0.03 Mton de CN (*íbid*). Por ende, las emisiones de GEI, producto del

consumo energético residencial, contribuyen al cambio climático y deterioro ambiental.

### **1.7. El acondicionamiento térmico y el impacto ambiental.**

El confort térmico es un aspecto necesario al habitar una construcción, por ende, la necesidad de confort de la sociedad requiere también de cierto nivel de consumo energético que, a su vez, conlleva cierto grado de deterioro ambiental. Este impacto ambiental dependerá en gran medida del método o dispositivo encargado del acondicionamiento térmico que se utilice, el consumo energético de dicho dispositivo y, si es que lo requiere, el tipo de combustible que se utilice.

La electricidad es la principal fuente energética utilizada en los dispositivos más comunes para acondicionamiento térmico en el sector residencial mexicano, pues ésta se utiliza en los sistemas de enfriamiento de aire tipo *minisplit*, en calentadores con resistencias eléctricas y en ventiladores. Sin embargo, el uso del gas LP también debe considerarse, pues es el combustible de uso más extendido en la calefacción por radiadores. El gas LP y la electricidad son diferentes en cuanto a su impacto ambiental, pues poseen un factor de emisión distinto.

Aunado a esto, anteriormente se mencionó que la mayor parte de la electricidad que alimenta a algunos de los dispositivos de acondicionamiento térmico proviene de centrales termoeléctricas, las cuales generan emisiones debido al uso de combustibles fósiles para la producción de electricidad. En el año 2018, el factor de emisión del sistema eléctrico mexicano arrojó como resultado que por cada kWh consumido se producen 0.527 kgCO<sub>2eq</sub> (CRE, 2019).

Por otra parte, los calefactores por resistencia eléctrica tienen un consumo mensual aproximado de 180 kWh. Al multiplicar esta cantidad por el factor de emisión del sistema eléctrico mexicano, se obtiene una emisión de 94.8 kgCO<sub>2eq</sub> por el uso de este dispositivo. Los equipos de acondicionamiento térmico tipo *minisplit* poseen un consumo de hasta 274 kWh al mes, por lo que se emitirían hasta 144.4 kgCO<sub>2eq</sub>. Por su parte, los ventiladores que consumen aproximadamente 15 kWh al mes, emitirían 7.9 kgCO<sub>2eq</sub>.

Por último, es necesario mencionar que no todos los impactos de los sistemas convencionales de acondicionamiento térmico tienen que ver con su consumo energético. Otro importante impacto ambiental de los sistemas de enfriamiento por compresión como el *minisplit* radica en el uso de refrigerantes con un efecto nocivo para el medio ambiente, como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Estos compuestos surgieron para sustituir a los clorofluorocarbonos (CFC), sin embargo, poseen también un efecto dañino en la capa de ozono (Duque, 2008). A pesar de que los HCFC tienen una permanencia breve en la atmósfera a

comparación de los CFC, estas sustancias también son generadoras de efecto invernadero, por ende, contribuyen al cambio climático (*íbid*).

Con el fin de contribuir a mitigar los impactos negativos de los dispositivos convencionales de acondicionamiento térmico abordados con anterioridad, el presente trabajo plantea brindar una opción alternativa de acondicionamiento térmico, desarrollando así un dispositivo de bajo impacto ambiental. Con ello, se busca que el dispositivo propuesto represente múltiples ventajas para sus usuarios y para el medio ambiente.

Las siguientes secciones del capítulo 1, corresponden a las generalidades del trabajo de investigación, es decir, la pregunta de investigación, los objetivos, la hipótesis establecida y la justificación del trabajo. El capítulo 2 consiste en el marco teórico, donde se define a los sistemas pasivos brindando ejemplos de éstos y a la vez, se describen los principios del funcionamiento de los sistemas termo-solares y su viabilidad ecotecnológica. Posteriormente, el capítulo 3 describe las fases metodológicas que se siguieron para el desarrollo, caracterización y evaluación del dispositivo propuesto. En el capítulo 4 se presenta el resultado de la simulación y el diseño por computadora del dispositivo, así como los resultados de los análisis llevados a cabo para la evaluación del prototipo y su discusión. Por último, en el capítulo 5, se enlistan las conclusiones obtenidas a raíz de la realización del trabajo.

## **1.8. Pregunta de investigación**

*¿Cuáles son las potenciales ventajas ambientales, económicas, energéticas y funcionales de una propuesta ecotecnológica de generación de calefacción solar?*

## **1.9. Objetivos**

### **1.9.1. General**

Desarrollar, caracterizar y evaluar el desempeño de un dispositivo alternativo de calentamiento de aire, con características de tecnología termo-solar, que se vislumbre como estrategia ecotecnológica para satisfacer necesidades asociadas al confort térmico del sector residencial.

### **1.9.2. Específicos**

- Diseñar y dimensionar un dispositivo termo-solar a escala, como propuesta ecotecnológica para generación de calefacción solar.
- Construir y caracterizar la propuesta ecotecnológica termo-solar.

- Realizar una estimación del costo final del dispositivo.
- Realizar una prospectiva donde se comparen las ventajas económicas y ambientales de un dispositivo termo-solar frente a un sistema de calefacción convencional.

### **1.10. Hipótesis.**

Un sistema de colección solar, vinculado a un reservorio térmico con materiales de bajo impacto ambiental, puede ser una estrategia ecotecnológica para generar calefacción.

### **1.11. Justificación.**

El sistema de calentamiento alternativo desarrollado en este trabajo pretende ser una propuesta de carácter ecotecnológico, pues el acondicionamiento térmico es una necesidad básica que se debe abordar también desde este punto de vista. La meta de dicho dispositivo es reducir el consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes convencionales y así permitir la mejora de la economía de sus habitantes y aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

A pesar de los beneficios anteriormente descritos que conlleva la adopción de tecnologías pasivas para el acondicionamiento térmico, el nivel de introducción de éstas en el mercado y su aceptación por parte del sector residencial es bajo. Una de las barreras tecnológicas de estos sistemas es el desconocimiento y la falta de divulgación sobre ellos (Díaz y Alvares-Guerra, 2016, p.2). Por lo tanto, en las siguientes secciones del presente trabajo se propone y evalúa el desempeño térmico, la mitigación del impacto ambiental y costos de un sistema pasivo de calefacción solar, con el fin de incentivar el desarrollo de este tipo de tecnologías y, a su vez, demostrar la pertinencia de su implementación en el sector residencial.

En el siguiente capítulo se brinda una introducción a los sistemas pasivos alternativos de acondicionamientos de aire, los cuales incluyen sistemas termo-solares como el que se desarrolló en el presente trabajo. A su vez, se pretende describir los principios básicos bajo los que estos sistemas operan y explicar la pertinencia ecotecnológica que éstos podrían representar.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Los sistemas alternativos de acondicionamiento térmico.

Con el objetivo de aminorar los impactos negativos de los dispositivos de acondicionamiento térmico convencionales, en los últimos años ha incrementado el desarrollo e implementación de sistemas alternativos de acondicionamiento térmico denominados como 'pasivos'. Evans y De Schiller (1994) definieron por primera vez los sistemas pasivos como *'aquellos sistemas de climatización ambiental que, en contraste con los complejos y sofisticados equipos de enfriamiento y calefacción de aire convencionales, resultan muy simples en cuanto a funcionamiento y mantenimiento. Son lo más independiente posible de equipos auxiliares como bombas, ventiladores y condensadores'*. Estos sistemas aprovechan los procesos de transferencia de calor y ventilación que se producen de forma natural, por ende, son complementarios a la construcción bioclimática, pues consideran indispensable la gestión del flujo de corrientes de aire y el control de la radiación solar (Díaz y Alvares-Guerra, 2016, p.1-2).

Un sistema pasivo de acondicionamiento térmico puede abarcar desde ventanas colocadas en forma estratégica y con orientación adecuada para el control de la radiación solar, así como deshumidificadores de aire, torres de ventilación, techos verdes, etcétera. Otros sistemas pasivos convenientes son los de arreglo 'tipo muro', como los muros trombe y la utilización de *materiales de cambio de fase*, los cuales han cobrado relevancia en los últimos años. Así mismo, resulta conveniente el uso de materiales que posean una capacidad térmica elevada, con el fin de almacenar energía calorífica y usarse como reservorios para calefacción (Saxena y Srivastava, 2014).

Otro tipo de sistemas de acondicionamiento térmico alternativos consisten en los sistemas 'termo-solares'. Dichos sistemas son básicamente aquellos que aprovechan la energía solar radiante para transformarla en calor. Se basan en la captación y acumulación de este calor para llevar a cabo diferentes tareas, como el calentamiento y evaporación de agua, secado de materia orgánica, y el acondicionamiento térmico de espacios. A su vez, los sistemas termo-solares tienen el potencial de ser utilizados en procesos industriales, pues pueden transformarse en trabajo mecánico y eléctrico, y pueden propiciar transformaciones físico-químicas (PROMÉXICO et. al., 2017, p. 26).

Es necesario recalcar que no todos los sistemas termo-solares son considerados pasivos, pues existen algunos dispositivos más complejos a los que se les agregan suministros de energía o dispositivos complementarios. Para que un sistema termo-solar sea considerado pasivo debe contar con un sistema colector-reservorio pasivos, es decir, que no requieran energía (mecánica o eléctrica) para

la operación del sistema; la energía y fluidos se mueven gracias a los gradientes de energía, producto de la absorción de radiación (Duffie et al., 2013).

Los sistemas termo-solares pueden ser de diferentes tipos: estacionarios o con seguimiento al sol, con colectores de placa plana o de concentración (parabólica o cilíndrica), entre otros arreglos. De la misma forma, estos sistemas pueden poseer o no un reservorio térmico con diferente configuración de materiales para el almacenamiento de calor en su interior (Duffie et al., 2013 y PROMÉXICO et al., 2017). La radiación solar, el colector, el almacenador de calor, los materiales utilizados y sus propiedades forman las bases para el funcionamiento de un sistema termo-solar (Duffie et al., 2013, p. 621), dichas bases se explican más a detalle en la sección 2.3.

## 2.2. Ejemplos de sistemas termo-solares pasivos desarrollados.

A continuación, se enlistan cuatro ejemplos de sistemas pasivos para acondicionamiento térmico que se han desarrollado en los últimos años. Estos sistemas utilizan energía termo-solar para elevar la temperatura de una habitación o bien disminuirla. Cabe señalar que estos dispositivos han sido desarrollados principalmente para uso residencial.

- **Pared trombe CERT:** Desarrollada en el Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT), Perú, por Rivasplata Cabanillas (2011). Consiste en un colector-acumulador de energía solar, construido con en piedra y unido con mortero de cemento. Dicha pared está pintada de negro mate y orientada hacia el norte, con un ángulo de inclinación de  $10^\circ$  para mejorar la incidencia del sol en ella, y a su vez, posee una placa de vidrio exterior, para facilitar la absorción solar. Por medio de esta pared, se obtiene una ganancia de calor con fines de calefacción ambiental.

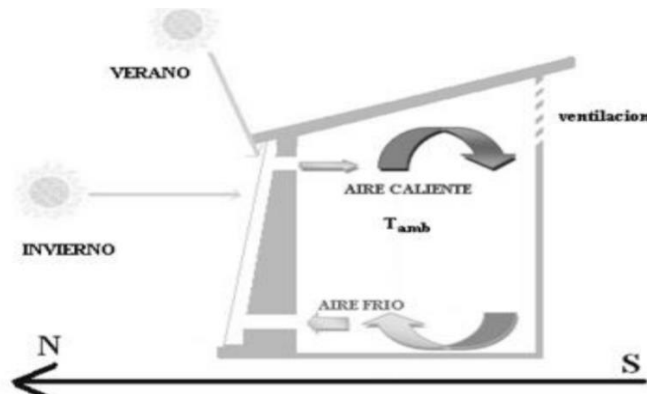


Figura 4. Esquema de funcionamiento de la pared CERT, desde una vista lateral (Rivasplata Cabanillas, 2011, p. 2).

- **Muro solar pasivo:** Desarrollado en el Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Mendoza, Argentina, por Mercado y Esteves (2006). El sistema consiste en un acumulador termo-solar colocado sobre un muro de quincha; posee en su contorno un bastidor de madera de álamo sellado con poliestireno expandido, y una cubierta de polietileno tensado sobre el bastidor para obtener una cámara de aire donde se almacena calor, elevando la temperatura interior.



Figura 5. Fotografía del muro de quincha con el sistema incorporado y cubierta adosada (Mercado y Esteves, 2006, p. 5) .

- **Sistema de calefacción radiante solar-pasivo:** Consiste en un sistema de forma piramidal alargada colocado en la parte superior de la vivienda, el cual crea un espacio cerrado de captación indirecta, donde la ganancia de calor se da por medio del intercambio radiante. Este sistema puede mitigar la emisión de hasta 700 metros cúbicos de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al año, por la sustitución de un sistema de calefacción convencional (Mercado et al., 2009).



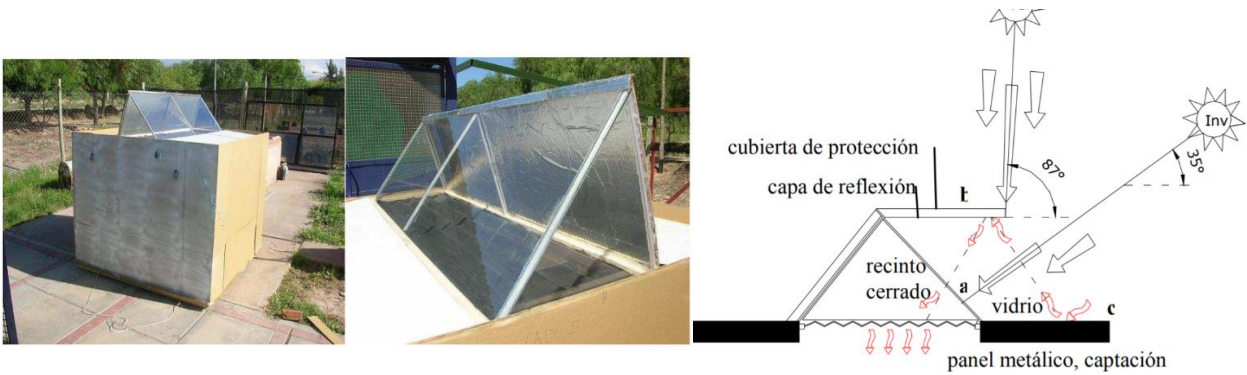


Figura 6. Prototipo a escala del sistema de calefacción radiante de Mercado et. al y esquema de su funcionamiento (Mercado et al., 2009, p. 56-57).

- **Ventilación pasiva con chimenea solar:** Desarrollada por Giraldo y Herrera (2017). El sistema consiste en colectores de radiación solar, los cuales concentran calor para incrementar la temperatura del aire atrapado en el interior, de esta forma se promueve la convección natural por diferencia térmica, logrando que este aire caliente sea eliminado de la habitación, promoviendo su flujo. De esta forma se mejora la calidad del aire y se remueve de forma significativa la carga térmica. La efectividad de las chimeneas mejora si se proyectan en la dirección del viento dominante.

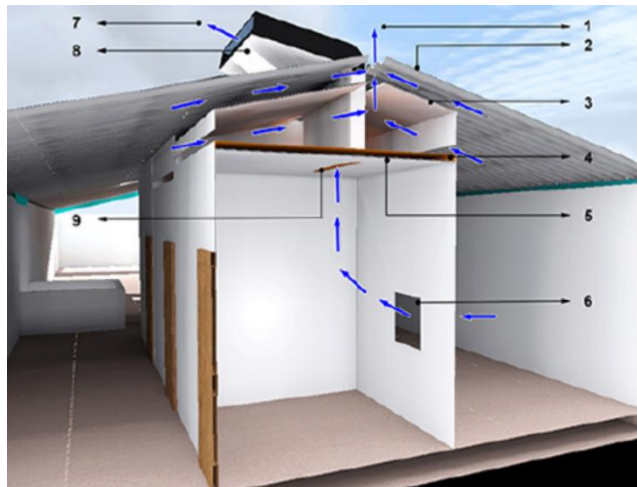


Figura 7. Disposición constructiva de la ventilación pasiva solar y patrones de flujo de aire. 1. Evacuación por cumbre (no dibujada), 2. Cubierta blanca, 3. Aluminio, 4. Lana de vidrio, 5. Panel-yeso, 6. Ventana, 7. Evacuación chimenea, 8. Chimenea solar, 9. Succión chimenea (Giraldo y Herrera, 2017).

### 2.3. Principios básicos del funcionamiento de los sistemas termo-solares.

Los sistemas solares térmicos poseen características que hacen posible su funcionalidad. Dichas características serán abordadas de forma general en las siguientes secciones (2.3.1. - 2.3.3.).

#### 2.3.1. Transferencia de calor en sistemas de acondicionamiento de aire.

En sistemas termo-solares la transferencia de calor es indispensable, pues el proceso de fotoconversión, es decir, el proceso de conversión de radiación solar a energía térmica, genera vibraciones de onda larga que definen el fenómeno fototérmico. Por la composición de espectro solar, dada su longitud de onda integrada, los materiales funcionan como absorbentes que responden con transferencia de calor hacia el interior o exterior del sistema que capta la energía solar. *'El calor es una forma de energía capaz de transmitirse de un sistema a otro, de forma sensible y latente, producto de las diferencias en la temperatura de dichos sistemas; esta transferencia siempre se producirá desde el sistema cuya temperatura es mayor hacia el sistema con temperatura menor'* (Çengel y Ghajar, 2011, p.17). Un ejemplo de lo anterior consiste en la transferencia de energía térmica proveniente del sol, hacia un dispositivo termo-solar, el cual claramente se encontrará a una temperatura menor que el sol, de esto deriva su relevancia.

La ecuación del balance de energía, cuya comprensión abarca sólo la transferencia de calor, sin interacciones de trabajo, es la siguiente:

$$Q = mC_v\Delta T \quad (3)$$

Donde se expresa el cambio en la energía interna en términos de la masa  $m$ , el calor específico  $C_p$  a volumen constante, es decir,  $C_v$  y la diferencia de temperatura  $\Delta T$ . En condiciones estacionarias, sin interacciones de trabajo, con una transferencia constante de calor  $Q$ , la razón de transferencia de calor del sistema será dada por la ecuación 4 (Çengel y Ghajar, 2011, p.12):

$$Q = mC_p\Delta T \quad (4)$$

La transferencia de calor está dada de tres formas diferentes: por conducción, convección o radiación. La transferencia de calor por conducción se da por medio del contacto entre las partículas más energéticas de una sustancia hacia las contiguas, menos energéticas. Es expresada por la ley de Fourier mediante la siguiente ecuación:

$$Q = -KA \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica,  $A$  es el área directa a la que se está transfiriendo el calor y  $dT/dx$  es el gradiente de temperaturas. Cuando la conducción se da a través de una capa plana con espesor  $L$ , esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (6)$$

Donde  $\Delta T$  será la diferencia de temperaturas entre la cara de la capa a la que se conduce el calor, y la cara sin conducción de calor (Çengel y Ghajar, 2011, p.18).

En la transferencia de calor por conducción, dos aspectos bastante importantes, intrínsecos de los materiales, son el calor específico y la conductividad térmica. El calor específico se define como '*la capacidad de un material para almacenar energía térmica*', a la vez que la conductividad representa '*la capacidad de un material para conducir calor*' (Çengel y Ghajar, 2011, p.19). Por ende, para el diseño de un sistema termo-solar eficiente, es recomendable la utilización de materiales con gran conductividad en su interior y, así facilitar la transferencia de calor por conducción, pero se recomienda la utilización de materiales de menor conducción para recubrir el exterior de estos sistemas, pues así se evitan las pérdidas de calor. Del mismo modo, se recomienda la utilización de materiales con un alto calor específico en el reservorio térmico y con ello se permita un mayor almacenamiento de calor.

La convección, por su parte, consiste en la transferencia de calor por el contacto entre un sólido y un líquido o gas adyacente en movimiento. Por ende, es una combinación entre la transferencia por conducción, más el movimiento del fluido. Existen dos tipos de convección; la forzada y la natural. La convección forzada es aquella que hace uso de ventiladores, bombas, entre otros suministros para forzar a fluir al gas o líquido. En cambio, la convección natural es inducida por la diferencia de densidad, producto del cambio de temperatura del fluido. Como se abordó anteriormente, los sistemas termo-solares pasivos optan por utilizar convección natural en lugar de convección forzada. La razón de la transferencia de calor por convección está dada por la ley de enfriamiento de Newton como:

$$Q_{convección} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (7)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección expresado en  $W/m^2.C^{\circ}$ ; éste varía de acuerdo a si el fluido consiste en un gas o un líquido, y si el tipo de convección es forzada o no. A la vez, este coeficiente cambia si el fluido está en ebullición o en condensación.  $A_s$  representa el área superficial del sólido, por la

cual se da la transferencia por convección.  $T_s$  es la temperatura de esta superficie y  $T^\infty$  es la temperatura del fluido (considerando que dicho fluido esté alejado de la superficie, pues de otro modo  $T^\infty$  será igual a  $T_s$ ) (Çengel y Ghajar, 2011, p.26).

La radiación consiste en la transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas o fotones, producto del cambio en las configuraciones electrónicas de los átomos del material radiando energía. La radiación es el tipo de transferencia de calor más veloz, pues se transmite a la velocidad de la luz, además de que no necesita un medio para ser transmitida. La razón de radiación emitida desde una superficie con cierta temperatura  $T_s$  (mayor al cero absoluto), está dada por la ley de Stefan-Boltzmann, como se muestra en la ecuación 8:

$$Q_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (8)$$

Donde la constante de Stefan-Boltzmann es  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  y  $\varepsilon$  representa la emisividad de la superficie (Çengel y Ghajar, 2011, p.28).

La transferencia de calor por radiación se debe tomar más en cuenta en el estudio de los sistemas termo-solares, pues la radiación solar es la principal fuente de calor con la que estos sistemas operan. Por ende, a continuación, se explicarán más características de la radiación solar.

### 2.3.2. Radiación solar.

Existen diversos tipos de radiación electromagnética, sin embargo, el tipo más pertinente para abordar en el estudio de sistemas termo-solares es la radiación térmica, resultado de la transición energética de las partículas, en este caso, del sol. La radiación proveniente del sol posee un rango de longitud de onda de 0.25 a 3  $\mu\text{m}$  al exterior de la atmósfera, y a nivel terrestre este rango es de 0.29 a 2.5  $\mu\text{m}$  (Duffie et al., 2013, p. 142; Çengel y Ghajar, 2011, p. 686).

La energía solar que incide sobre la atmósfera terrestre se llama Irradiancia solar total  $G_{\text{solar}}$ , denominada también constante solar y posee valores de potencia por unidad de área ( $\text{W/m}^2$ ). La irradiancia solar incidente en la tierra es de  $G_s=1373 \text{ W/m}^2$  (Çengel y Ghajar, 2011, p. 710). Por otro lado, la Irradiación solar se refiere a la potencia de radiación por tiempo y por unidad de área ( $\text{Wh/m}^2$ ). Por su ubicación geográfica, México posee altos valores de irradiación; el valor promedio diario es de 5,500  $\text{Wh/m}^2$ , logrando presentar valores de hasta 8,500  $\text{Wh/m}^2$  (PROMÉXICO, 2015, p.12). Estos valores son óptimos para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de energía solar, como los sistemas termo-solares.

Existen dos tipos de radiación solar; la directa y la difusa. La radiación directa  $G_D$  es aquella que llega a la tierra directamente, sin ser dispersada o absorbida a

nivel atmosférico. Por otro lado, la radiación difusa  $G_d$  es aquella que es dispersada y llega a la superficie terrestre desde distintas direcciones. La radiación total que incidirá sobre una unidad de área horizontal terrestre será expresada como:

$$G_{solar} = G_D \cos\theta + G_d \quad (9)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo en el que incidirá el rayo de sol directo  $G_D$ , perpendicular a la superficie. La radiación difusa  $G_d$  puede variar desde un 10% (día despejado) hasta un 100% (día densamente nublado). Cabe resaltar que, a estos dos tipos de radiación se adiciona la radiación reflejada desde la superficie de objetos circundantes, como vegetación, construcciones, rocas, entre otros. (Çengel y Ghajar, 2011, p. 710 - 714)

Por otra parte, para calcular de forma más precisa la radiación solar es necesario tomar también en cuenta la radiación atmosférica, pues las partículas suspendidas en la atmósfera, principalmente moléculas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , también emiten y absorben radiación. La emisión de radiación atmosférica hacia la superficie terrestre  $G_{cielo}$  se expresa de la siguiente manera:

$$G_{cielo} = \sigma T_{cielo}^4 \quad (10)$$

Donde  $T_{cielo}$  es la temperatura efectiva del cielo, la cual varía según las condiciones atmosféricas (variando desde 230 K o  $-43^\circ\text{C}$  en cielo frío y claro, a 285 K o  $12^\circ\text{C}$  en cielo cálido nuboso) (Çengel y Ghajar, 2011, p. 711).

Sin embargo, además de describir las características de la radiación solar y atmosférica, es necesario considerar también las propiedades de los diferentes tipos de materiales utilizados como componentes en los sistemas termo-solares, pues de estas propiedades depende el grado de aprovechamiento de la radiación solar. Por ende, en el siguiente apartado, dichas propiedades serán descritas.

### 2.3.3. Propiedades ópticas de absorción solar.

Para garantizar una mayor eficiencia en un sistema termo-solar, es necesario que se utilicen ciertos materiales en su construcción que posean propiedades convenientes a la hora de coleccionar y almacenar energía térmica proveniente del sol. La primera de estas propiedades a describir es la emisividad  $\epsilon$ , que representa la relación entre la radiación emitida por una superficie a determinada temperatura  $I_{\lambda e}$  y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura  $I_{b\lambda}$ , en función de la temperatura de la superficie  $T$ , la longitud de onda  $\lambda$  y la dirección de la radiación emitida  $\theta, \Phi$ ; expresándose así como se muestra en la ecuación 11:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b\lambda}(\lambda, T)} \quad (11)$$

Un cuerpo negro representa, de forma teórica, la superficie emisora y absorbente de radiación ideal, para la cual  $\varepsilon=1$ ; ninguna otra superficie puede emitir ni absorber mayor radiación que un cuerpo negro a la misma temperatura, por ende,  $\varepsilon \leq 1$  (Çengel y Ghajar, 2011, p. 700).

'Cuando la radiación incide sobre una superficie, parte de ella es absorbida, parte de ella es reflejada y, si existe parte restante, es transmitida' (Çengel y Ghajar, 2011, p. 704). Dicho lo anterior, la absorptividad  $\alpha$  se define como la fracción de radiación incidente a cierta longitud de onda  $\lambda$ , desde una dirección  $\mu$ ,  $\theta$  o  $\phi$ ; la cual es absorbida por una superficie. Se expresa mediante la ecuación 12 (Duffie et al., 2013, p. 174 y Çengel y Ghajar, 2011, p. 704):

$$\text{Absortividad: } \alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{abs}}{G}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (12)$$

$$\alpha_{\lambda}(\mu, \phi) = \frac{I_{\lambda,a}(\mu, \phi)}{I_{\lambda,i}(\mu, \phi)}$$

La reflectividad  $\rho$ , por su parte, se trata de la fracción de radiación térmica incidente reflejada por una superficie. Está dada en función de la longitud de onda  $\lambda$  y la distribución espacial de la radiación incidente  $\mu$ ,  $\theta$  o  $\phi$ . Es determinada mediante la siguiente ecuación (Duffie et al., 2013, p. 177 y Çengel y Ghajar, 2011, p. 705):

$$\text{Reflectividad: } \rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{ref}}{G}, 0 \leq \rho \leq 1 \quad (13)$$

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)}$$

Por último, la transividad  $\tau$  es la fracción de radiación incidente, a cierta longitud de onda  $\lambda$ , que es transmitida a través de una superficie. Sólo las superficies semitransparentes poseen esta característica; en superficies opacas  $\tau = 0$ . Se define mediante la siguiente fórmula (Çengel y Ghajar, 2011, p. 705):

$$\text{Transmisividad: } \tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{tr}}{G}, 0 \leq \tau \leq 1 \quad (14)$$

$$\tau_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

La suma de la radiación solar absorbida a cierta longitud de onda, la radiación reflejada y la transmitida será siempre igual a la unidad, tal como lo expresa la ecuación 15:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (15)$$

Como se mencionó anteriormente, en superficies opacas,  $\tau = 0$ , por ende, esta relación será dada por la siguiente ecuación (Duffie et al., 2013, p. 181):

$$\rho + \alpha = 1 \quad (16)$$

Estas propiedades cobran gran importancia en dispositivos termo-solares, pues los materiales en superficies ideadas para la captación solar deben poseer de un alto valor de absorbancia, debido a que la cantidad de radiación absorbida es determinada con dicho valor, porque:  $Q_{\text{absorbida}} = \alpha Q_{\text{incidente}}$ . A la vez, estos materiales deben poseer valores de emisividad bajos, respondiendo así a la relación  $\alpha_s / \varepsilon$ ; entre menor sea el resultado de esta relación, mayor será la recolección neta de calor (Çengel y Ghajar, 2011, p. 28).

Los metales opacos poseen un valor alto de absorbancia y bajo valor de emisividad, por lo tanto, es conveniente incorporarlos a los colectores solares. Del mismo modo, es muy conveniente la integración de una superficie con un valor alto de transmisividad en colectores solares planos, debido al efecto invernadero que estas superficies crean al interior del sistema. Por ejemplo, el cristal transmite hasta un 86% de radiación solar, refleja 8% y absorbe 6% (considerando un espesor de 3mm). El cristal permite la entrada de la radiación solar, pero no permite la salida de la radiación infrarroja, lo que ocasiona la elevación de la temperatura (Çengel y Ghajar, 2011, p. 712-718).

Con la descripción de las características y propiedades físicas de los sistemas termo-solares, es necesario agregar también las características ecotecnológicas que estos sistemas pueden poseer. A continuación, se describirán las razones por las que estos dispositivos pueden vislumbrarse como estrategia ecotecnológica.

## 2.4. Los sistemas termo-solares como estrategia ecotecnológica.

Como se abordó anteriormente, con el fin de reducir el impacto causado al medio ambiente, en los últimos años han surgido diversos desarrollos tecnológicos que permiten satisfacer necesidades utilizando fuentes de energía limpia, como los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico. De esta forma surge también el término *ecotecnologías*, refiriéndose al *'conjunto de dispositivos, métodos y procesos que propician una relación armónica con el ambiente y buscan brindar beneficios socio-económicos tangibles a sus usuarios, con referencia a un contexto ecológico específico'* (Ortiz-Moreno et al., 2014, p.16).

Las ecotecnologías no sólo hacen referencia a las tecnologías en sí mismas, sino también al conocimiento científico, métodos y procesos que la originaron, y a su vez, a su desarrollo, implementación y difusión. De acuerdo con Ortiz-Moreno et al. (2014), las ecotecnologías deberían cumplir con los siguientes criterios:

- 1- Poseer un bajo costo de producción y mantenimiento, y con ello ser accesibles, especialmente para los sectores pobres.
- 2- Estar enfocadas a las necesidades y contextos locales, promoviendo de esta forma el bienestar social.
- 3- Ser amigables con el ambiente, promoviendo el uso eficiente de recursos, el reciclado y el re-uso de los productos.
- 4- Promover el uso de recursos locales y su control.
- 5- Generar empleo en las economías regionales, especialmente en áreas rurales.
- 6- Ser producidas preferentemente a pequeña escala y de forma descentralizada.
- 7- Ser diseñadas, adaptadas y difundidas mediante un proceso participativo, con diálogo entre los saberes locales y los científicos.

El desarrollo ecotecnológico consiste en un replanteamiento de la tecnología, donde, además de proponer dispositivos, métodos o materiales novedosos, incluye la adaptación y/o mejora de tecnologías existentes. A su vez, se pretende la utilización de tecnología simple, basada principalmente en la mano de obra. Esto no quiere decir que se trate de baja tecnología, pues bajo ciertas condiciones éstas pueden ser fuertemente apropiables y generar impactos sociales y ambientales positivos, logrando convertirse en dispositivos altamente eficientes. (Ortiz-Moreno et al., 2014, p.19)

La información anterior sustenta la viabilidad ecotecnológica de los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico, pues éstos coinciden con los criterios mencionados anteriormente. Las ecotecnologías deben poseer un comportamiento sencillo y entendible, así pues, una de las características principales de los sistemas de acondicionamiento pasivos es la simplicidad en su funcionamiento. Al consistir



en dispositivos pasivos dependen sólo del aprovechamiento de recursos naturales, por lo tanto, no requieren de suministros extra que complejizarían al sistema.

Los sistemas pasivos, sobre todo en lo que respecta a la calefacción de espacios, tienen un bajo costo de funcionamiento y mantenimiento, por lo tanto, están económicamente al alcance de las familias de bajo estrato social. Así mismo, estos sistemas poseen una gran cantidad de ventajas ambientales, pues se basan en la utilización de fuentes renovables como la energía solar, la cual resulta una buena alternativa a la electricidad y el gas LP. Al evitar la utilización de fuentes de energía convencionales, existe una gran mitigación de la emisión de GEI. Otra ventaja ecológica de estos sistemas es que no requieren del uso de refrigerantes (Energía Solar, 2018; Diaz y Alvares-Guerra, 2016, p.2).

Anteriormente se citaron varios ejemplos de desarrollo de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico; en dichos proyectos se reconoce la flexibilidad de estos sistemas para ser adaptados a una gran variedad de contextos y condiciones climáticas. En consecuencia, estos sistemas pasivos pueden considerarse desarrollos ecotecnológicos, pues contribuyen a satisfacer necesidades básicas, promoviendo el bienestar y confort térmico de una forma económica y ambientalmente rentable.

Retomando los objetivos del presente trabajo, se planteó el desarrollo, caracterización y evaluación de un dispositivo de calefacción alternativo, el cual posee características generales de un dispositivo termo-solar pasivo, por ende, dicho dispositivo puede considerarse una estrategia ecotecnológica. En el siguiente capítulo se describe la metodología implementada para llevar a cabo dicha tarea, desde el diseño del dispositivo hasta su evaluación, llevada a cabo bajo distintos análisis.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Desarrollo metodológico

A fin de alcanzar los objetivos planteados y validar la hipótesis establecida en el presente trabajo, se desarrolló una metodología experimental-descriptiva, en la cual el desarrollo del sistema propuesto contempló diferentes fases, desde su diseño y construcción, hasta ser sometido a diferentes pruebas con el fin de validar su funcionalidad. El siguiente diagrama (Fig. 8) muestra el desarrollo metodológico del presente trabajo.

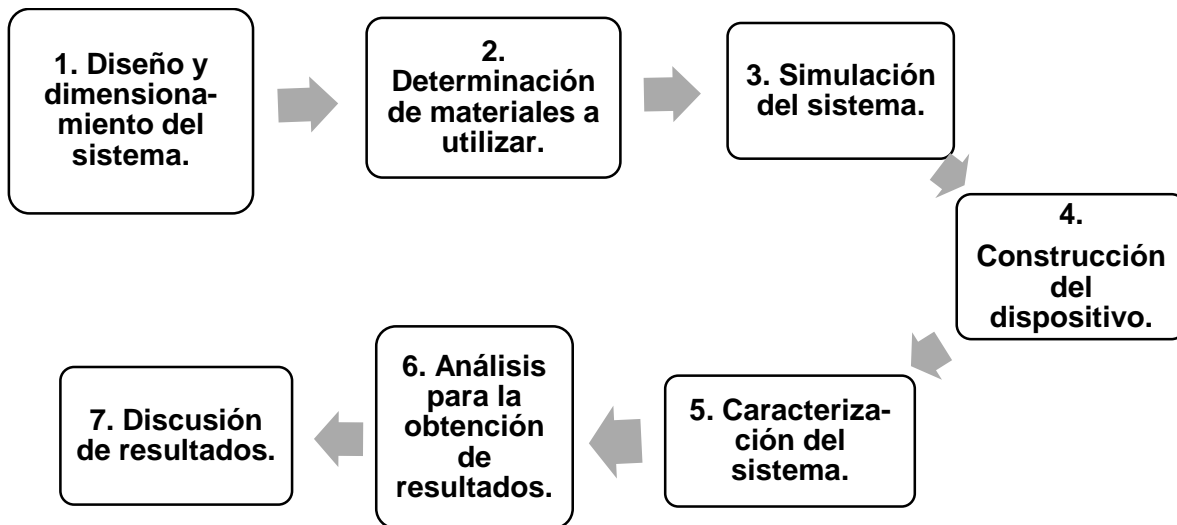


Figura 8. Diagrama de flujo de las etapas metodológicas del presente trabajo.

1. El primer paso consistió en el diseño del prototipo por computadora; para ello se realizó también un dimensionamiento con el fin de conocer el tamaño, estructura y configuración más funcional y conveniente para la construcción y caracterización del prototipo.

2. Antes de la construcción, un paso importante fue la determinación de los materiales a utilizar, pues a partir del conocimiento de las propiedades de éstos, se eligieron los más convenientes para coleccionar y almacenar energía solar-térmica.

3. Después de realizar el diseño, dimensionamiento y determinación de materiales, la siguiente etapa consistió en llevar a cabo una simulación del sistema para conocer de forma teórica la dinámica funcional del mismo.

4. La siguiente etapa correspondió a la construcción física del dispositivo, pues a este nivel ya se conoce de forma preliminar el comportamiento del sistema diseñado bajo el uso de ciertos materiales.

5. Luego de la construcción física, un modelo de caracterización fue necesario para establecer los análisis a los que el dispositivo debería someterse con el fin de comprobar la hipótesis establecida.

6. Con el sistema construido y caracterizado se llevó a cabo la fase más importante del presente trabajo; la realización de pruebas y análisis para la obtención de resultados.

7. Se procedió a discutir los resultados obtenidos mediante dos análisis adicionales, con el fin de llegar a conclusiones que dieran respuesta a la pregunta de investigación planteada.

En las siguientes secciones del presente capítulo se muestra de forma más detallada el desarrollo, materiales y métodos de estas etapas metodológicas.

### 3.2. El diseño y dimensionamiento del dispositivo propuesto.

Para la realización del diseño del dispositivo propuesto fue necesario llevar a cabo una revisión bibliográfica, donde se recopiló información de trabajos anteriores sobre sistemas de calefacción termo-solar, con el uso de materiales asequibles y de bajo impacto ambiental, con el fin de obtener un punto de partida en cuanto al diseño. Se optó por elegir los más sencillos y funcionales. Con dicha revisión se decidió retomar el diseño de Saxena y Srivastava (2014), el cual consiste en un sistema de calefacción termo-solar, con ventilación tanto natural como forzada. Por lo tanto, el diseño propuesto consistió en un colector solar de placa plana, al cual se le incorporó un aspecto tomado del diseño de Saxena y Srivastava. (Fig. 9), que consistió en la adición de un reservorio térmico donde se introdujeran **materiales de almacenamiento térmico (MAT)**<sup>5</sup>, sin embargo no contó con los componentes no pasivos que el diseño del autor anterior agregó a su prototipo, porque la intención experimental no requiere de este grado de sofisticación.

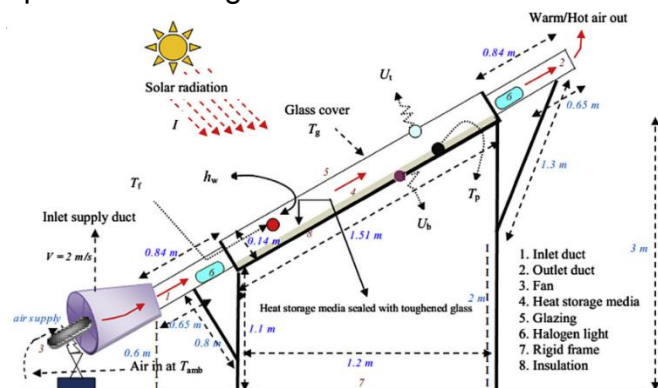


Figura 9. Prototipo de calefactor solar de Saxena y Srivastava (2014)

<sup>5</sup> En el caso del dispositivo de Saxena y Srivastava, se utilizó carbón granulado y arena de desierto como MAT.

El diseño por computadora del dispositivo se llevó a cabo con el programa SolidWorks 2017, donde se elaboró un total de seis piezas por separado, posteriormente, dichas piezas se ensamblaron dando lugar al render final, es decir, una imagen digital en 3D, creada a partir del diseño propuesto del dispositivo. Dicho render contempló sólo el diseño tipo 'contenedor' del colector solar y el reservorio térmico, excluyendo la base del mismo y la cámara donde se realizarían las pruebas térmicas.

Posteriormente se realizó el dimensionamiento del sistema para conocer el tamaño al cual se adaptarían los prototipos para su construcción. El dimensionamiento tomó en cuenta principalmente el costo que podría suponer la construcción del dispositivo, la practicidad para la realización de pruebas en él y su transportación. Por ende, se decidió construir un dispositivo a escala, con el fin de realizar análisis para intentar probar teóricamente cómo podría éste comportarse a tamaño real. Se partió por la creación de un prototipo en forma de contenedor rectangular de dimensiones pequeñas, cuyas medidas serían: Largo: 23 cm, Alto: 10 cm y Ancho: 13 cm. De esta forma, sería sencillo que el prototipo fuese adaptado como colector-reservorio y, a la vez, resultara fácilmente instalado en diferentes espacios y contextos. Las Figuras correspondientes a las imágenes del render final se encuentran en la sección 4.1., correspondiente a los resultados del presente trabajo.

### **3.3. Determinación de materiales a utilizar.**

Los materiales que se emplearon en la construcción del prototipo fueron seleccionados de acuerdo a sus propiedades ventajosas al usarse dentro de dispositivos termo-solares, las cuales fueron previamente explicadas en el Capítulo 2. Así mismo, otro de los criterios importantes para la elección de materiales fue que éstos fueran de bajo costo y resultaran de fácil obtención.

Para la determinación de materiales utilizados en el reservorio, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre sistemas termo-solares que contaran con un reservorio térmico, con el fin de conocer qué materiales serían convenientes para almacenar energía térmica y utilizarse en el dispositivo. Con base en el diseño de calentador solar de aire a doble paso que desarrolló El-Sebaili et al. (2007-A) se decidió utilizar grava y piedra caliza como principales materiales dentro del reservorio térmico, pues ambos poseen un precio bajo en el mercado y son fáciles de conseguir. Así mismo, se decidió utilizar también hollín dentro del reservorio, esto debido a su funcionalidad para la absorción de energía solar en tecnologías solares térmicas (López-Sosa et. al, 2018). El hollín fue introducido en una menor proporción debido a que, a pesar de que consiste en un material de desecho de

estufas eficientes (por lo tanto, posee un precio bajo), no es tan sencilla su obtención en grandes cantidades. En el caso del colector térmico de placa plana, se empleó acero inoxidable y cristal. Por último, se decidió emplear madera para la estructura exterior del prototipo.

A continuación, en la Tabla 2, se muestran las propiedades de los principales materiales seleccionados para la construcción; dichas propiedades consisten en conductividad  $k$ , calor específico  $C$ , y densidad  $\rho$ , así como las propiedades ópticas de absorptividad y transmisividad.

**Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados en la construcción de los prototipos (ATPP, 2008; Çengel y Ghajar, 2011; Chapman, 1984; Lira Cortés et. al, 2010; El-Sebaai et. al, 2007-B; Serway y Jewett, 2004; Estudios propios).**

MATERIAL	Conducti- vidad (W/m K)	Calor Específico (J/Kg K)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorti- vidad	Transmi- sividad
<b>MADERA (Cartón comprimido)</b>	0.1	1000	900	0.6	0
<b>ACERO INOXIDABLE (Opaco)<sup>6</sup></b>	50	450	7850	0.5	0
<b>CRISTAL</b>	1	840	2500	0.06	0.86
<b>PIEDRA CALIZA</b>	1.33	900	2500	0.48	0
<b>GRAVA</b>	0.72	798	2625	0.90	0
<b>HOLLÍN</b>	0.096	600	1330	0.96	0

Primeramente, la madera de cartón comprimido resulta ventajosa al incorporarse al exterior del sistema como contenedor, pues al poseer una baja conductividad la transferencia de calor hacia el exterior se vería disminuida. A su vez, en el capítulo 2 se explicó que la absorptividad de los materiales a utilizar en sistemas termo-solares debe ser alta, pues de esta forma se logra absorber una mayor radiación solar, por ende, la alta absorptividad de la madera permite una ganancia extra de calor. Además, es un material de bajo impacto ambiental, puede ser obtenido como recurso forestal o bien como desechos de estos recursos.

Por otra parte, el acero inoxidable posee una alta conductividad, conviene entonces, incorporar este material al colector, pues así se puede lograr transferir una mayor cantidad de calor al interior del prototipo. Al recubrir el acero con pintura negra se obtiene una mayor absorción de radiación solar, pues dicha pintura posee un valor de absorptancia del 97%. A su vez, el cristal posee un alto valor de transmisividad (86%); como se explicó anteriormente, dicha propiedad genera un efecto invernadero al interior del prototipo pues dificulta la emisión de energía

<sup>6</sup> Fue recubierto con pintura negra, cuya absorptividad es de **0.97**.

infrarroja al exterior. Por lo tanto, el acero inoxidable recubierto con pintura negra y el cristal fueron utilizados para la construcción del colector del prototipo.

En cuanto a los tres materiales utilizados en el reservorio térmico, se observa que éstos poseen un alto valor de calor específico y densidad, dichas propiedades definen la capacidad de almacenamiento de energía calorífica de un material. A su vez, poseen una baja conductividad que disminuye la pérdida de calor. Por último, sus valores de absorptividad son, en general altos, por lo tanto, los tres materiales son idóneos para el almacenamiento de calor, por lo tanto, en el presente trabajo se referirá a ellos como MAT, es decir, materiales de almacenamiento térmico.

### 3.4. La simulación del sistema.

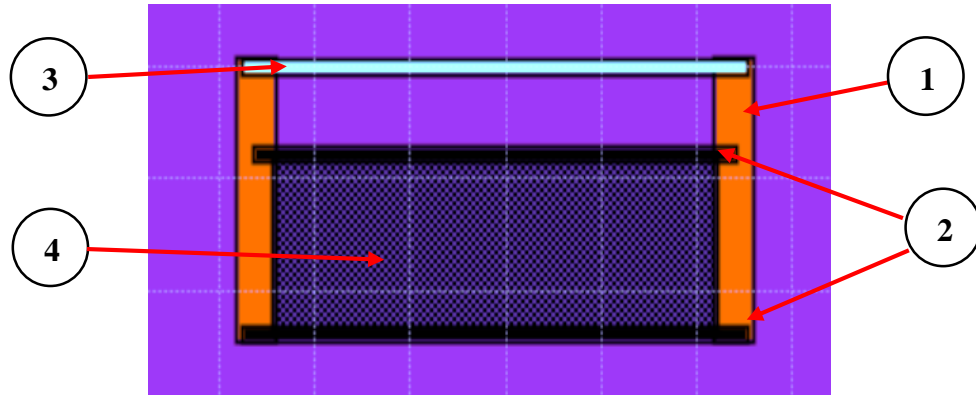
Antes de evaluar el comportamiento real del sistema, la simulación por computadora resulta una herramienta para conocer superficialmente cómo es el funcionamiento del dispositivo. El objetivo de la simulación, en el caso del presente trabajo, consistió en conocer de forma teórica la dinámica de ganancia de calor al interior del sistema a través del tiempo.

La simulación del sistema propuesto fue elaborada con el programa ENERGY 2D, el cual es un software interactivo diseñado con el objetivo de simular la transferencia de calor por sus tres modalidades (conducción, convección y radiación), y a su vez muestra las dinámicas de éste. El programa está basado en la ecuación de la transferencia del calor (Ec. 17):

$$\rho c \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (vT) \right] = \nabla \cdot [k\nabla T] + q \quad (17)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica,  $c$  es el calor específico,  $\rho$  es la densidad,  $v$  es la velocidad de flujo de aire y  $q$  es la generación interna del calor (Xie, 2010).

El software ENERGY 2D puede crear una simulación a partir de un objeto en segunda dimensión, por lo tanto, de forma inicial se elaboró un dibujo de la vista lateral del prototipo propuestos, tal como se muestra en la Figura 10. A su vez, en esta figura se indica mediante números cada material del cual se compone el dispositivo propuesto.



**Figura 10. Dibujo de la vista lateral de cada dispositivo, elaborado en ENERGY 2D. Materiales: (1) Madera, (2) Acero Inoxidable, (3) Cristal, (4) Material Almacenador de Energía Térmica (MAT).**

En la sección 3.5, donde se presenta a detalle la metodología de construcción física, se explica la construcción de cuatro prototipos (T1, T2, T3 y T4), cada uno con una composición diferente de Material de Almacenamiento Térmico en su reservorio, es decir, combinando grava, piedra caliza y hollín en diferentes proporciones. Se construyeron cuatro prototipos con el fin de determinar qué composición de MAT resulta más viable en términos de capacidad de calentamiento. Por ende, al replicar dicho experimento en la simulación de ENERGY 2D, se procedió a dibujar cuatro dispositivos iguales al mostrado en la Figura 10, respetando a su vez, las dimensiones del render final del prototipo diseñado en SolidWorks. Sin embargo, a cada MAT de estos dispositivos se le introdujo dentro del programa valores diferentes en cuanto a sus propiedades térmicas y ópticas, como se explicará en la siguiente sección (3.4.1.).

### **3.4.1. Propiedades de los materiales estudiados.**

Los datos<sup>7</sup> tomados en cuenta para la simulación del sistema consisten en los valores de conductividad, calor específico, densidad y absorptividad de cada material utilizado, los cuales, pueden consultarse en la Tabla 2 y Tabla 3. En la Tabla 3 se calcularon los valores para cada MAT de los prototipos, basándose en los valores mostrados en la Tabla 2. El cálculo de estos valores partió de las concentraciones de cada material utilizado como MAT; dichas concentraciones de MAT se explican en la sección 3.5.

<sup>7</sup> Se omitieron materiales de menor relevancia para la simulación, como la tubería de cobre, la pintura negra de alta temperatura y el acrílico, los cuales serán descritos más adelante.

**Tabla 3. Datos utilizados en la simulación. Fuente: Cálculos propios.**

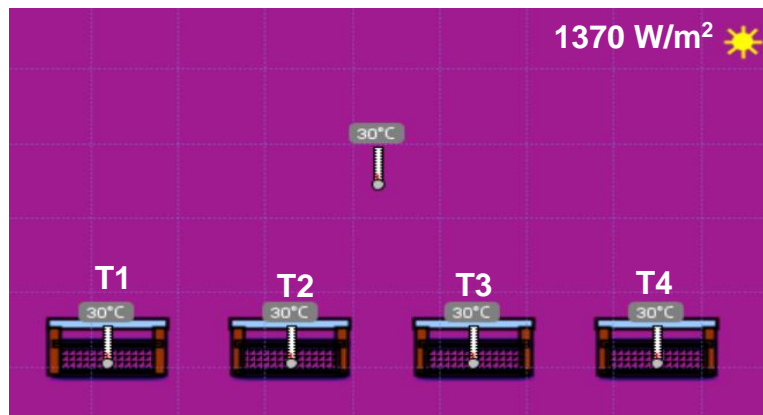
MAT - Prototipo	Conducti- vidad (W/m K)	Calor Específico (J/Kg°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorti- vidad
T1	0.688	788	2560.25	0.903
T2	1.264	885	2441.5	0.504
T3	1.025	849	2562.5	0.590
T4	0.923	824	2439.25	0.627

Se introdujeron estos valores en conjunto con los mostrados en la Tabla 2, seleccionando los objetos correspondientes al área del reservorio en el dibujo en 2D, en la opción de propiedades correspondientes.

### 3.4.2. Fuente de Calor

La principal fuente de calor hacia los dispositivos sería la radiación solar, con el valor de irradiancia promedio para México, es decir, 1370 w/m<sup>2</sup>. Esto se realizó mediante la simulación de una planta termo-solar que el programa posee<sup>8</sup>. A su vez, se introdujo una temperatura ambiente al exterior del sistema de 30°C.

La simulación tuvo una duración total de seis horas, ejecutándose a velocidad normal (1 segundo). Se utilizaron cinco termómetros; cuatro fueron colocados al interior del MAT de cada dispositivo, y uno fue colocado al exterior de estos, con el fin de mostrar la temperatura ambiente, tal como se muestra en la Figura 11, presentada a continuación.



**Figura 11. Simulación de los cuatro prototipos en funcionamiento, con el sol como fuente de calor.**

<sup>8</sup> Se puede acceder a este modelo ejemplo, al seleccionar en la barra superior 'Examples > Industrial applications > Solar Thermal Power Plant'.



En el apartado 4.2. de la sección correspondiente a los resultados del presente trabajo, se muestra de forma detallada el comportamiento que tuvo esta simulación al ser ejecutada.

### **3.5. La construcción física.**

La construcción del prototipo se llevó a cabo en el laboratorio de ecotecnologías de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Además de los materiales descritos en la sección 3.3. (Madera de cartón comprimido, acero inoxidable, cristal, piedra caliza, grava, hollín y pintura negra), se utilizaron también en la construcción otros materiales de bajo costo y fácil obtención, como tubos de cobre, acrílico y silicón industrial. Se decidió construir cuatro prototipos colector-reservorio, con el fin de introducir diferentes combinaciones de MAT dentro de cada uno de ellos; a continuación, se describirá paso por paso el proceso constructivo.

1. Primeramente, se ensambló la estructura de madera. Para ello se utilizó madera de cartón comprimido con un espesor de 1.5 cm, la cual fue recortada en placas. Para cada prototipo se emplearon tres placas de madera; una de 10 x 20 cm y dos de 10 x 13 cm. Las dos placas de menor dimensión fueron atornilladas a cada costado de la placa más grande, formando así la estructura exterior del prototipo. Se realizaron ranuras por dentro de esta estructura, pues en ellas se embonarían posteriormente las placas de acero inoxidable y cristal.
2. Para cada prototipo se recortaron dos placas de lámina de acero inoxidable y se cubrieron con pintura negra de alta temperatura marca COMEX®. Una de las placas fue colocada a la mitad de cada prototipo, como base del colector dentro de las ranuras de la estructura de madera, y poseería una dimensión aproximada de 12 x 21 cm. La segunda placa fue colocada por debajo del reservorio, con una dimensión aproximada de 13 x 23 cm; esta placa fue atornillada y sellada con silicón industrial.
3. Se consiguieron cuatro placas de cristal (una por cada prototipo), de espesor de 3 mm y de una medida aproximada de 12 x 21 cm. Dichas placas fueron colocadas en la parte superior de la estructura de madera de cada prototipo, dentro de su respectiva ranura.
4. El diseño del dispositivo contempló la entrada y salida de aire al sistema a través de un tubo de cobre, el cual, atraviesa el colector, bajando posteriormente al reservorio. Por ello, se utilizó dentro de cada prototipo un tubo de cobre de media pulgada de espesor cubierto igualmente con pintura negra. La entrada de dicho tubo sería por el frente del colector y su salida sería por debajo del reservorio, con una forma parecida a una 'S'. Antes de

soldar cada tubo, fue necesario hacer mediciones previas para insertar agujeros en la estructura de madera y las placas de acero, por donde atravesó dicha tubería.

5. Luego de soldar la tubería, se atornillaron las placas con el tubo por dentro y, posteriormente fue colocada una placa de cristal. Se selló con silicón industrial cada hueco sobrante, por donde pudiera existir una fuga de calor, además, se aisló con espuma de poliuretano las partes del tubo que quedaran al exterior del sistema.

Al tener los prototipos construidos, se procedió a introducir el Material de Almacenamiento Térmico dentro de cada reservorio térmico. Como se mencionó anteriormente, se decidió construir cuatro prototipos con el fin de introducir diferentes combinaciones de MAT en su interior pues, en la bibliografía no había información disponible sobre la concentración exacta de grava, piedra caliza u hollín que se debía introducir en reservorios térmicos de sistemas temo-solares. Por ende, se decidió poner a prueba cada uno de los cuatro prototipos en el análisis térmico y de eficiencia, para así comprobar de forma empírica cuál de estas combinaciones poseía un mejor desempeño. A continuación, se muestra la concentración porcentual de materiales (basándose en la masa total del MAT), que se utilizó en cada uno de los prototipos construidos, a los cuales, se les asignó un nombre para identificarlos (T1-T4).

Prototipo 1 (T1): 95% grava + 5% hollín

Prototipo 2 (T2): 95% piedra caliza + 5% hollín

Prototipo 3 (T3): 50% grava + 50% piedra caliza

Prototipo 4 (T4): 45% grava + 45% piedra caliza + 10% hollín

Después de introducir cada concentración de MAT en el reservorio de los dispositivos, se procedió a tapar el dispositivo mediante una placa de acrílico de una medida aproximada de 9.5 x 23 cm. Dicho material se utilizó para permitir capturar imágenes termográficas del reservorio térmico en operación, al realizar las pruebas térmicas. A esta tapa de acrílico se le realizó un pequeño orificio de aproximadamente 1 mm de diámetro, con el fin de que se pudiera introducir un termopar para las pruebas de desempeño térmico.

Por último, para la realización de las pruebas de desempeño térmico se utilizó una caja de cartón aislada internamente con poliestireno, la cual poseía las siguientes dimensiones: Largo: 60 cm, Alto: 43 cm y Ancho: 33 cm. Dicha caja fue dividida interiormente en cuatro secciones iguales, mediante placas del mismo material, siendo unidas y selladas con silicón industrial. Esta caja simularía cuatro espacios o 'cámaras' siendo calentadas por calefactores a escala, por lo tanto, cada sección de la caja se conectó exteriormente a los cuatro prototipos, aislando las uniones con espuma de poliuretano y evitar así las pérdidas de calor. Se insertó en

la parte superior de la caja cuatro aberturas cuadradas, por donde posteriormente se insertaron los termómetros correspondientes a cada cámara para el análisis del desempeño térmico.

### **3.6. La caracterización del sistema.**

Para tal caracterización, se realizaron dos análisis con el fin de observar el funcionamiento de cada uno de los cuatro prototipos propuestos; dichos análisis consistieron en las pruebas de desempeño térmico y el análisis de eficiencia térmica.

#### **3.6.1. Análisis del desempeño térmico.**

En la sección anterior se hizo mención de que se construyeron cuatro dispositivos con concentración diferente de MAT en cada uno de sus reservorios, con el fin de conocer qué dispositivo poseía mejores características de aprovechamiento termo-solar. Por ende, este análisis tenía como objetivo observar la dinámica de ganancia, acumulación y pérdida de calor de los dispositivos a través de su reservorio térmico. Por consiguiente, fue necesario llevar a cabo mediciones de la capacidad de calentamiento del reservorio térmico de los cuatro dispositivos, y el aumento de temperatura al interior de las cuatro cámaras, es decir, al interior de cada caja aislada con poliestireno.

El análisis se realizó en la ciudad de Morelia (19.700, -101.186) iniciando el 13 de marzo de 2019 y finalizando el 21 de marzo del mismo año. Para dicho análisis se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Cinco termómetros thermochron i-button DS1921G-F5#: Cuatro de estos termómetros fueron colocados dentro de cada cámara de prueba, y el quinto fue colocado fuera del sistema, con el fin de que registrara la temperatura ambiental.
- Termohigrómetro ambiental Bauer: Complementario para el registro de la temperatura ambiental y el porcentaje de humedad relativa.
- Solarímetro TM-206: Se utilizó para la medición de la irradiancia solar.
- Termómetro de contacto con cuatro termopares tipo K HT-9815: Se utilizó para el registro de la temperatura al interior del reservorio térmico de cada uno de los cuatro prototipos.
- Cámara termográfica UNI-T UTi160B: Fue utilizada para capturar imágenes termográficas del sistema, con el fin de observar su dinámica térmica.

Primeramente, los cuatro prototipos fueron conectados a su sección correspondiente<sup>9</sup> de la cámara con aislante. Se aisló con espuma de poliuretano las partes del tubo que quedaran al exterior del sistema para evitar pérdidas de calor. Al haber introducido los termómetros i-button al interior de cada cámara, las aberturas fueron selladas también con espuma de poliuretano. Los dispositivos fueron colocados en bases hechas a base de madera, con una inclinación de 22°, pues dicha inclinación favorece la mayor incidencia de radiación solar en el colector de los dispositivos, de acuerdo a la latitud de la ciudad donde fue llevado a cabo el análisis. Posteriormente el sistema colector-reservorio y cámara fue orientado hacia el sur, favoreciendo de igual manera la incidencia de radiación solar, pues este estudio se llevó a cabo en el hemisferio norte.

Habiendo ya colocado el sistema, se procedió a iniciar las pruebas. La hora de inicio de medición de temperatura al interior de los reservorios térmicos fue siempre a las 7:00 horas. En cuanto a la hora de finalización, ésta fue a las 19:00 horas los primeros cuatro días de medición, y los últimos cuatro días de medición fue a las 21:40 horas, obteniendo así 12 horas o más de medición por día. La medición de reservorios fue llevada a cabo con el termómetro de contacto; cada uno de los cuatro termopares utilizados fue colocado al interior de cada reservorio, introduciéndose por el pequeño orificio incorporado en la tapa de acrílico. Cada veinte minutos se registró manualmente la temperatura del reservorio, la irradiancia solar, la temperatura ambiental y la humedad relativa ambiental.

La captura de imágenes termográficas fue realizada también de forma manual los ocho días de medición, capturando cuatro pares<sup>10</sup> de imágenes al día. El primer par fue tomado a las 7:00 horas, el segundo par a las 13:00 horas (aproximadamente al medio día solar), el tercer par a las 16:00 horas, y el último par fue tomado a las 19:00 horas.

Al terminar los ocho días de prueba, los termómetros i-button fueron retirados del interior de las cámaras de prueba y se procedió al vaciado de datos y creación de gráficas, para posteriormente analizarlas.

### **3.6.2. Análisis termodinámico de eficiencia energética.**

La eficiencia energética es un parámetro muy importante a evaluar en el desarrollo de un dispositivo de calefacción, pues ésta define el grado de aprovechamiento de energía solar para ser transformada en calor. Para este análisis fue necesario basarse en el estudio realizado por Saxena y Srivastava (2014), pues

---

<sup>9</sup> Ordenados numéricamente de acuerdo a su nombre, es decir, T1, T2, T3 y T4.

<sup>10</sup> Exceptuando el día 13 de marzo, pues a las 7:00 horas sólo fue capturado el frente del sistema. Y el día 17 de marzo no se capturó el par de imágenes correspondientes a las 7:00 horas.

como se mencionó en la sección 3.2., el calefactor desarrollado por este autor posee características de diseño similares a los dispositivos propuestos en este trabajo. Con base en dicho estudio, la eficiencia térmica del sistema se define como el calor útil dividido entre la radiación total del colector, como se muestra en la ecuación 18:

$$\eta = \frac{Q_U}{I \cdot A_C} = 100 \frac{m \cdot C_P (T_f - T_i)}{I \cdot A_C} [\%] \quad (18)$$

$Q_U$  representa el calor útil, el cual está dado por el producto de la masa del reservorio (kg), el calor específico  $C_P$  (J/kg K) y el aumento de temperatura en grados Kelvin, calculado mediante la resta de la temperatura de salida  $T_f$  menos la temperatura de entrada  $T_i$ . La radiación total del colector será dada por el producto de la radiación solar  $I$  ( $W/m^2$ ) y el área de la superficie del colector  $A_C$  ( $m^2$ ).

Posteriormente, para evaluar las ventajas económicas y ambientales que el dispositivo propuesto podría suponer, fue necesario llevar a cabo otras dos etapas: la estimación del costo final de los dispositivos y la prospectiva económica ambiental de la propuesta escalada.

### 3.7. Estimación de costos del prototipo y prospectiva económica-ambiental.

Esta etapa contempló la realización de las siguientes actividades:

1. Estimación del costo final de cada prototipo: Se tomó el dato de estimación del costo<sup>11</sup> total de materiales utilizados y se dividió esta cifra de acuerdo a la cantidad de material usado en la construcción individual de los cuatro prototipos.
2. Realización de una búsqueda bibliográfica con el fin de indagar el número total de calefactores convencionales eléctricos en el sector residencial mexicano. La prospectiva económica-ambiental parte del supuesto de la sustitución de este mismo número de calefactores eléctricos convencionales por calefactores alternativos que funcionen a base de energía solar térmica.
3. Estimación del ahorro económico por la adquisición de un sistema de calefacción alternativo en comparación de un sistema convencional de calefacción.
4. Estimación del ahorro anual de energía eléctrica, y con ello el ahorro en el gasto por el cobro anual de electricidad por la sustitución de un dispositivo convencional por un dispositivo alternativo.

---

<sup>11</sup> Los precios finales se darán en Pesos Mexicanos (MXN), los cuales equivalen a 0.051 Dólares estadounidenses (a 1 de junio de 2019).

5. Estimación del Periodo Simple de Recuperación de la Inversión (PSRI) del sistema propuesto: El PSRI es un método financiero cuyo objetivo es medir el plazo de tiempo necesario para que una inversión recupere su costo o inversión inicial (Vaquiro, 2013; Çengel y Ghajar, 2011, p. 720). En este caso la adquisición del dispositivo será considerada como inversión. El PSRI simple es calculado mediante la siguiente fórmula (Ec. 19).

$$PSRI = \frac{\text{Costo de implantación}}{\text{Ahorros en los costos anuales}} \quad (19)$$

El cálculo del PSRI en el análisis de costos pretende mostrar que la adquisición y operación del sistema es económica, por lo que la inversión se puede ver recuperada en un plazo de tiempo corto.

6. Para la realización de la prospectiva ambiental se contempló retomar los datos de consumo energético, y con ello calcular la mitigación de gases de efecto invernadero por la sustitución fuentes de energía convencionales por fuentes renovables. Posteriormente, esta cifra se multiplicó por la cantidad total de hogares en México que poseen un dispositivo de calefacción convencional. El resultado obtenido se mostró en kilogramos de dióxido de carbono equivalente ( $\text{KgCO}_{2\text{eq}}$ ) mitigados.

### 3.8. Análisis de espectrofotometría

Se llevó a cabo con el fin de conocer las propiedades ópticas de absorbancia de las cuatro combinaciones diferentes de MAT utilizadas en el reservorio térmico de los prototipos construidos. Para ello se utilizó un espectrofotómetro Modelo Carry 5000, donde se midió la reflectividad total con espectro de longitud de onda de 300 nm a 2500 nm.

Dicho análisis sirvió como referencia para comprobar de forma teórica qué combinación de MAT posee un mejor comportamiento al ser introducido en un dispositivo termo-solar. Aquella combinación que tuviera una menor reflectividad, tendría una mayor absorción y, por lo tanto, mejores características de absorción de energía solar.

### 3.9. Análisis de flujo de calor

Se llevó a cabo con el propósito de conocer la transferencia de calor total  $q$ , desprendido de forma instantánea por los reservorios térmicos de cada prototipo. El

flujo total de calor, bajo el concepto de régimen transitorio fue calculado mediante la siguiente ecuación (Ec. 20) (Kreith, 1970; Monrroy, 1995).

$$q(0 \rightarrow t) = \rho V C_p (T_i - T_f) [J] \quad (20)$$

Donde  $q$  es el flujo total de calor, el cual está dado por el producto de la densidad del MAT  $\rho$ , el volumen del reservorio  $V$ , y el calor específico del MAT  $C_p$ ; a su vez, este producto es multiplicado por la diferencia de temperatura instantánea  $T_i - T_f$ .

### 3.10. Diseño de experimento

Este análisis fue realizado con el objetivo de refutar cualquier hipótesis nula referente a la influencia nula de los diferentes tratamientos o combinaciones de MAT en el grado de calentamiento de los reservorios. El análisis de varianza se realizó mediante un diseño de experimento simple, considerando datos típicos de un experimento de un solo factor (Tabla 4).

Tabla 4. Datos típicos de un experimento de un solo factor.

Tratamiento (nivel)	Observaciones				Totales	Promedios
1	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	...	Y <sub>1n</sub>	Y <sub>1</sub>	$\bar{y}_1$
2	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	...	Y <sub>2n</sub>	Y <sub>2</sub>	$\bar{y}_2$
.	.	.	...	.	.	.
.	.	.	...	.	.	.
.	.	.	...	.	.	.
a	Y <sub>a1</sub>	Y <sub>a2</sub>	...	Y <sub>an</sub>	$\underline{Y}_a$	$\bar{y}_a$
					y...	$\bar{y} \dots$

Utilizando un modelo como el que se muestra en la siguiente ecuación (Montgomery, 2002)

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_i \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (21)$$

Donde  $y_{ij}$  es la observación  $ij$ -ésima,  $\mu_i$  es la media del nivel del factor o tratamiento  $i$ -ésimo, y  $\varepsilon_i$  es un componente del error aleatorio que incorpora todas las demás fuentes de variabilidad del experimento, incluyendo las mediciones, la variabilidad que surge de factores no controlados, las diferencias entre las unidades experimentales a las que aplican los tratamientos y el error general del proceso (*íbid*). Otra forma de reescribir la ecuación 21, es considerando el efecto de los tratamientos  $i$ -ésimo, esto es:

$$y_{ij} = \mu_i + \tau_i + \varepsilon_i \quad (22)$$

En el presente caso de estudio, el modelo propuesto incorpora como factor o tratamiento la concentración de MAT "1" (combinación Hollín/grava), presente en las muestras analizadas, principalmente en T1. Se analizan 4 niveles que corresponden a los distintos porcentajes de concentración, que son los que corresponden a las muestras sometidas a pruebas (desde el 100%, en el caso de T1, hasta el 0%, en el caso de T2 y T3). Se tomaron en cuenta seis repeticiones del experimento (días con mayor irradiancia en pruebas) para determinar su capacidad termo-solar, considerando como parámetro la temperatura máxima de prueba en el reservorio térmico. Las hipótesis del modelo son las siguientes:

$$\text{Hipótesis nula} \rightarrow H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0$$

$$\text{Hipótesis alternativa} \rightarrow H_0: \tau_i \neq 0 \text{ al menos para un "i"}$$

En este caso, la hipótesis nula refuta que la existencia de MAT 1, en diferente concentración dentro de los reservorios, tenga influencia sobre el grado de calentamiento. La hipótesis alternativa, por el contrario, establece que la existencia del MAT 1 en el reservorio sí posee influencia sobre el calentamiento de éste. Para el procesamiento de datos se considera que:

$$SST = SSTr + SSE \quad (23)$$

Dónde:  $SST$  es variabilidad total,  $SSTr$  corresponde variabilidad asociada al procesamiento de datos y  $SSE$  es la variabilidad asociada al error. En términos matemáticos, la ecuación 23 se expresa como se muestra a continuación:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y} \dots)^2 = n \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y} \dots)^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (24)$$

Así mismo, para validar alguna de las hipótesis mencionadas, se hará uso de la Tabla 5, y el análisis de experimento y varianza para modelos con un solo factor y efectos fijos (Montgomery, 2002).

**Tabla 5. Análisis de varianza para modelos con un solo factor y efectos fijos**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>
Entre los tratamientos	$SS_{tratamientos} = n \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y} \dots)^2$	$a-1$	$MS_{tratamientos}$	$F_0 = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E}$
Error (dentro de los tratamientos)	$SS_E = SS_T - SS_{tratamientos}$	$N-a$	$MS_E$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$N-1$		



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Diseño final del prototipo.

A continuación, se muestra una serie de imágenes del render final del dispositivo propuesto en el presente trabajo, elaborado en SolidWorks 2017. Como se mencionó anteriormente, este render sólo contempló el diseño del colector-reservorio, excluyendo así la base y las cámaras de prueba térmica.

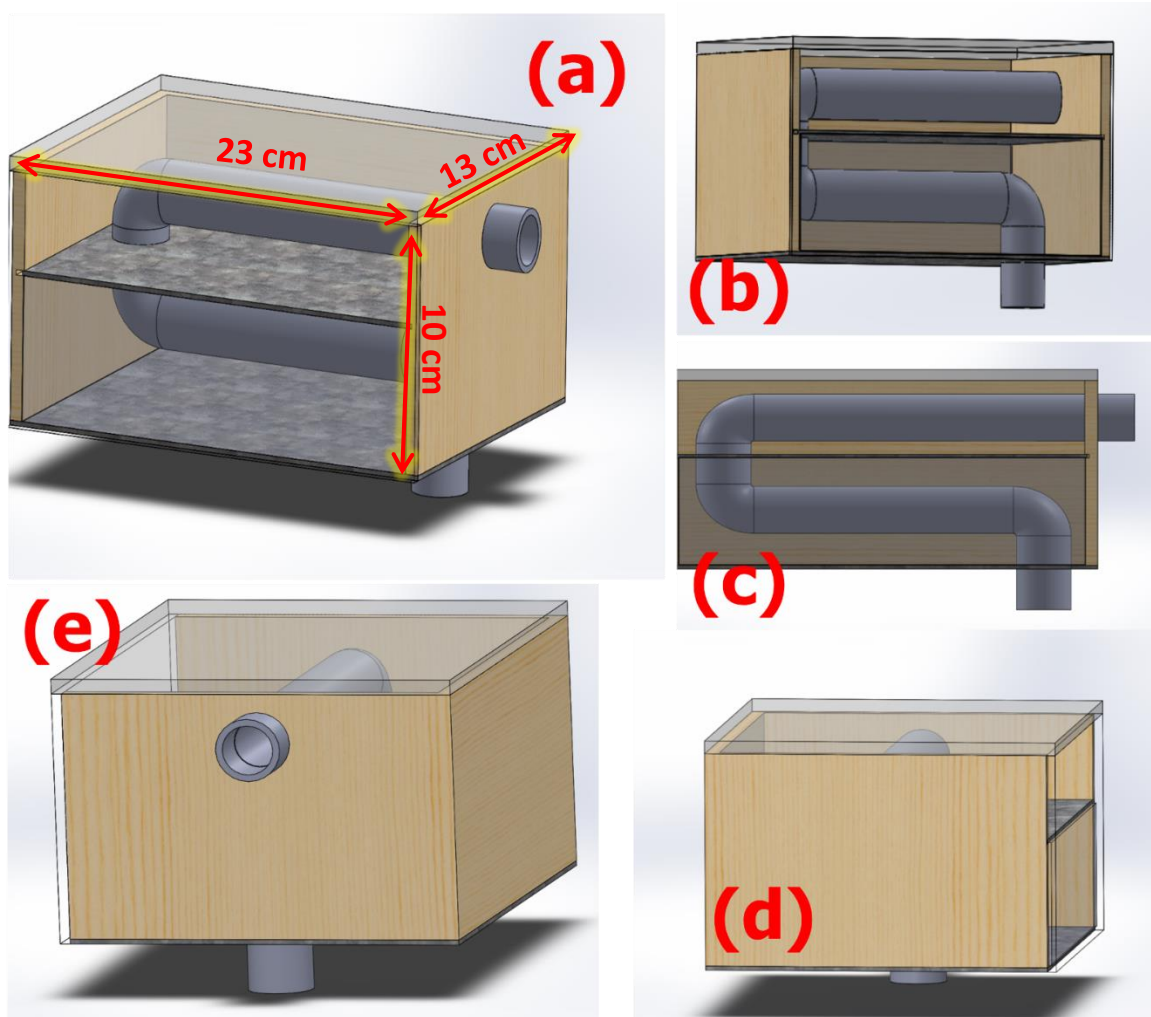


Figura 12. Diseño en SolidWorks del dispositivo finalizado. (a) Proyección isométrica, (b) vista 1 lateral, (c) corte de sección transversal, (d) vista posterior, (e) vista frontal.

Desde una vista lateral el dispositivo está delimitado con madera de cartón comprimido en sus costados; en la vista frontal (e) se observa la entrada de aire al sistema. En la parte superior del dispositivo se encuentra el colector de placa plana, el cual está conformado por una tapa de cristal y una lámina de acero negro bajo

ésta, a su vez, la lámina divide al sistema a la mitad. Entre el cristal y la lámina de acero se encuentra el tubo, conteniendo en su interior aire proveniente del exterior. Debajo del colector de placa plana se encuentra el reservorio térmico del sistema; este se muestra en el render sin MAT. En la vista de corte transversal (c), se observa cómo la tubería hace su recorrido a través del dispositivo, atravesando primero el colector, donde se da la primera ganancia de calor, y, posteriormente atraviesa el reservorio térmico, donde se almacenará el calor colectado. La parte inferior está cubierta por una lámina de acero inoxidable; por debajo se tiene la salida del tubo, por donde atravesará el aire que se ha calentado.

#### 4.2. Comportamiento de la simulación en ENERGY 2D.

Las siguientes imágenes (Fig. 13-19) muestran el comportamiento de la simulación en ENERGY 2D. Se observa la dinámica de ganancia de calor a través del tiempo, al interior del reservorio de los cuatro dispositivos, cada uno con diferente composición del MAT. La simulación considera radiación solar incidente, como una fuente de energía constante para los cuatro sistemas analizados; la temperatura ambiente representa un parámetro fijo. En cada Figura, se incluye también la acotación de cada dispositivo para distinguir fácilmente cada uno de éstos.

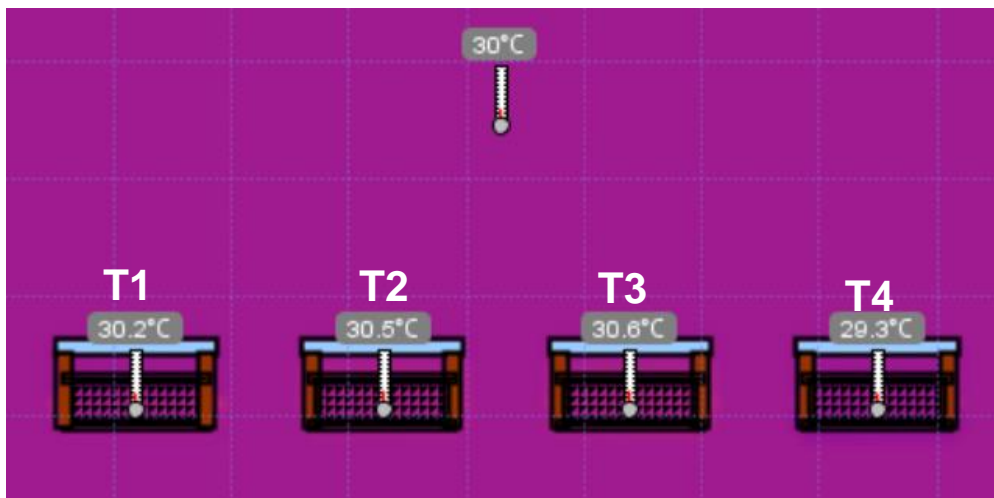
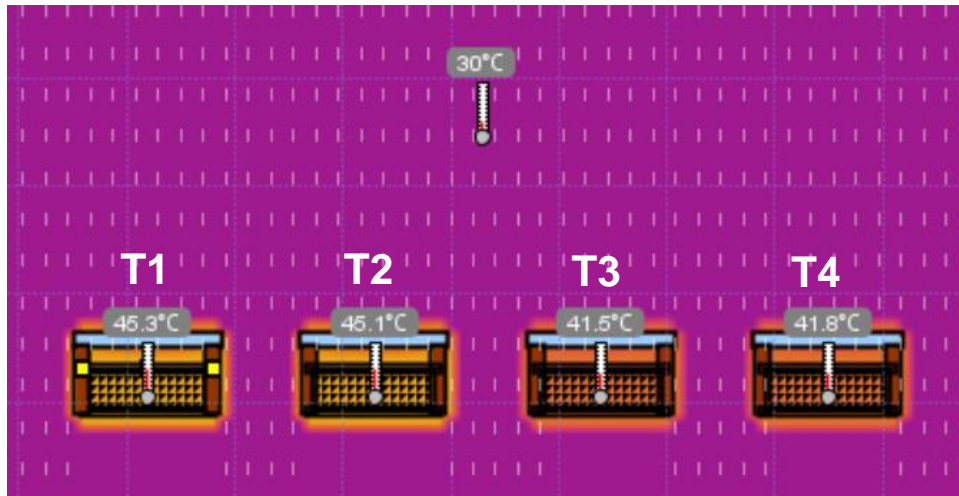


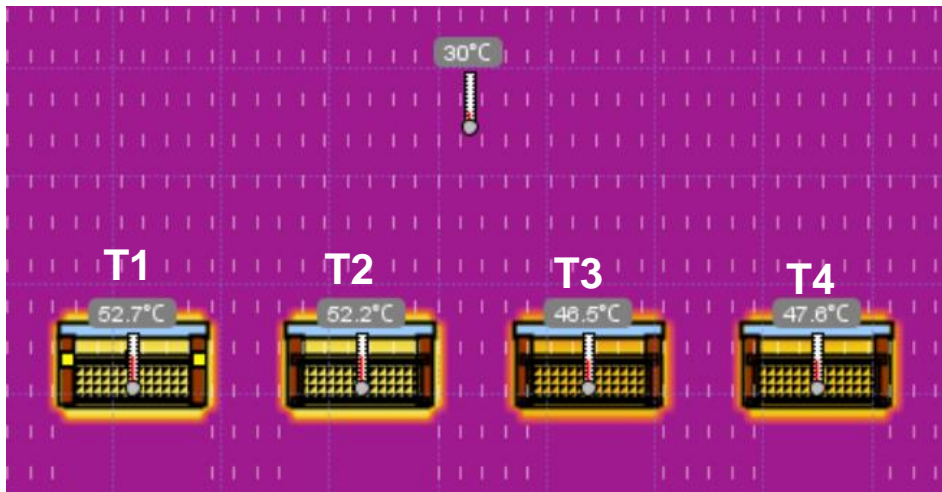
Figura 13. Inicio de la simulación.

En la Figura 13, se muestra la simulación a los pocos segundos de haber sido ejecutada. La temperatura inicial del reservorio es igual a la temperatura ambiental, es decir,  $T_i = 30^\circ\text{C}$ . Rápidamente los cuatro dispositivos comienzan, en su mayoría, a aumentar su temperatura.



**Figura 14. Simulación al transcurrir una hora.**

Después de transcurrir una hora del inicio de la simulación, se aprecia un aumento considerable en la temperatura del reservorio de los cuatro dispositivos. Como se muestra en la Figura 14, el dispositivo T1 es el que ha conseguido un mayor aumento en la temperatura de su reservorio, logrando un incremento de más de 15°C. Nótese que conforme los objetos van alcanzando una mayor temperatura, éstos adquieren distintas tonalidades, desde naranja y amarillo hasta llegar a un color blanco. A su vez, las pequeñas marcas que se observan alrededor de los dispositivos simulan ser la radiación proveniente del sol.



**Figura 15. Simulación al transcurrir dos horas.**

Respecto a la Figura 15, esta muestra el progreso de la simulación, después de dos horas de inicio. Nuevamente el dispositivo T1 es el que logra alcanzar un

mayor valor de temperatura, incrementando hasta  $22.7^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura ambiental. A su vez, T2 se encuentra casi a la par de T1, pues también ha logrado incrementar su temperatura hasta  $22.2^{\circ}\text{C}$ . El dispositivo con el menor incremento en la temperatura de su reservorio es T3, alcanzando una temperatura  $16.5^{\circ}\text{C}$  mayor que la temperatura ambiental.

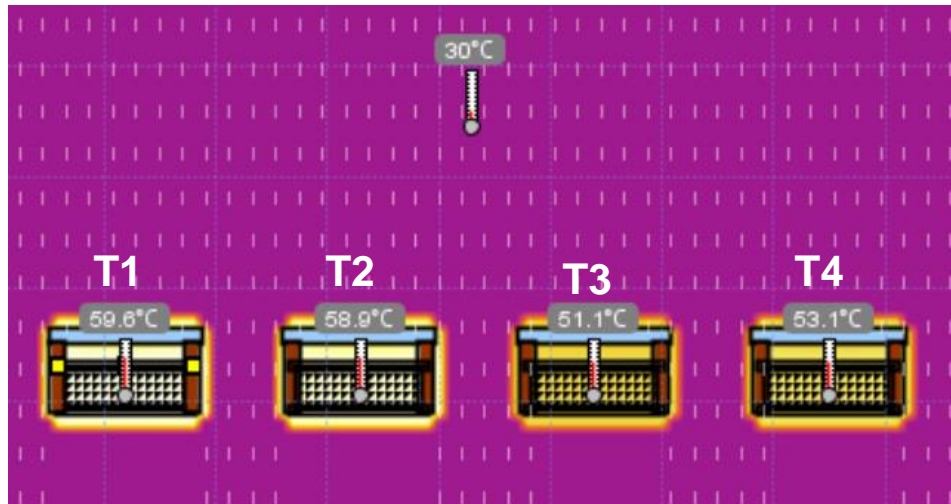


Figura 16. Simulación al transcurrir tres horas.

Al transcurrir tres horas luego de dar inicio a la simulación (Fig. 16), el comportamiento de la simulación tiende a mantenerse igual que en las imágenes anteriores. T1, continúa logrando un mayor incremento en la temperatura de su reservorio, alcanzando un incremento de casi  $30^{\circ}\text{C}$ , con respecto a la temperatura ambiental. T3 posee una temperatura casi  $10^{\circ}\text{C}$  menor en comparación con T1.

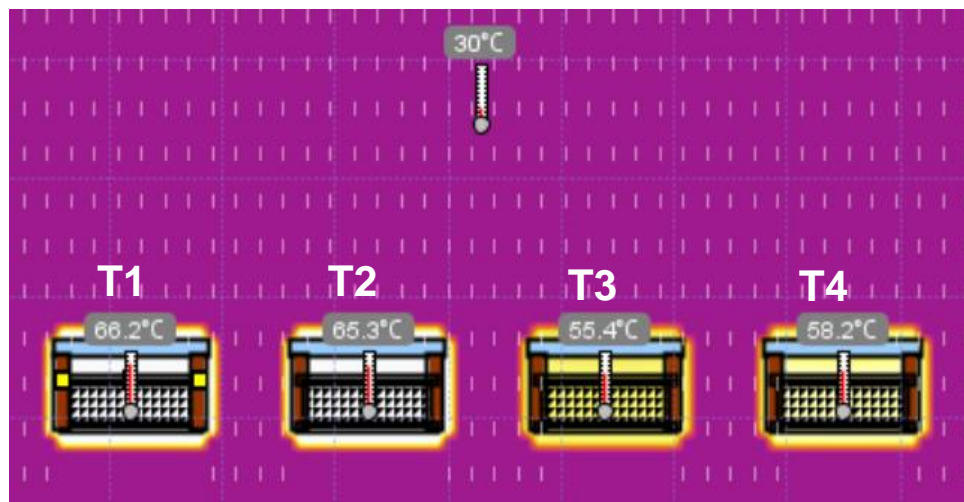


Figura 17. Simulación al transcurrir cuatro horas.

Al transcurrir cuatro horas de simulación, los dispositivos continúan calentándose de la misma forma, T1 y T2 consiguen un mayor calentamiento de su reservorio en comparación con los otros dos dispositivos. Como se observa en la Figura 17, la temperatura de los reservorios en estos dos dispositivos ha aumentado tanto que se aprecian de un color blanco.

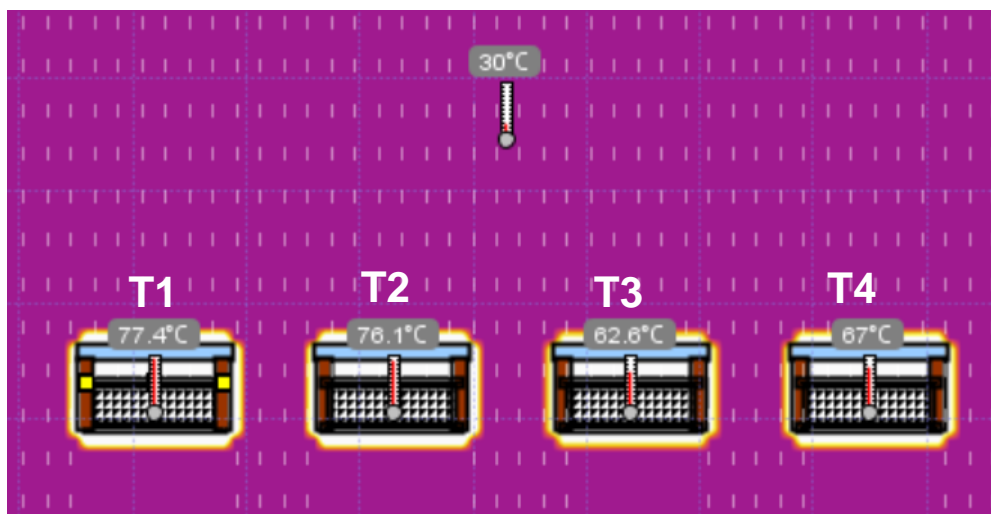


Figura 18. Simulación al transcurrir cinco horas.

Luego de cinco horas de simulación (Fig. 18), la temperatura de todos los dispositivos se mantiene más de 30°C por encima de la temperatura ambiental. T1 ha alcanzado una temperatura de 77.4°C, seguido de T2 con 76.1°C. T3 y T4 se mantienen por debajo de los 70°C.

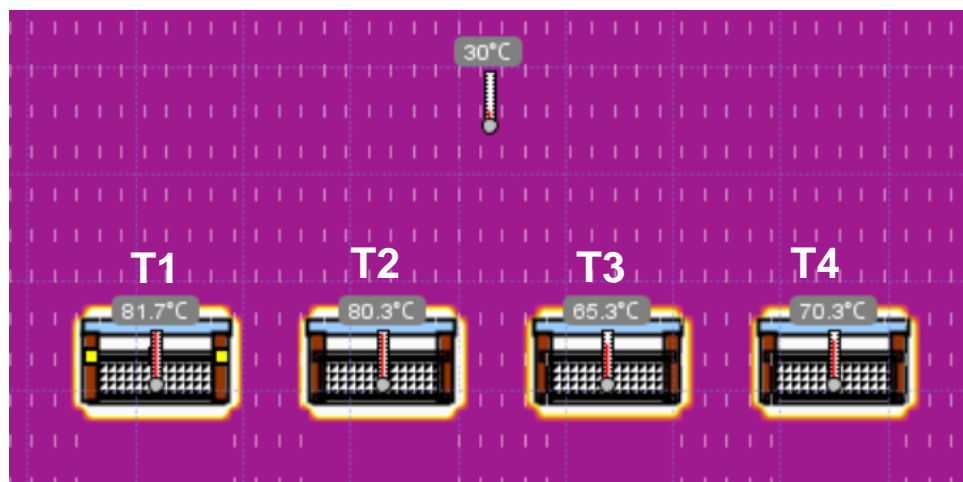


Figura 19. Simulación al transcurrir seis horas.

La última imagen de la simulación (Fig. 19) muestra a los cuatro dispositivos calentados luego de recibir radiación solar constante durante seis horas. A este punto todos los dispositivos han alcanzado altas temperaturas en comparación con la temperatura ambiental. T1 ha alcanzado una temperatura superior a los 80°C, siendo este el prototipo con una mayor capacidad de calentamiento en su reservorio, gracias a las propiedades de su MAT.

La siguiente gráfica (Fig. 20) muestra los resultados de la simulación y la ganancia de calor de los cuatro dispositivos, durante los primeros 130 minutos de simulación.

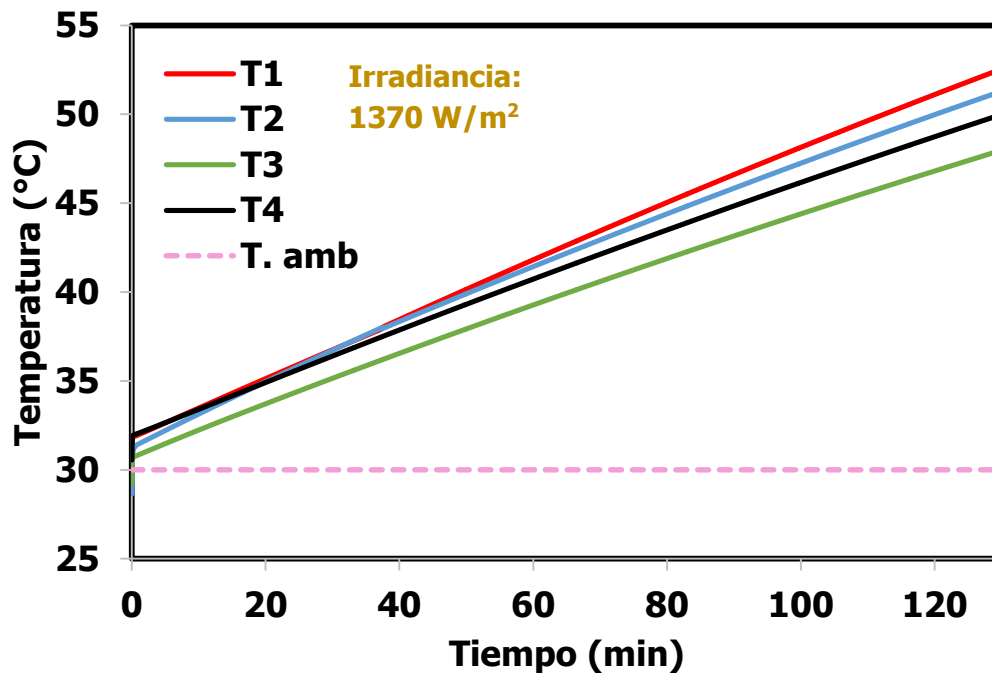


Figura 20. Gráfica de los resultados de la simulación en ENERGY 2D.

Se observa nuevamente cómo T1 consiguió un mayor calentamiento de su reservorio, aumentando en las dos primeras horas poco más de 50°C, logrando así un aumento de más de 20°C con respecto a la temperatura ambiental. Así mismo, se muestra a T2 en segundo lugar en cuanto a su calentamiento; T4 en tercer lugar y, T3 en último lugar, como se observó también en las imágenes termográficas (Fig. 13 – 19). En el Anexo 1, se muestra la tabla de datos que sirvió de base para elaborar la Figura 20.

En general, todos los dispositivos consiguen aumentar su temperatura paulatinamente, logrando alcanzar una gran energía térmica en su interior. Por ende, la simulación muestra que los dispositivos propuestos poseen funcionalidad para incrementar su temperatura mediante la radiación solar.

### 4.3. Prototipo construido.

La siguiente serie de fotografías (Fig. 21), muestra los prototipos colector-reservorio construidos y colocados en su base de madera.

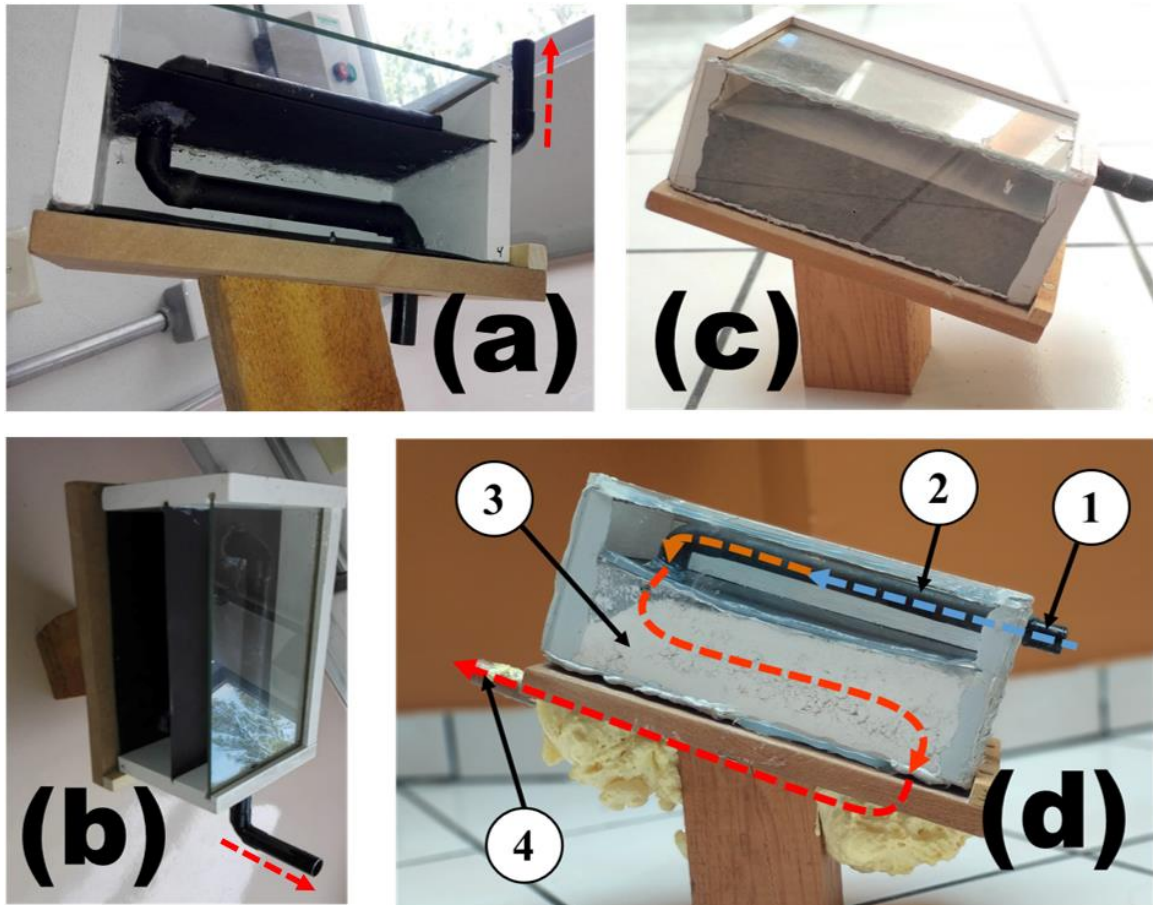


Figura 21. Prototipo construido. (a) y (b) Estructura del colector-reservorio con el tubo en su interior, aún sin MAT (c) Prototipo T1 finalizado (d) Trayecto de aire al interior del prototipo T3.

Los incisos (a) y (b) muestran al dispositivo aún sin MAT. Cabe señalar que este prototipo fue posteriormente modificado, por lo tanto, el tubo superior, señalado mediante flechas rojas, fue removido, con el fin de reducir la longitud del tubo, para disminuir las pérdidas de calor. (c) y (d) muestran estos prototipos ya con MAT y sellados con una placa de acrílico, adherida con silicón industrial. (d) fue tomada luego de la realización de pruebas, por ello se observa la espuma aislante de poliuretano, colocada para aislar el tubo inferior durante las pruebas.

En el inciso (d) se muestra el trayecto del aire a ser calentado por el prototipo construido, señalando mediante números sus etapas, las cuales serán descritas a continuación:

1. Entrada de aire a temperatura ambiente al dispositivo.

2. El aire atraviesa el colector, donde hay una ganancia de calor por radiación solar. El aire calentado sube a través del tubo, debido a la diferencia de densidad que éste presenta por la variación en su temperatura, por ende, existe una transferencia también por convección.
3. El aire contenido en el tubo entra en contacto con el MAT, por lo tanto, se transfiere calor a dicho material y, posteriormente el calor es almacenado. Si el aire que entra en contacto con el MAT posee una temperatura menor a la de éste, el MAT calentará entonces al aire; esto último ocurre siempre en la noche, cuando no hay más radiación solar, por lo que la ganancia de calor no se dará gracias al colector, sino gracias al MAT.
4. Salida de aire caliente.

Como se hizo mención en la sección 3.5. referente a la metodología de construcción, se asignó una composición diferente de MAT dentro del reservorio de cada uno de los cuatro prototipos. Dicha composición fue porcentual y basada en la masa, y con ello, se obtuvo como resultado un peso diferente para cada prototipo, tal como se muestra a continuación, en la Tabla 6.

**Tabla 6. Composición de los cuatro prototipos, ya construidos.**

<b>Prototipo</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>Peso total (kg)</b>	2.680	1.630	1.980	1.912
<b>Peso del MAT (kg)</b>	1.580	0.514	0.918	0.792
<b>Peso grava (kg)</b>	1.501	0	0.459	0.356
<b>Peso piedra caliza (kg)</b>	0	0.488	0.459	0.356
<b>Peso hollín (kg)</b>	0.079	0.025	0	0.08

Posteriormente, para la realización de las pruebas de desempeño térmico se procedió a unir cada prototipo a la caja aislada, con el fin de medir el potencial de calentamiento, almacenamiento de calor en el reservorio y al interior de las cámaras de prueba. A continuación, en la Figura 22, se muestra como quedó elaborado el sistema de prueba.



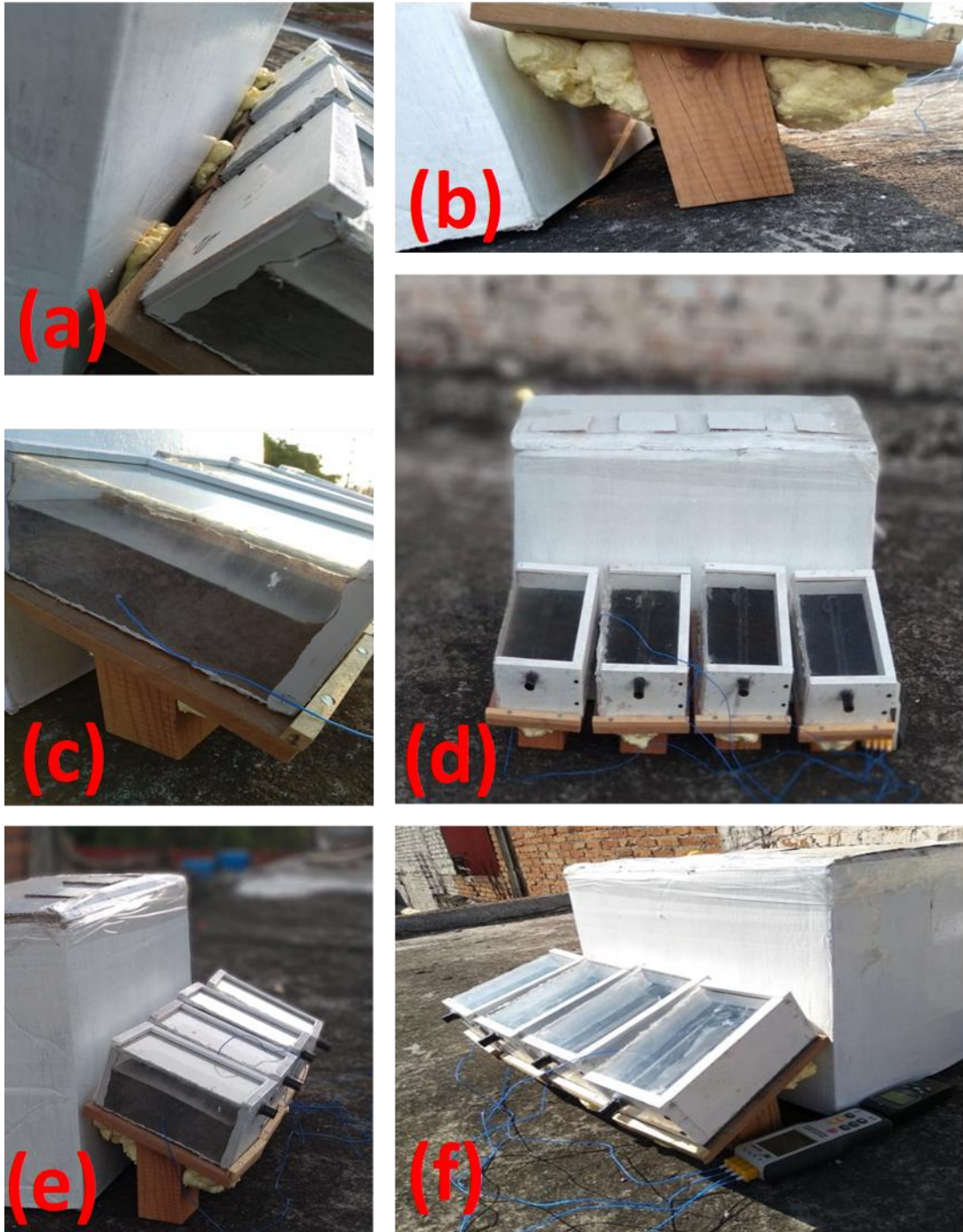


Figura 22. Sistema de prueba para el análisis de desempeño térmico. (a) y (b) muestran la unión entre el colector-reservorio y la cámara (c) Registro de la temperatura del reservorio mediante el termo-par. (d) Vista frontal del sistema. (e) y (f) prototipo siendo puesto a prueba para el análisis del desempeño térmico.

El inciso (a) en la Figura 22, muestra la unión entre el colector-reservorio y la cámara de prueba; cada prototipo fue conectado a su respectiva sección

internamente aislada. En el inciso (b) se observa cómo el tubo atraviesa la base de madera por el centro de ésta. A su vez, se observa el aislante de espuma de poliuretano sobre el tubo.

Respecto al inciso (c), se observa el registro de la temperatura del MAT con el termopar, introduciéndose por el pequeño orificio del acrílico. Posteriormente, en el inciso (d) se muestra como cada termo-par fue conectado a los reservorios térmicos. A su vez, en el inciso (d) se puede apreciar cada abertura en la cámara de prueba; por medio de ellas, se introdujeron los termómetros i-button para la medición de temperatura al interior de cada una de las cuatro cámaras internas.

En los incisos (e) y (f) se muestra al sistema de prueba en operación, donde (e) correspondió a un día de prueba nublado.

Los resultados correspondientes a las pruebas realizadas en este sistema serán descritos a continuación.

#### **4.4. Resultados del Análisis de desempeño térmico.**

Este análisis tuvo como objetivo medir la capacidad de calentamiento y almacenamiento de calor del prototipo. Contempló la realización de las siguientes tres pruebas:

Prueba 1: Registro del comportamiento térmico al interior del reservorio de los cuatro prototipos.

Prueba 2: Registro del comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras conectadas a los prototipos.

Prueba 3: Captura de imágenes termográficas del sistema.

##### **4.4.1. Comportamiento térmico de los cuatro prototipos.**

En seguida, se presentan mediante gráficas los resultados del comportamiento térmico, basados en la temperatura de los reservorios en los cuatro prototipos, en relación a la temperatura ambiental y la irradiancia solar (Véase Figuras 23 – 31).

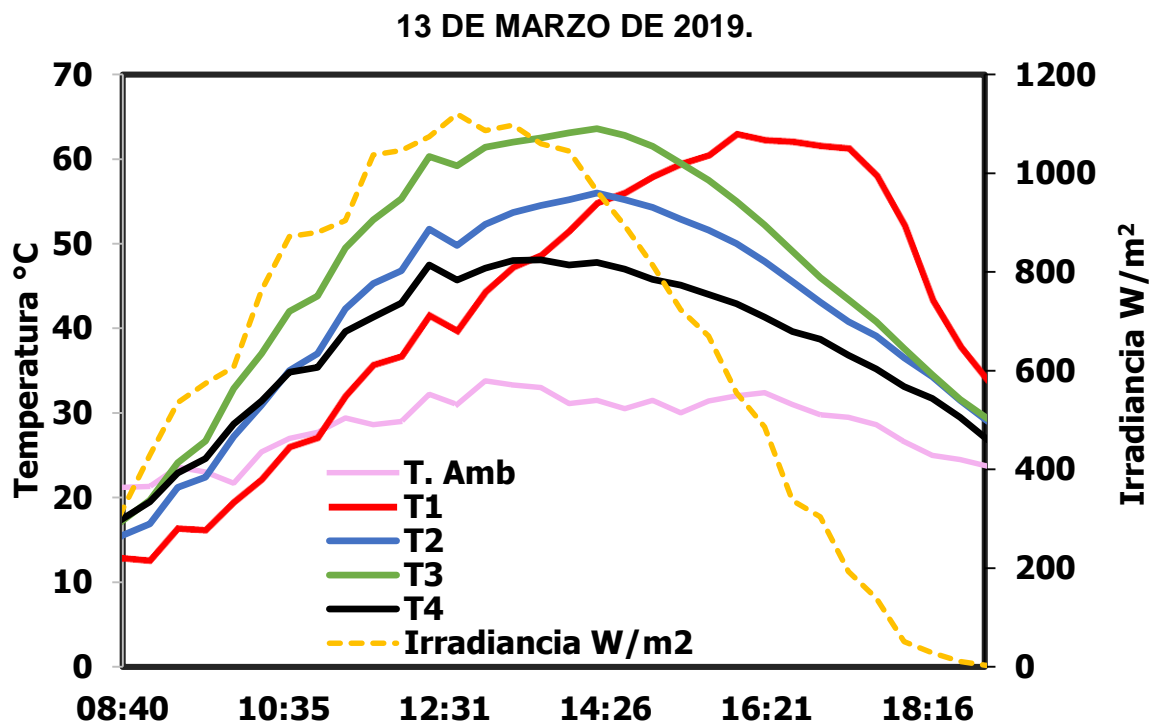


Figura 23. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (13/03).

La primera gráfica resultante de la prueba en el reservorio (Fig. 23), muestra como los cuatro prototipos poseen un comportamiento similar durante las primeras horas de medición, pues estos dispositivos ganan calor de una forma similar. Al medio día solar (aproximadamente a las 13:00 horas), la irradiancia solar alcanza su punto máximo. A esta hora se aprecia también que el dispositivo cuyo reservorio posee una mayor temperatura es T3, cuya temperatura alcanza valores superiores a los 60°C. El segundo dispositivo con un mayor valor de temperatura es T2, seguido por T3. T1 es el dispositivo con el menor valor de temperatura en su reservorio al medio día, en comparación con los otros tres dispositivos.

Después del medio día solar sucede algo interesante con respecto al reservorio térmico de los dispositivos, pues, si bien T1 poseía el menor valor de temperatura al medio día solar, después de esa hora dicho valor comienza a incrementarse. A las 16:00 horas T1 alcanza su valor máximo de temperatura, alcanzando valores superiores a los 60°C. Mientras que la temperatura de los otros tres dispositivos comienza a disminuir después de las 14:00 horas, el reservorio de T1 alcanza su temperatura máxima dos horas después, por lo que se mantiene caliente por más tiempo, al transcurrir la tarde. Las pruebas de este día terminaron las 19:00 horas, y en este punto se puede observar que la temperatura de T1 es

superior a los otros tres dispositivos, siendo 10°C mayor que la temperatura ambiental.

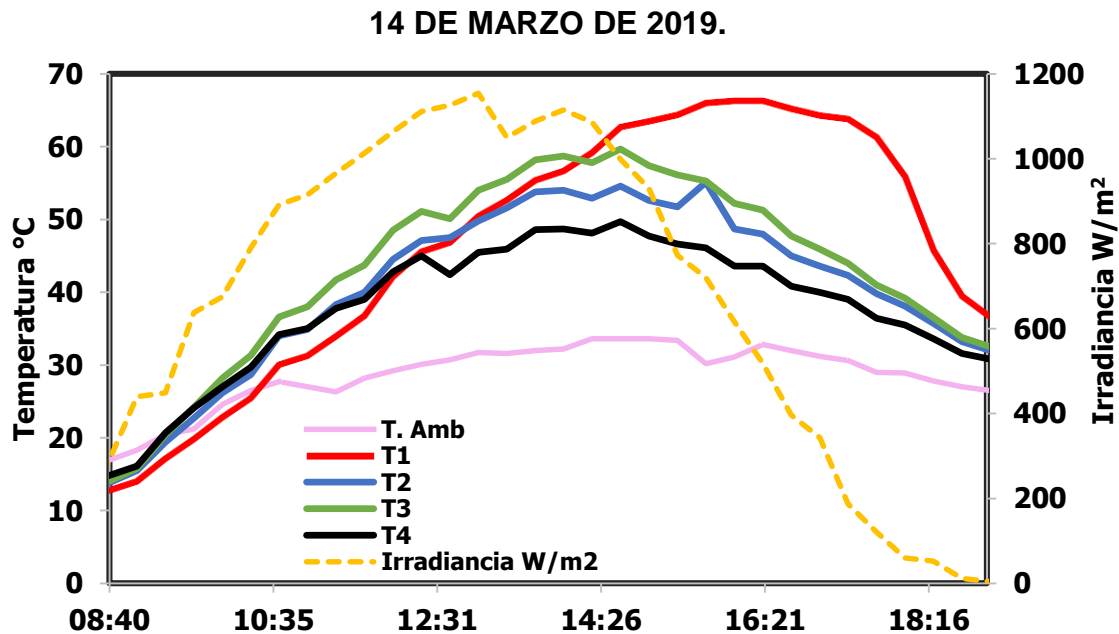


Figura 24. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (14/03).

En este día se aprecia un comportamiento similar al del día anterior. Los valores de temperatura ambiental e irradiancia son similares a los del día 13 de marzo. A su vez, al medio día solar, T3 posee nuevamente una mayor temperatura al interior de su reservorio. Posteriormente, se puede observar ahora de forma más notoria (en comparación con el día anterior) cómo a partir de las 14:30 horas, la temperatura de T1 se eleva por encima de la de los otros dispositivos. A su vez, el reservorio de T1 alcanza ahora un valor de temperatura superior al del día anterior, logrando calentarse más de 65°C. De igual forma, T1 mantiene un valor elevado de temperatura por la tarde, y nuevamente a las 19:00 horas es el dispositivo con mayor acumulación de calor, manteniendo una temperatura 10°C mayor que la temperatura ambiental.

15 DE MARZO DE 2019.

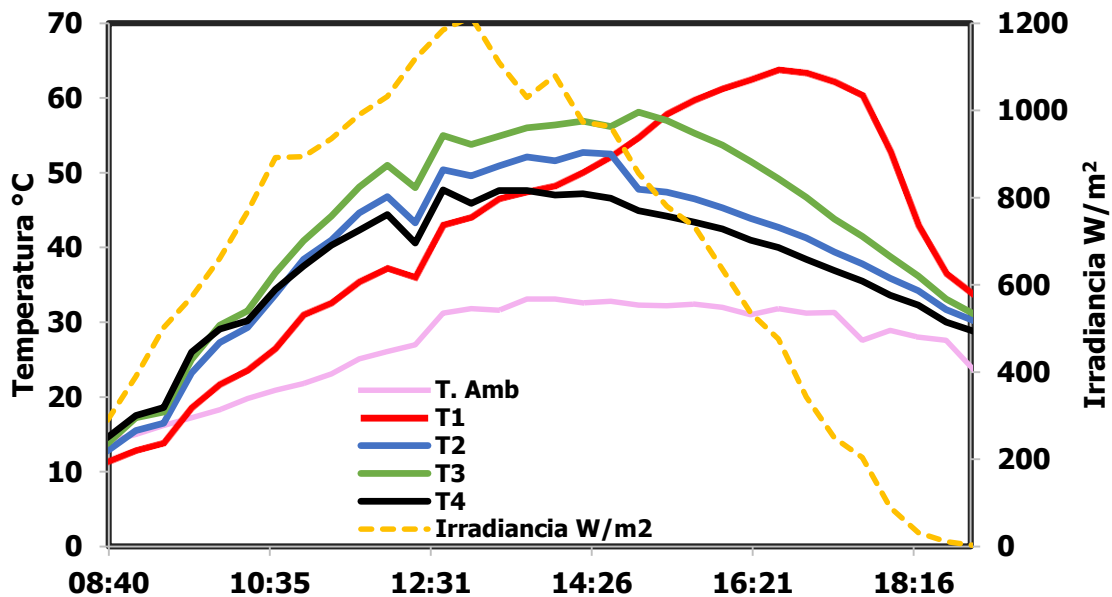


Figura 25. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (15/03).

Las condiciones ambientales, referentes a la temperatura ambiental e irradiancia, en este día fueron similares a las de los dos días anteriores. Se observa, de igual modo, el mismo comportamiento de temperaturas en el reservorio al medio día solar. Sin embargo, en este día el valor máximo de temperatura alcanzada por T1 se dio más tarde, en comparación con los otros dos días de medición; obteniendo su mayor valor de temperatura (aproximadamente 65°C) a las 17:00 horas. Sin embargo, al finalizar las mediciones (19:00 horas) siguió manteniendo una temperatura 10°C mayor que la temperatura ambiental.

16 DE MARZO DE 2019.

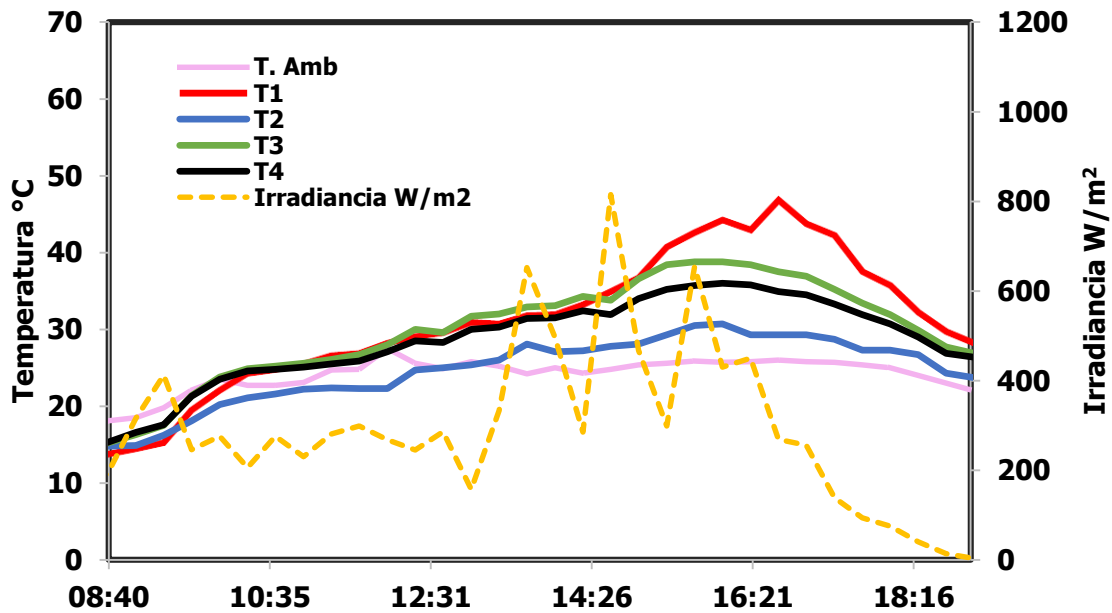


Figura 26. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (16/03).

En este día de medición se aprecian valores más bajos e irregulares de irradiación solar, en comparación con los tres días previos, pues se trató de un día mayormente nublado. La disminución repentina en la irradiación durante el día se da por la presencia de nubosidad, por consiguiente, la temperatura ambiental de este día fue también menor, en comparación con los tres días anteriores. En un principio, todos los prototipos poseían un desempeño similar en su reservorio, sin embargo, a partir de las 14:30 horas, T1 incrementó su temperatura con respecto a los demás dispositivos. Como se muestran en la Figura 26, T1 alcanzó su valor máximo de temperatura a las 16:40 horas, logrando una temperatura 20°C mayor que la temperatura ambiental.

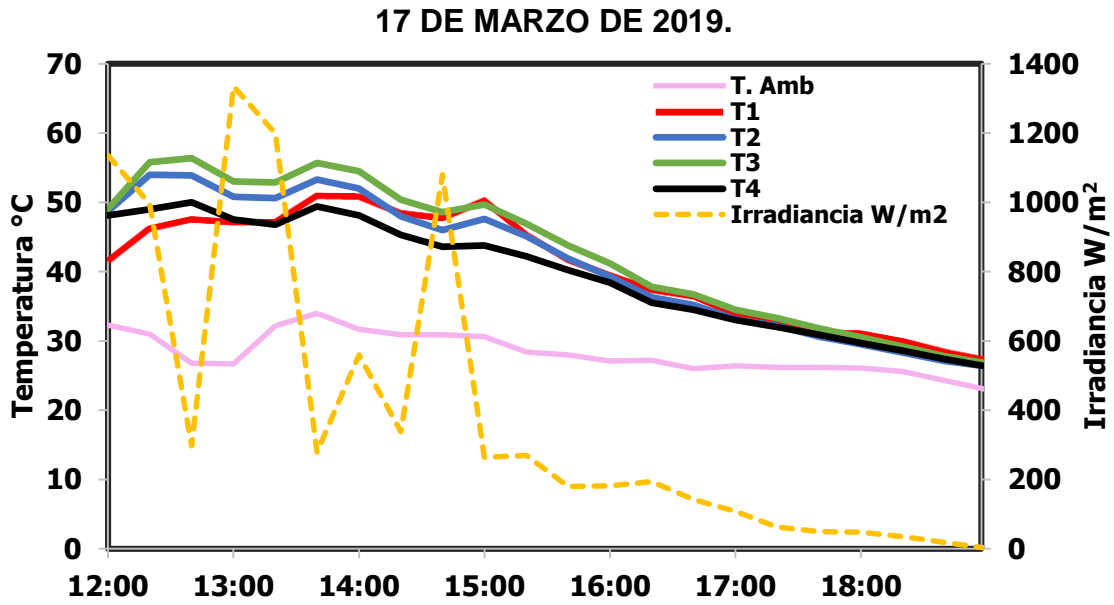


Figura 27. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (17/03).

Este día de prueba contempló un menor número de horas de medición, pues la hora de inicio fue a las 12:00 horas y la hora de finalización fue a las 19:00 horas. A su vez, se trató de un día nublado, al igual que el día anterior. Por otro lado, los cuatro dispositivos poseyeron un comportamiento similar, siendo T3 el que alcanzó la mayor temperatura a las 12:30 horas, cuyo valor fue de 56°C.

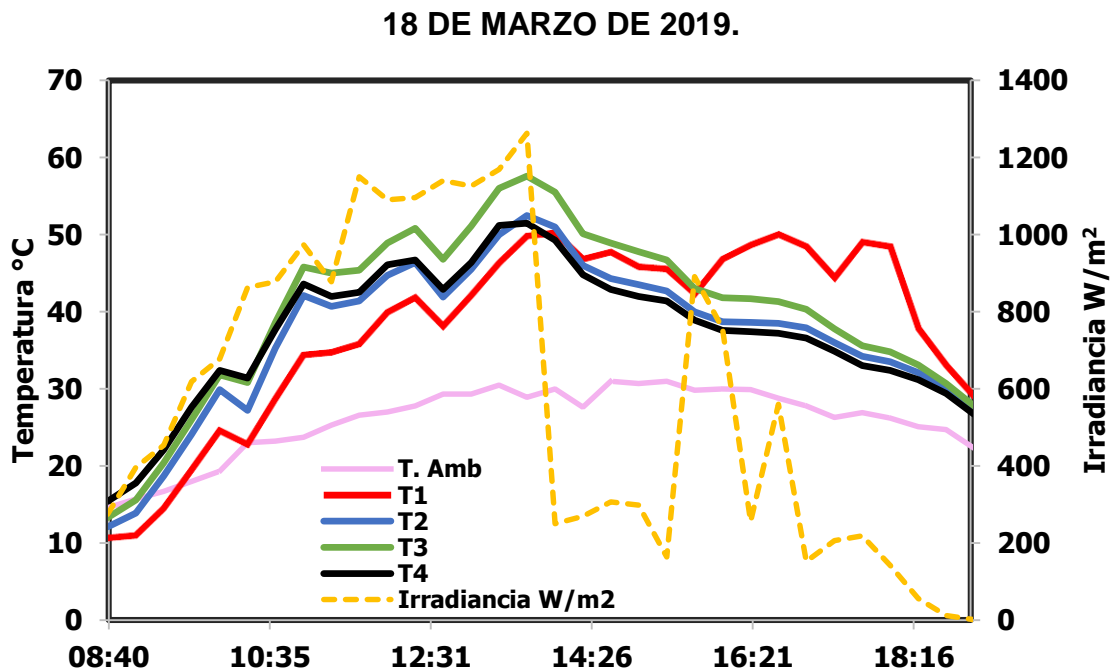


Figura 28. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (18/03).

Como se aprecia en la Figura 28, existe un nivel de irradiancia estable al inicio del día, pero a partir de las 13:00 horas comienza a haber presencia de nubes de gran tamaño. Por lo tanto, el desempeño de los cuatro dispositivos fue también inestable. A pesar de lo anterior, se muestra la misma tendencia de las primeras cuatro gráficas, pues, aunque al medio día solar T3 es el dispositivo con mayor temperatura, a partir de las 16:00 horas, la temperatura del reservorio de T1 comienza a incrementar, manteniendo el calor acumulado hasta aproximadamente las 18:00 horas, donde esta temperatura comienza a disminuir.

A partir de este día el tiempo de medición se incrementó, finalizando ahora a las 21:40 horas, cuando la temperatura del reservorio térmico entra en equilibrio térmico con la temperatura ambiental.

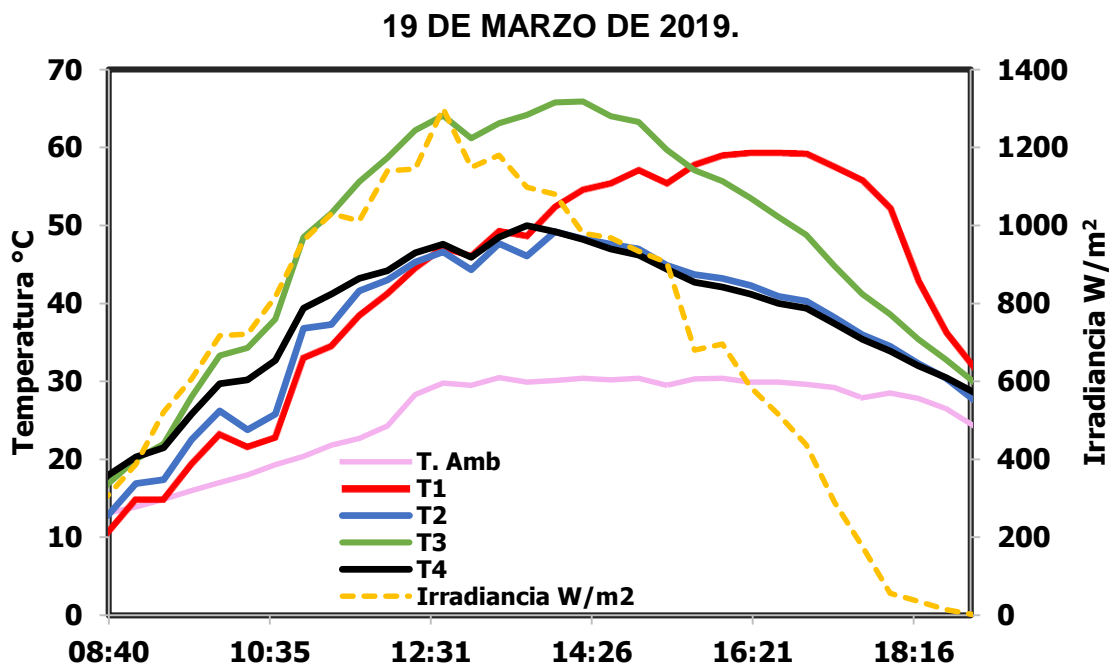


Figura 29. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (19/03).

Como se muestra en la Figura 29, en este día de medición las condiciones ambientales vuelven a ser favorables con respecto a la irradiancia y temperatura ambiental. Se observa que durante este día, T3 consigue un mejor desempeño en comparación a los días previos de medición, pues no sólo alcanza una temperatura superior a los 65°C, sino también logra mantener una temperatura alta por un mayor periodo de tiempo. Sin embargo, mientras la temperatura de T3 comienza a disminuir a partir de las 14:30 horas, la temperatura del reservorio de T1 comienza a incrementarse. A pesar de que la temperatura ambiental y del resto de los



prototipos comienza a disminuir, T1 logra mantenerse caliente hasta varias horas después.

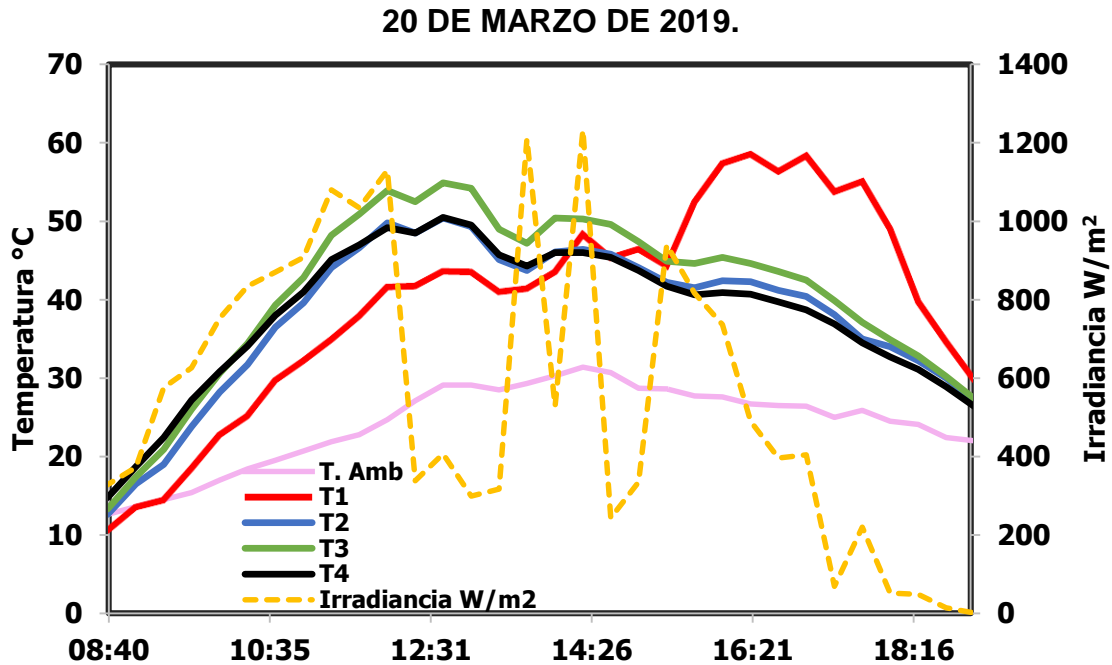


Figura 30. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (20/03).

Este día posee condiciones climáticas similares a las del 18 de marzo, pues las primeras horas de medición hay condiciones de irradiancia favorables, pero luego de las 12:00 horas comienza a haber presencia de nubosidades. El sistema se comportó de forma parecida al día 18 de marzo, sin embargo, T1 obtuvo un mejor desempeño esta vez, pues alcanzó valores mayores de 50°C (logrando calentarse hasta los 58.5°C), y a su vez, mantuvo estos valores de temperatura por un periodo de tiempo mayor.

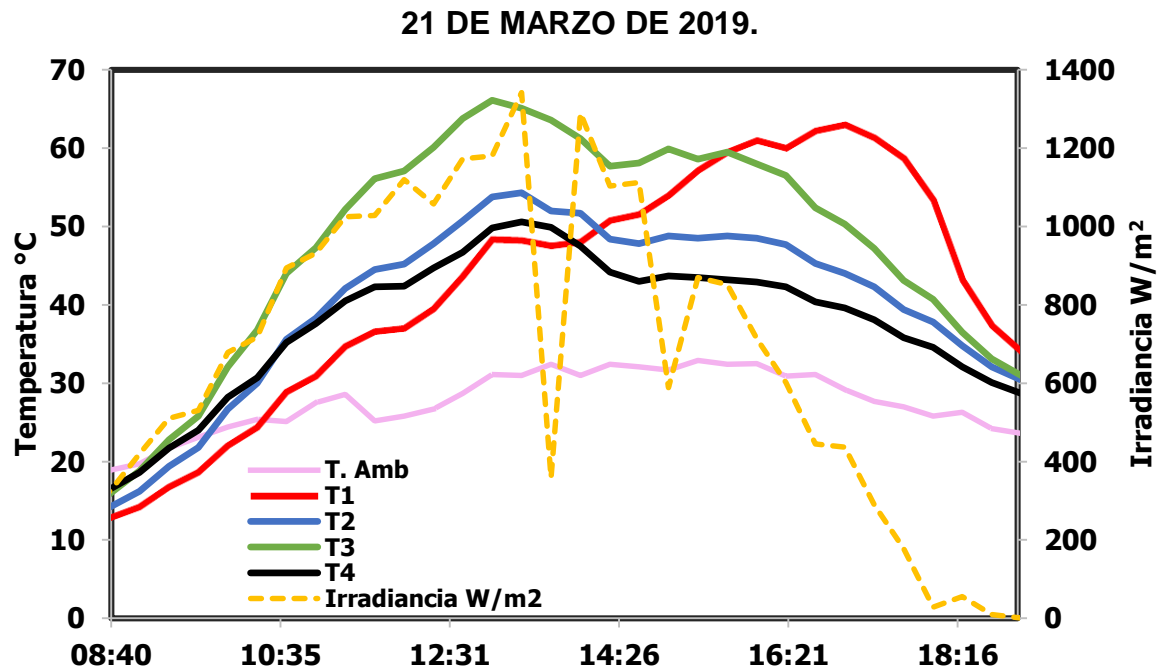


Figura 31. Comportamiento térmico del reservorio en los cuatro prototipos (21/03).

Por último, en la Figura 31 se aprecia la gráfica correspondiente al último día de medición. Durante este día hubo presencia de una gran masa de nubes aproximadamente al medio día solar, sin embargo, se muestra la misma tendencia de los días de medición anteriores.

En general, T3 es el primer dispositivo en alcanzar su punto máximo de temperatura en el reservorio, sin embargo, este valor comienza a disminuir conforme la temperatura ambiental disminuye. Por otro lado, a pesar de que la temperatura del reservorio de T1 alcanza su valor máximo horas después, dicho valor se mantiene alto, aun cuando la temperatura ambiental e, inclusive, la temperatura del resto de los reservorios comienzan a disminuir. Para un sistema de calefacción es importante también lograr altos valores de temperatura aún por la tarde, cuando el sol se ha ocultado, pues durante este periodo es cuando la temperatura disminuye más.

Por ende, las pruebas de comportamiento térmico al interior de los reservorios térmicos encontraron que el dispositivo con grava como MAT (T1) resultó ser el más conveniente para ser incorporado en sistemas de calefacción termo-solar. Esto debido a su gran capacidad de calentamiento, de hasta 65°C, además de su retardo en alcanzar la temperatura máxima en el reservorio y por su capacidad de mantener el calor colectado al disminuir la temperatura ambiental.

Sin embargo, estas pruebas resultan más concluyentes mediante la realización del segundo análisis, el cual, consiste en conocer el comportamiento

térmico al interior de las pruebas. De esta forma, se puede comprobar la funcionalidad de los prototipos desarrollados para calentar un espacio.

#### 4.4.2. Comportamiento térmico al interior de las cámaras de prueba.

Las siguientes gráficas (Fig. 32 – 34) muestran la variación en la temperatura a través del día al interior de cada una de las cuatro cámaras conectadas a cada prototipo en relación a la temperatura ambiental y al porcentaje de humedad relativa ambiental. A pesar de que las pruebas al interior de las cámaras tuvieron una duración de ocho días, a continuación se muestran tres gráficas correspondientes a los días de prueba con resultados más satisfactorios, en cuanto a la presencia de un mayor incremento de temperatura al interior de las cámaras, con respecto a la temperatura ambiental. Las gráficas correspondientes al resto de los días de prueba pueden ser consultadas en el Anexo 2.

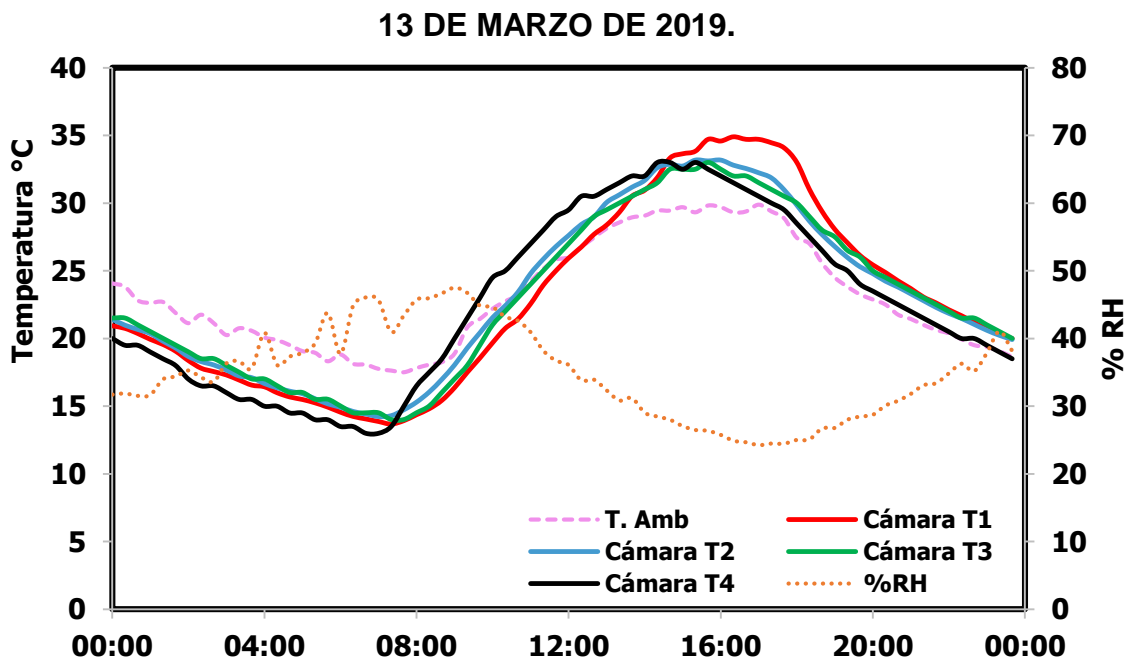


Figura 32. Comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras (13/03).

La primera gráfica resultante de esta prueba (Fig. 32) muestra claramente que los cuatro dispositivos logran mantener una temperatura superior a la temperatura ambiental, desde aproximadamente las 11:00 horas, hasta las 20:00 horas. Al igual que en las pruebas anteriormente realizadas, se observa como el prototipo T1 logra alcanzar la mayor temperatura en comparación con los otros tres prototipos, sin embargo, en este análisis se comprueba de mejor forma su

funcionalidad para calentar un espacio. Al finalizar este día aún se observa como los cuatro prototipos mantienen una temperatura 1°C mayor a la temperatura ambiental.

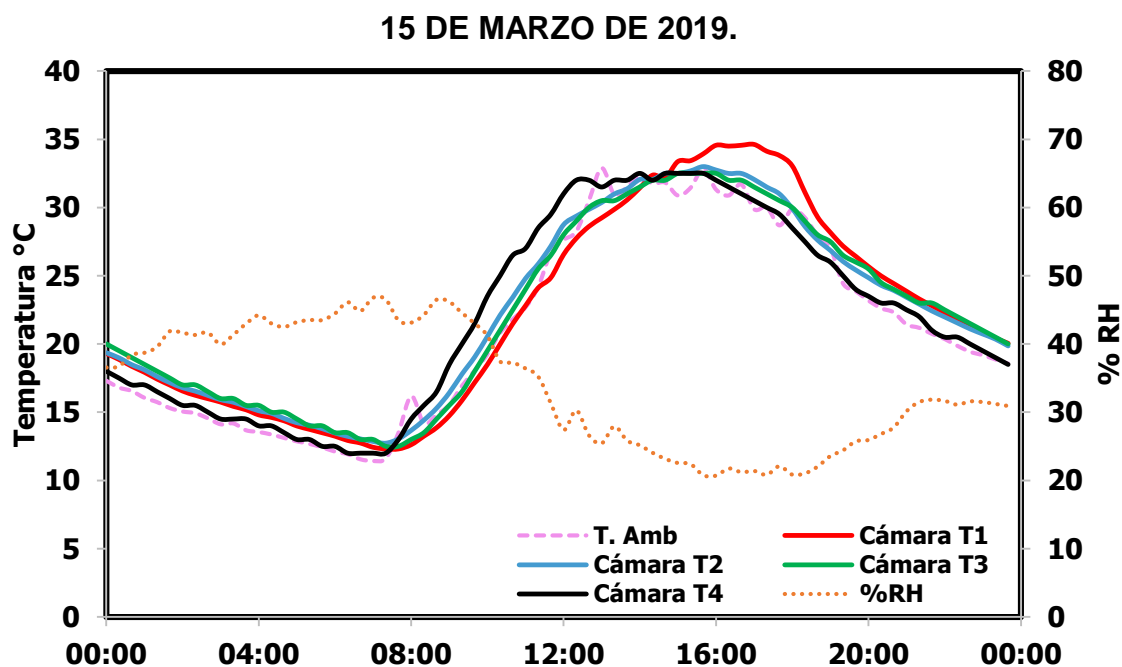


Figura 33. Comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras (15/03).

El día 15 de marzo, correspondiente al tercer día de prueba al interior de las cámaras, se observa una tendencia similar a la de la gráfica anterior (Fig. 32). Nuevamente el prototipo T1 consigue elevar la temperatura al interior de su cámara por encima de la cámara de los demás prototipos. Al comparar la temperatura máxima alcanzada por T1 con la temperatura ambiental, se obtiene una diferencia de 5°C, es decir, el prototipo T1 logró incrementar 5°C la temperatura al interior de las cámaras de prueba. Desde las 14:00 horas hasta las 18:00 horas, se observa una diferencia de más de 3°C entre T1 y la temperatura ambiental. En cuanto al resto de los prototipos, no se aprecia en general un incremento de temperatura significativo en comparación a la temperatura ambiental. Sin embargo, al finalizar el día, todos los dispositivos mantienen una temperatura 1.5°C mayor que la temperatura ambiental.

19 DE MARZO DE 2019.

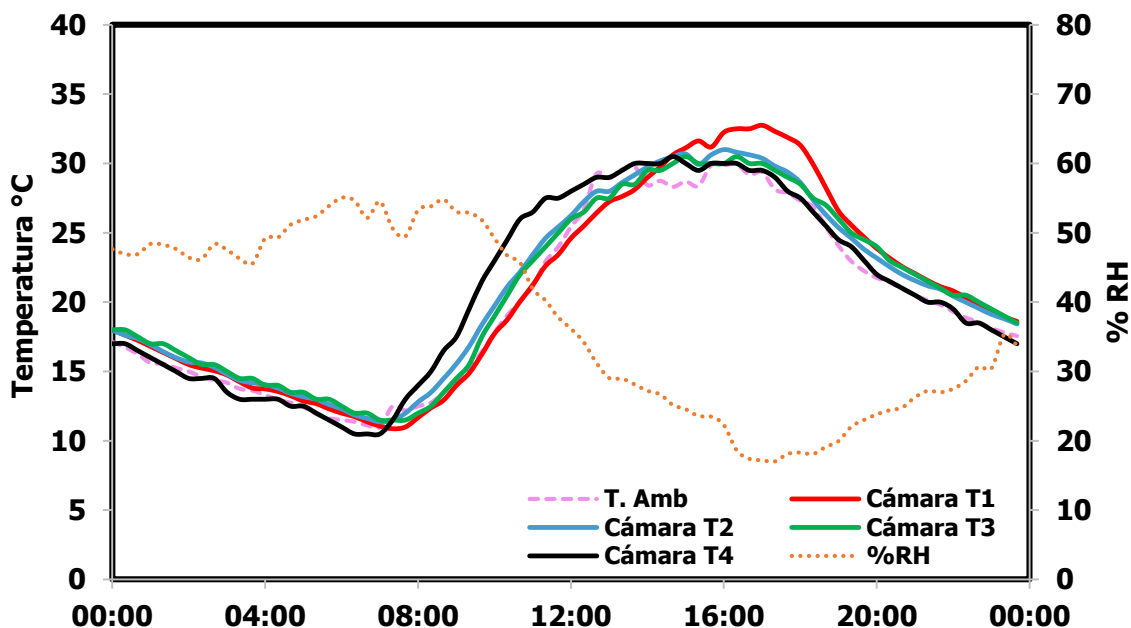


Figura 34. Comportamiento térmico al interior de las cuatro cámaras (19/03).

La última gráfica (Fig. 34) muestra nuevamente que T1 es el prototipo con el mejor desempeño para calefacción de espacios, pues desde las 14:00 horas hasta las 18:20 horas consigue incrementar la temperatura al interior de su cámara hasta 4°C (a las 17:40). En cuanto al resto de dispositivos, el incremento de su temperatura en comparación a la temperatura ambiental no es significativo, sin embargo, al finalizar el día de prueba, todas las cámaras (a excepción de la cámara perteneciente a T4), mantienen una temperatura aproximadamente 1°C mayor que la temperatura ambiental. Como se muestra en las curvas de las gráficas anteriores, en la mayor parte de los días de medición se aprecia un retardo en la onda térmica, pues gracias al reservorio térmico, el calor es liberado de forma paulatina. Por lo tanto, al alcanzar el valor más alto de temperatura ambiental, transcurrirá cierto tiempo antes de lograr el valor más alto de temperatura dentro de las cámaras. Dicho efecto es muy conveniente para calefacción, pues este retraso es requerido en las horas en que la temperatura comienza a disminuir.

En general, la ganancia de calor al interior de las cámaras no es tan alta al ser comparada con dicha ganancia en los reservorios térmicos. Es probable que lo anterior se deba a que no exista un buen aislamiento en las cámaras de prueba o, que el comportamiento de los reservorios no sea proporcional en cuanto a su emisividad en el infrarrojo hacia el exterior. A pesar de ello, el valor de temperatura en las cámaras se mantiene ligeramente mayor a la temperatura ambiental. A su vez, este resultado muestra consistencia con el resultado de las pruebas de

desempeño térmico de los reservorios, pues el posicionamiento de cada prototipo es consistente; T1 logra el mejor desempeño, seguido por T3, T2 y T4 en último lugar.

#### 4.4.3. Análisis Termográfico.

El siguiente conjunto de Figuras (Fig. 35-38), muestra imágenes termográficas del comportamiento térmico del sistema tomadas en ángulo frontal e isométrico y a diferentes horas del día 14 de marzo de 2019 (día mayormente soleado). En el Anexo 3 se encuentran las imágenes termográficas pertenecientes al resto de los días de medición.

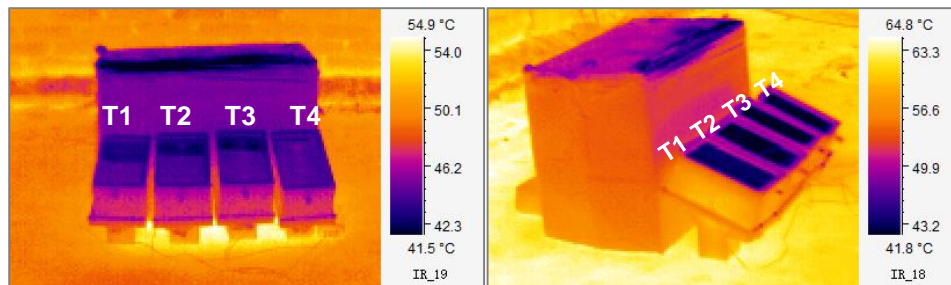


Figura 35. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 7:00 horas.

Las primeras imágenes termográficas (Fig. 35) muestran desde un ángulo frontal y de perfil el comportamiento térmico del sistema a las 7:00 am, la cual fue la hora aproximada de salida del sol y, por ende, la hora de inicio de la medición. En este par de imágenes se señala también la ubicación de cada prototipo. Se observa que la placa de absorción de luz solar se encuentra a una temperatura menor que el resto del sistema, pues ésta ha pasado toda la noche sin radiación solar. A su vez, en la foto de perfil se observa un reservorio con una temperatura similar a la del ambiente que rodea al sistema.

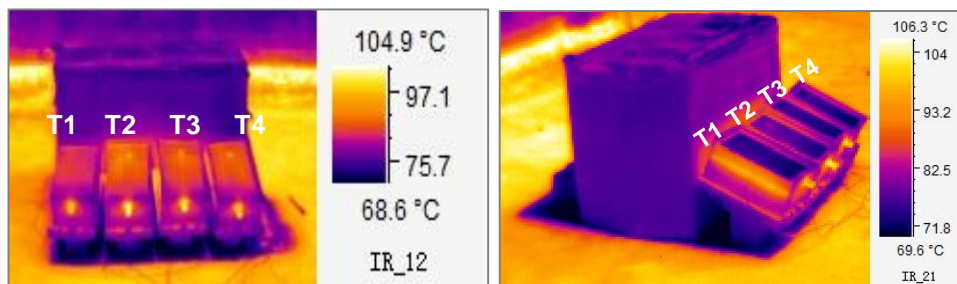
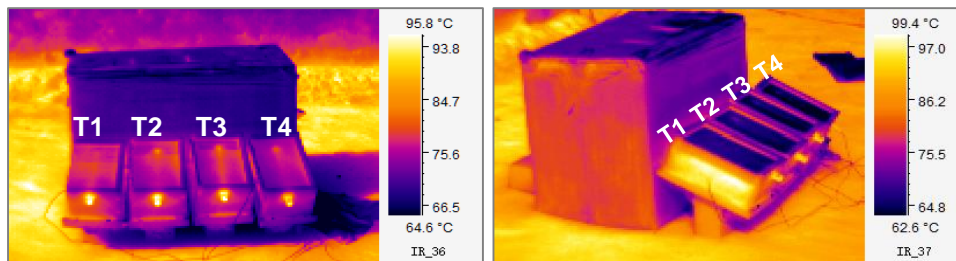


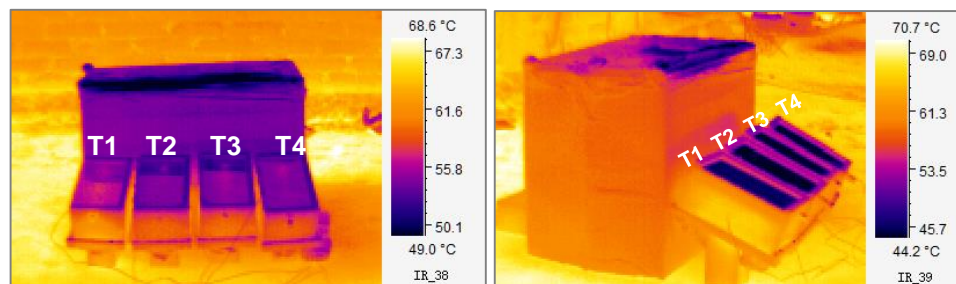
Figura 36. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 13:00 horas.

Las segundas dos imágenes (Fig. 36) fueron tomadas a las 13:00 horas (aproximadamente el medio día solar) y muestran en ambos ángulos el calentamiento principalmente de la placa negra, debido a que a esa hora la irradiancia alcanza su punto máximo. También se observa un calentamiento importante del tubo de cobre, debido a la gran conductividad del material. En la imagen de la izquierda, se observa que T1 posee la placa con la menor temperatura, es decir, aproximadamente 85°C contra 90°C de las otras placas. Lo anterior coincide con los resultados mostrados en las dos pruebas anteriores, pues al medio día solar, T1 presenta la menor temperatura del reservorio en comparación con los demás prototipos (Véase, Figuras 23 – 31).



**Figura 37. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 16:00 horas.**

El tercer par de imágenes (Fig. 37) fueron tomadas a las 16:00 horas; aquí se puede observar ahora el calentamiento del reservorio térmico de T1. De igual modo que en las gráficas anteriores, T1 alcanza la temperatura máxima de su reservorio aproximadamente a las 17:00 horas, logrando valores de temperatura superiores a los 60°C lo cual se muestra en estas dos imágenes. En la imagen de la derecha, se aprecia como al interior de T1 se logra alcanzar temperaturas superiores a los 80°C.



**Figura 38. Imágenes termográficas del sistema (frente y perfil), día 14 de marzo de 2019, a las 19:00 horas.**

Por último, el par de imágenes tomadas a las 19:00 horas (Fig. 38) muestran un sistema con una temperatura ya menor, casi similar a la temperatura de los alrededores. Sin embargo, la temperatura del reservorio térmico y de la placa, pertenecientes a T1 continúa siendo ligeramente más elevada que la temperatura del resto del sistema, pues según la imagen termográfica de la derecha, T1 posee aún temperaturas superiores a los 60°C en su interior. Con ello, los resultados obtenidos de las imágenes termográficas muestran consistencias con los obtenidos en la prueba del desempeño térmico de los reservorios y al interior de las cámaras.

#### 4.5. Resultados del Análisis de varianza.

Los resultados de análisis de varianza del experimento se muestran a continuación en la Tabla 7:

**Tabla 7. Resultados de análisis de varianza**

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor P</b>
Variación entre los tratamientos	525.79	3	175.26	8.70	6.7X10 <sup>-4</sup>
Error (dentro de los tratamientos)	402.81	20	20.14		
<b>Total</b>	<b>928.60</b>	<b>23</b>			

Estos valores se derivan de la temperatura máxima obtenida de acuerdo a los distintos niveles de concentración de MAT 1; dichos valores de temperatura máxima pueden ser consultados en el Anexo 4. En este caso  $p=P(F_{3,20} \geq 8.70) = 6.7 \times 10^{-4}$ , por lo es concluyente que la hipótesis nula se rechaza, pues si P es cercano a 0, la hipótesis nula es refutada (Montgomery, 2002). Por lo tanto, se infiere que en la medida que hay mayor presencia de MAT 1, la capacidad de incremento de temperatura del reservorio térmico es mayor.

#### 4.6. Resultados del Análisis termodinámico de eficiencia energética.

Como se mencionó en el capítulo 3, para el cálculo de la eficiencia energética se utilizó la ecuación de rendimiento térmico donde se obtiene el cociente del calor útil y la radiación total del colector del dispositivo (Véase ecuación 18). La siguiente tabla (Tabla 8) muestra los datos tomados en cuenta para el cálculo del rendimiento térmico. Dichos datos fueron obtenidos mediante la ponderación de las propiedades



individuales de los MAT que componen cada uno de los cuatro prototipos; a su vez, estos datos pueden ser consultados en las Tablas 2, 3 y 6 del presente trabajo.

Para el cálculo de la irradiancia total fueron sumados todos los valores medidos de irradiancia durante el periodo de tiempo transcurrido para elevar la temperatura de inicio ( $T_i$ ) a la temperatura máxima alcanzada por los prototipos ( $T_f$ ). Este valor fue multiplicado por 1200, que corresponde al intervalo de segundos entre cada valor de irradiancia registrado, pues la irradiancia fue medida cada 20 minutos en las pruebas de desempeño térmico. El calor útil es el resultado del producto del calor específico y la masa por la diferencia de la temperatura final e inicial.

**Tabla 8. Datos utilizados para el cálculo de la eficiencia. Fuente: Cálculos propios.**

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>Masa (kg)</b>	1.58	0.51	0.91	0.79
<b><math>C_P</math> (J/kg K)</b>	788	885	849	824
<b><math>mC_P</math></b>	1245.04	454.89	779.38	652.60
<b>área (<math>m^2</math>)</b>	0.024			
<b>Irradiancia total</b>	24496800			
<b>(<math>T_f - T_i</math>)</b>	55.5	37.6	40.8	32.4
<b>Calor útil (J)</b>	<b>69099.72</b>	<b>17103.86</b>	<b>31798.78</b>	<b>21144.49</b>

Al dividir el calor útil entre la irradiancia total del colector, es decir, el producto entre el área del colector y la irradiancia total, se obtuvieron los valores de eficiencia mostrados en la Tabla 9. En el Anexo 5 se muestra la tabla de Excel con la cual llevó a cabo el cálculo de la eficiencia térmica.

**Tabla 9. Eficiencia energética de los cuatro dispositivos. Fuente: Cálculos propios.**

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	<b>11.75</b>	<b>3</b>	<b>5.4</b>	<b>3.59</b>

Los valores en la Tabla 9, muestran como el prototipo T1 fue el que consiguió el mayor valor de eficiencia energética, obteniendo un valor de casi el 12%. El segundo prototipo con mayor eficiencia fue T3, seguido por T4. Por último, el prototipo menos eficiente fue T2, con una eficiencia de sólo el 3%. Este resultado es consistente con las pruebas realizadas con anterioridad, pues T1 y T3 han poseído el mejor desempeño, sin embargo, a pesar de que T2 posee la eficiencia más baja, en las pruebas térmicas posee un mejor desempeño que T4.

#### 4.7. Estimación del costo por prototipo.

Se recopilaron todos los costos por material utilizado en la construcción de los prototipos; en el Anexo 6, se puede consultar la tabla correspondiente a los precios por cada material. Dichos precios son correspondientes a ferreterías y madererías de la ciudad de Morelia en el mes de junio de 2018. Al dividir el costo total por material entre la cantidad utilizada para cada prototipo construido, se obtiene el costo final de cada prototipo, tal como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10. Costo final de los cuatro prototipos construidos.**

<b>PROTOTIPO</b>	<b>COSTO</b>
T1	\$205.38
T2	\$209.66
T3	\$209.55
T4	\$208.48

Los cuatro prototipos, construidos a pequeña escala, poseen casi el mismo costo, el cual es aproximadamente poco más de \$200.00 pesos mexicanos (MXN). Dicho costo no representa un gasto fuerte pues la mayoría de materiales poseen un costo asequible, y a su vez, la cantidad de material utilizado por prototipo es baja.

#### 4.8. Prospectiva económica-ambiental.

De acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018 (ENCEVI 2018), en México, el 6.3% de las viviendas cuentan con dispositivos de calefacción; la mayoría de estos equipos (46.3%) son calefactores eléctricos (INEGI, SENER y CONUEE, 2018, p.31). Con ello, según la ENCEVI 2018, la cifra total de equipos de calefacción eléctrica contabilizados en el sector residencial mexicano es de 1.2 millones de aparatos (*Íbid*).

Esta prospectiva económica parte del supuesto de la sustitución de este mismo número de calefactores eléctricos convencionales por calefactores alternativos que funcionen a base de energía solar térmica, al igual que el prototipo desarrollado en el presente trabajo. A su vez, estos calefactores pasivos poseerían un comportamiento pasivo, es decir, no utilizarían insumos adicionales a la radiación solar y al almacenamiento térmico mediante materiales de bajo costo y bajo impacto ambiental.

Algunos de los equipos de calefacción eléctrica más comunes son los de convección forzada, los cuales utilizan, en su mayoría, resistencias de cerámica (Profeco, 2012). A su vez, es común que este tipo de sistemas sean del tipo 'torre', es decir, poseen formas similares a un cilindro con una salida de aire rectangular (*Íbid*). Un ejemplo de este tipo de calefactores es el que se puede apreciar en la siguiente imagen (Fig. 39).



**Figura 39. Calefactor eléctrico de convección forzada, tipo 'torre', marca Lasko. Fuente: The Home Depot Mexico 2019.**

El calefactor eléctrico mostrado en la Figura 39 posee un valor en el mercado de aproximadamente \$1,339.00 pesos mexicanos (The Home Depot Mexico, 2019). Considerando el supuesto, que el valor en el mercado de un calefactor termo-solar sea menor en un 30% con respecto al costo de un calefactor eléctrico convencional, el costo del dispositivo de calefacción alternativo sería de \$937.30 pesos. Lo que implicaría un ahorro de \$401.70 pesos por la adquisición del dispositivo alternativo.

El consumo aproximado de energía del calefactor tipo torre 'Lasko' está dado por el producto de su potencia, la cual es de 1500 Watts y el tiempo de uso de éste. Suponiendo un uso total al mes de 120 horas (4 horas diarias), el consumo eléctrico mensual sería de 180 kWh, por lo tanto, al año se consumirían aproximadamente 2,160 kWh.

El costo de la energía eléctrica en México es variable, pues la tarifa depende de la temperatura promedio en verano e invierno de cada región. En esta prospectiva se tomará como referencia la tarifa 1 de CFE, que corresponde al servicio doméstico común; sin cargas consideradas de alto consumo. A su vez, dicha tarifa varía cada mes, por lo que se precisó calcular el costo energético del dispositivo convencional mensualmente. La tarifa 1 establece, a su vez, tres tarifas diferentes cada mes, dependiendo el nivel de consumo del usuario. El consumo básico establece el menor precio por los primeros 75 kWh consumidos, posteriormente al exceder esta cantidad, la tarifa intermedia de consumo establece un precio ligeramente mayor por los siguientes 65 kWh consumidos. Por último, si

se excede también esta cantidad, el precio será aún mayor por cada kWh consumido adicionalmente (CFE, 2019).

El consumo mensual del calefactor eléctrico Lasko es de 180kWh, esto quiere decir que el cobro por electricidad se hará de la siguiente manera: 75 kWh serán cobrados mediante la tarifa de consumo básico para cada mes, posteriormente, los siguientes 65 kWh serán cobrados por medio de la tarifa intermedia mensual, y los últimos 40 kWh excedentes serán cobrados mediante la tarifa de consumo excedente. Con ello se elaboró la Tabla 11, donde se muestra el precio del kWh de cada tarifa de consumo en los meses del 2019. De esta manera se calculó el cobro mensual de electricidad por el uso del calefactor eléctrico Lasko, y por último se sumaron estos valores, dando como resultado el total anual.

**Tabla 11. Costo anual de electricidad por el uso del calefactor eléctrico Lasko (2019).**

<b>MES</b>	<b>CONSUMO BÁSICO (\$/kWh)</b>	<b>CONSUMO INTERMEDIO (\$/kWh)</b>	<b>CONSUMO EXCEDENTE (\$/kWh)</b>	<b>COSTO AL MES (\$)</b>
<b>ENERO</b>	0.796	0.96	2.813	234.62
<b>FEBRERO</b>	0.799	0.964	2.824	235.545
<b>MARZO</b>	0.802	0.968	2.835	236.47
<b>ABRIL</b>	0.805	0.972	2.846	237.395
<b>MAYO</b>	0.808	0.976	2.857	238.32
<b>JUNIO</b>	0.811	0.98	2.868	239.245
<b>JULIO</b>	0.814	0.984	2.879	240.17
<b>AGOSTO</b>	0.817	0.988	2.89	241.095
<b>SEPTIEMBRE</b>	0.82	0.992	2.901	242.02
<b>OCTUBRE</b>	0.823	0.996	2.912	242.945
<b>NOVIEMBRE</b>	0.826	1	2.923	243.87
<b>DICIEMBRE</b>	0.829	1.004	2.934	244.795
	<b>TOTAL AL AÑO 2019</b>			<b>2876.49</b>

El dispositivo de calefacción termo-solar representaría sólo un gasto por adquisición, pues éste no requiere insumos externos de energía para su funcionamiento, ni un mantenimiento considerable. Por lo tanto, considerando el gasto total anual por electricidad mostrado en la Tabla 11 (producto del uso diario de un calefactor convencional durante 4 horas), la sustitución de un dispositivo como el calefactor Lasko por un calefactor termo-solar pasivo representaría un ahorro anual aproximado de \$2,876.49 pesos por el consumo de electricidad. Si a esta cifra

se le añade el ahorro por la adquisición de este dispositivo alternativo, se obtiene un ahorro total anual aproximado de \$3,278.19 pesos. Inclusive, si el calefactor alternativo tuviese el mismo costo que el convencional, por concepto de consumo de energía eléctrica este último generaría mayor gasto energético, y a su vez, económico.

Para calcular el Periodo Simple de Recuperación de la inversión (PSRI), se debe hacer el supuesto de la adquisición de un calefactor termo-solar por \$937.30 pesos, tal como se mencionó con anterioridad. Como la ecuación 19 indica, este costo debe ser dividido entre los ahorros anuales que representaría la implementación del sistema. En este caso, dichos ahorros son producto de la disminución en el gasto anual por electricidad.

$$PSRI = \frac{\text{Costo de implementación } (\$937.30)}{\text{Ahorros en los costos anuales } (\$2,876.49)} \quad (19)$$

El resultado obtenido es de 0.325 años, es decir, 3.9 meses. Este plazo representa la cantidad de tiempo necesaria para que una inversión, en este caso, la compra del dispositivo de calefacción alternativo, recupere su costo o inversión inicial. Por lo tanto, la compra de este dispositivo resulta bastante redituable, puesto que el periodo de recuperación de la inversión es corto debido a las ventajas que supone el uso de este dispositivo por el ahorro eléctrico.

En cuanto a la mitigación ambiental, al existir un ahorro en el consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes convencionales, existe una importante mitigación en la emisión de gases de efecto invernadero. El factor de emisión por la producción de energía eléctrica en México es de 0.527 kgCO<sub>2eq</sub> por kW consumido (CRE, 2019). Al multiplicar esta cantidad por el consumo energético anual de un dispositivo de calefacción eléctrica como el tipo torre de Lasko (2,160 kWh), se obtiene una emisión anual de **1138 kgCO<sub>2eq</sub>** por el uso de 4 horas diarias de dicho dispositivo. Por lo tanto, esta sería la cantidad de kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente que se mitigaría al año al sustituir un dispositivo de calefacción eléctrico convencional por un calefactor termo-solar pasivo. Esta cantidad representa una cifra alta al ser comparada con la emisión de otros dispositivos domésticos, como los focos ahorradores, pues el uso de 20 focos de 14W durante 8 horas al día genera una emisión anual aproximada de 425 kgCO<sub>2eq</sub><sup>12</sup>.

Tomando como referencia la cifra anterior de mitigación, al suponer que todos los hogares en México que cuentan con un dispositivo de calefacción eléctrico convencional (1.2 millones de hogares), sustituyeran sus equipos por dispositivos termo-solares alternativos, la mitigación total anual sería de aproximadamente **1.36x10<sup>9</sup> KgCO<sub>2eq</sub>**. Esta cifra representa un impacto positivo al medio ambiente,

<sup>12</sup> Información basada en cálculos propios.

pues se evitaría emitir una gran cantidad de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por lo tanto, la propuesta en esta prospectiva ambiental puede resultar beneficiosa como parte de una serie de estrategias para mitigar el cambio climático.

#### **4.9. Discusión.**

A grandes rasgos, el sistema de calefacción propuesto y los prototipos derivados de éste, basan su funcionamiento en el proceso natural de transferencia de calor de los materiales que los conforman. Existen ganancias de calor por conducción entre los materiales, convección a través de los cambios de temperatura del aire y sobre todo, mediante radiación proveniente del sol, que los materiales absorben y emiten en forma de ondas térmicas.

Como se explicó en el capítulo 2, un dispositivo de calefacción solar pasiva se basa en coleccionar, almacenar y transformar la energía solar en energía calorífica. El almacenamiento de energía en el dispositivo propuesto se da por calor sensible, es decir, por aumento y descenso de la temperatura del MAT (Zalba et. al, 2003). En los sistemas de almacenamiento por calor sensible, la fase del material energético que almacena calor no cambia durante la transferencia de calor. Esta energía almacenada es igual al cambio de energía interna que sufre el material al cambiar su temperatura (Zalba et. al, 2003; Haldorai et. al, 2019). A su vez, existen también materiales de almacenamiento térmico por calor latente, que por el contrario que el almacenamiento de calor sensible, dichos materiales cambian de fase, lo cual genera una mayor liberación de calor (Haldorai et. al, 2019).

En los últimos años se han desarrollado diferentes dispositivos de calefacción termo-solar con diferentes fines, gran parte de éstos poseen almacenamiento térmico integrado, lo que juega un rol importante, pues la radiación solar es intermitente y depende de las condiciones climáticas. Los sistemas de calefacción con un almacenamiento externo son menos eficientes, pues existe una pérdida de calor en el trayecto del colector al reservorio. Un sistema de calefacción con almacenamiento térmico integrado y un buen aislamiento supera este inconveniente y resulta más económicamente redituable. Un ejemplo de un calefactor con almacenamiento térmico por calor sensible integrado es el desarrollado por Saxena y Srivastava (2014), cuyo diseño sirvió como inspiración para el presente trabajo. Este dispositivo contiene arena del desierto y carbón granulado con una relación de 4:6 en su reservorio y utiliza convección forzada. Sus resultados mostraron un mejor desempeño en comparación con un calefactor sin reservorio.

Además del estudio anterior, existen otros autores como Krishnananth y Murugavel (2013) que han elaborado diseños con características similares al del

presente trabajo. Dichos autores concluyeron que el dispositivo desarrollado logra un mejor desempeño cuando el MAT se encuentra por debajo del colector y, a su vez, la eficiencia del sistema incrementa cuando el dispositivo posee reservorio térmico, logrando mantener una temperatura alta por mayor tiempo. Del mismo modo, la mayoría de los dispositivos de calefacción termo-solar desarrollados poseen una placa de cristal en la superficie, con el objetivo de generar un efecto invernadero, lo cual se encontró conveniente para acumular calor en las horas de irradiación solar y mantenerlo mediante el reservorio.

Los sistemas de calefacción termo-solar con almacenamiento de calor sensible mediante rocas, como el sistema propuesto, poseen diversas ventajas en comparación a otros sistemas termo-solares. Una de estas ventajas es que hay pocas limitantes en relación a la temperatura mínima o máxima de almacenamiento, pues algunos materiales pueden ser inflamables o cambian de fase indeseablemente. Como se mencionó en el capítulo 3, se decidió incorporar al sistema rocas como la piedra caliza y grava, basándose en el trabajo de El-Sebaï et. al (2007-A). Su calefactor a doble paso utilizó estas rocas en su reservorio, concluyendo que ambas poseen un buen desempeño en comparación a otras rocas.

Otras investigaciones han incorporado también rocas en su reservorio, por ejemplo, en Aboul-Enein et. al (2000), se utilizó granito en combinación con arena (la cual está integrada por fragmentos pequeños de roca) y agua. Por su parte, en Mohanraj y Chandrasekar (2008) se diseñó un deshidratador solar utilizando arena y residuos de aluminio en el reservorio térmico. En Singh et. al (2015) se construyó un calefactor con rocas, el cual logró obtener una eficiencia superior a los reservorios con materiales con cambio de fase, demostrando así que estos MAT pueden obtener mayor eficiencia a mayor cantidad de roca en su reservorio, pues dicho autor utilizó 8500 kg de rocas. Por último, en Choudhury et. al (1995) se estudió la optimización de parámetros operacionales de reservorios con rocas como MAT. Los parámetros tomados en cuenta fueron: área de sección transversal, tamaño del reservorio, tasa de flujo másico de aire y fracción de vacío.

En general, los calefactores que cuentan con almacenamiento térmico poseen eficiencias superiores y un mejor desempeño, pues éste juega un rol importante en lugares donde existe una variación importante entre la temperatura del día y la noche. A pesar de que los reservorios por calor latente poseen una eficiencia superior a los que cuentan con calor sensible, esta forma de almacenamiento posee diversas desventajas. La mayoría de los materiales de cambio de fase son difíciles de conseguir, existe el riesgo de sobre-calentamiento o sobre-enfriamiento y pueden ser corrosivos e inflamables si no se trabajan en condiciones adecuadas. Aunado a esto, poseen un precio alto en comparación al almacenamiento por calor sensible con rocas y no se han realizado suficientes estudios en relación a su impacto ambiental. Por ende, la utilización de rocas como

MAT puede poseer ventajas funcionales, económicas y ambientales, en comparación a otras formas de almacenamiento (Haldorai et. al, 2019, p.3-14).

Cabe resaltar que los casos citados hasta el momento, no dan respuesta en cuánto a describir cuáles son las propiedades que definen el comportamiento del sistema calefactor de aire; es decir, no se conocen las propiedades fisicoquímicas inherentes a los materiales utilizados. En esta propuesta, se tiene un aporte diferenciado con las referencias que contrastan el presente estudio, y que han servido de inspiración y diseño para el desarrollo de esta investigación, esto es: las propiedades ópticas de los materiales. Dichas propiedades, son indispensables de estudiar dado el comportamiento de absorción de los materiales que actúan como reservorio térmico.

Como se ha comentado, el espectro solar absorbe una amplia gama de longitudes de onda que van desde la parte ultravioleta, visible, hasta el infrarrojo cercano (300 a 2500nm). Dado que se cuenta con una placa absorbente, esta se encarga de penetrar radiación infrarroja hasta el reservorio de materiales rocosos. Sin embargo, hasta ahora, no se ha reportado la capacidad de absorción solar que poseen los materiales utilizados en estos reservorios térmicos para la calefacción de aire. Y aunque se han retomado experiencias innovadoras funcionales, el aporte de esta investigación también abona a la descripción de la capacidad de absorción de los materiales estudiados: piedra caliza, grava y hollín de combustión de biomasa forestal (Duffie et al., 2013, p. 181).

Para comprender el comportamiento térmico de los reservorios térmicos con diversos materiales estudiados, fue necesario realizar análisis mediante espectrofotometría uv-vis-nir. Este análisis fue realizado con el objetivo de conocer la cantidad de energía radiante reflejada por las cuatro composiciones diferentes de MAT al interior de los reservorios de los prototipos, pues con ello se puede conocer la cantidad de radiación absorbida por cada composición. Se midió la reflectividad total con espectro de longitud de onda de 300 nm a 2500 nm y con ello se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente gráfica (Fig. 40).



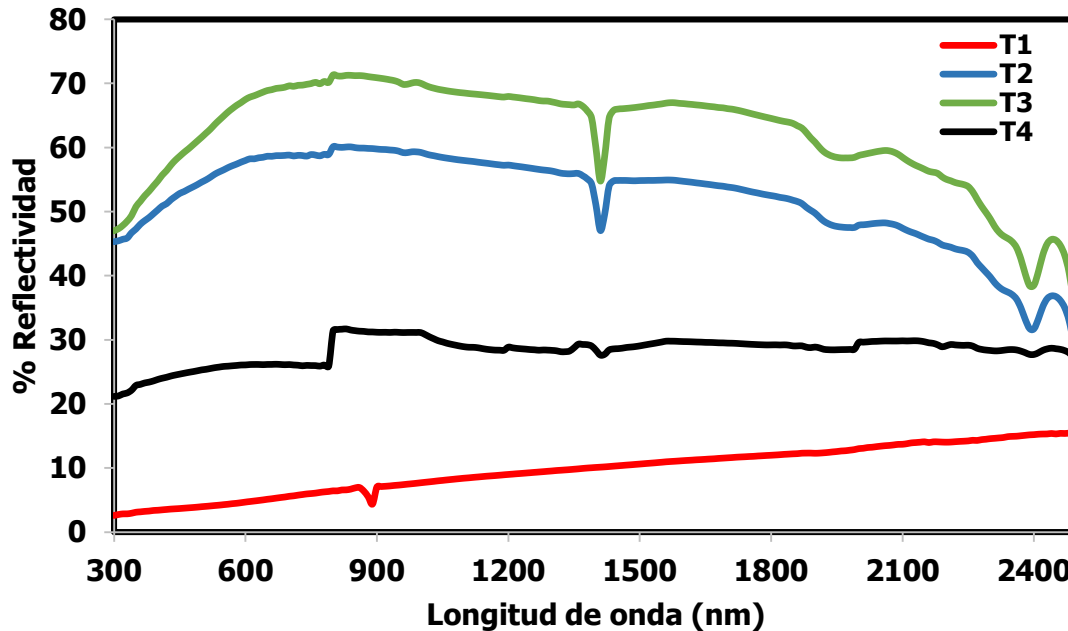


Figura 40. Análisis de reflectividad para cada composición en los reservorios.

Como se hizo mención en el capítulo 2 del presente trabajo, la suma de la radiación solar absorbida a cierta longitud de onda, la radiación reflectada y la transmitida serán siempre igual a la unidad por conservación de energía. Sin embargo, en superficies opacas, no habrá radiación transmitida, debido a la ley de Kirchhoff, por ende, esta relación se mostró con anterioridad en la ecuación 16 (Duffie et al., 2013, p. 181).

$$\rho + \alpha = 1 \quad (16)$$

Con ello, la absorptividad estará dada de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - \rho \quad (16')$$

Por lo tanto, a menor valor de reflectividad total, se obtiene una mayor absorptividad, y de esta forma, mejores características de absorción de energía solar.

Como se muestra en la Figura 40, el MAT perteneciente al prototipo T1 obtuvo el valor más bajo de reflectividad total, en el orden del 2.7% al 15.5%. Por lo tanto, este análisis comprueba satisfactoriamente que la combinación del reservorio de T1 posee un mejor comportamiento al ser introducido como almacenamiento por calor sensible en un dispositivo termo-solar. Esto se debe, por una parte, a la apariencia opaca de la grava que, en conjunto con el hollín de combustión (que es un material de alta absorción solar), obtiene mejores propiedades de absorción térmica en longitudes de onda larga, que son las que se transmiten con la placa metálica con mayor facilidad y alcance hasta el reservorio.

Algo novedoso en este trabajo recae en la incorporación del análisis de espectrofotometría para los materiales utilizados al interior de los reservorios. En la

literatura revisada, estas propiedades ópticas resultan relevantes sólo para el colector o las superficies de los calefactores desarrollados, además de que no se registró la realización de dicho análisis. Sin embargo, se observa que las propiedades ópticas definen, en gran medida, la capacidad de calentamiento de los materiales de almacenamiento térmico. De esta forma, es pertinente determinar la absorptividad solar ( $\alpha_s$ ) para dispositivos termo-solares, con la siguiente expresión (Ec. 25):

$$\alpha_s([0.3,2.5], \theta_i, T_s) = \frac{\int_{0.3}^{2.5} [\alpha_\lambda(\lambda, \theta_i, T_s)] G_b(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{2.5} G_b(\lambda) d\lambda} \quad (25)$$

Donde  $\alpha_s(\lambda, \theta_i, T_s)$  es la absorptividad espectral, calculada a partir de  $1-\rho_\lambda(\lambda)$ , siendo la reflectividad hemisférica espectral medida en el espectrofotómetro, y  $G_b(\lambda)$  es la irradiancia solar espectral. La absorptividad solar ( $\alpha_s$ ) se calculó de acuerdo con el procedimiento estándar UNE (2013), utilizando el espectro solar directo AM 1.5 de ASTM G173-03 (2012) entre 0.3 y 2.5  $\mu\text{m}$ . Con ello se obtuvo la siguiente tabla.

**Tabla 12. Absorptividad solar**

T1	T2	T3	T4
0.935	0.437	0.341	0.725

Como puede notarse en los resultados de espectrofotometría y en el cálculo de absorptividad solar, la alta capacidad de absorción de los materiales del dispositivo T1, son evidencia de su capacidad de generar mayores temperaturas que los otros dispositivos propuestos. Pero los diversos resultados, vinculados a los altos valores de absorción solar, están directamente relacionados con el incremento de temperatura, aunque no es una razón proporcional ni lineal. Esto se debe a que existe la emisividad, la cual es también una propiedad en el infrarrojo, por lo que no necesariamente al absorber mayor cantidad de radiación se generan altas temperaturas (Duffie et al., 2013, p. 181).

Cuanto más absorbe un cuerpo, es más susceptible a emitir en el infrarrojo, esto ocurre en el caso del hollín (López-Sosa et. al, 2018). Por lo que es probable que parte de la energía que se absorbe en diversas longitudes de onda del espectro solar, no siempre se transforme en energía térmica como calor útil y se disipe al medio circundante; dicho principio abriría una línea de investigación interesante. Esto puede explicar por qué en algunos casos no hay altos valores de temperatura, aun cuando los valores de absorción sean elevados, tal es el caso del dispositivo T4. Sólo en casos donde los valores de absorción están por arriba del 90%, se pueden apreciar valores elevados de temperatura debido a la capacidad termo-solar de los materiales, donde la emisividad no funciona tan desfavorablemente.

En el caso del hollín en combinación con la grava, se aprecia que cuando el hollín de biomasa forestal genera altos valores de emisividad, esta energía es reabsorbida por la grava y se genera mayor energía útil (Fig. 41). Al ser el hollín un material de partículas nanométricas, es decir, partículas cuyo tamaño es menor que 100 nanómetros (nm), las múltiples emisividades por cada partícula de hollín generan mayor transferencia de calor. Así, la combinación resulta bastante favorable y redirige la atención hacia la pregunta sobre ¿cuál deberá ser la concentración óptima entre grava y hollín que genere mayor calor útil para el calentamiento de aire? Y aunque la respuesta no es trivial, es una de las futuras investigaciones de las que este trabajo sienta las bases.

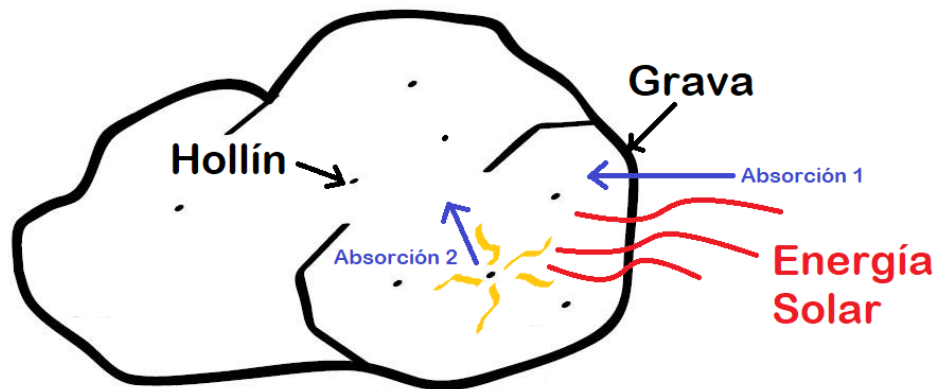


Figura 41. Descripción de la doble absorción de la grava.

Por otra parte, un reservorio térmico como el que poseen los cuatro prototipos construidos en el presente trabajo, lleva a cabo una transferencia de calor con el ambiente que lo rodea mediante un coeficiente de transferencia de calor  $h$ . Otros estudios sobre calefactores solares, como el realizado por Kareem et. al (2017), han llevado a cabo dicho análisis con el fin de conocer el flujo de energía solar en comparación con la temperatura que el dispositivo de calefacción transfiere, con ello se conoce qué tan rápido desprende calor dicho dispositivo.

En el caso del presente trabajo, se calculó el flujo total de calor que el reservorio térmico de los cuatro prototipos transfiere bajo el concepto de régimen transitorio. A su vez, el análisis de sistemas concentrados es aplicable, por lo que la temperatura del MAT permanece uniforme, de forma que únicamente cambia con el tiempo (Cengel, 2011, p. 226). Con ello, el flujo total de calor se calculó mediante la ecuación 20 (Kreith, 1970; Monroy, 1995).

$$q(0 \rightarrow t) = \rho V c_p (T_i - T_f) [J] \quad (20)$$

Donde  $q$  es el flujo total de calor, el cual está dado por el producto de la densidad del MAT  $\rho$ , el volumen del reservorio  $V$ , y el calor específico del MAT  $C_p$ ; a su vez, este producto es multiplicado por la diferencia de temperatura instantánea  $T_i - T_f$ , en este caso la temperatura inicial menos la temperatura final, pues a diferencia de cálculos anteriores, donde el objetivo era conocer la capacidad de calentamiento del dispositivo, con esta ecuación se desea conocer el calor que el MAT desprende de forma instantánea. Esta diferencia de temperaturas es negativa, pues la temperatura final será, por lo general, mayor en un dispositivo de calefacción; por ende, se tomó el valor absoluto de dicha resta. En el Anexo 7 se muestran de forma más detallada los valores para el cálculo del flujo total de calor.

Luego de calcular el flujo de calor para cada concentración de MAT, se obtuvo la siguiente gráfica (Fig. 42).

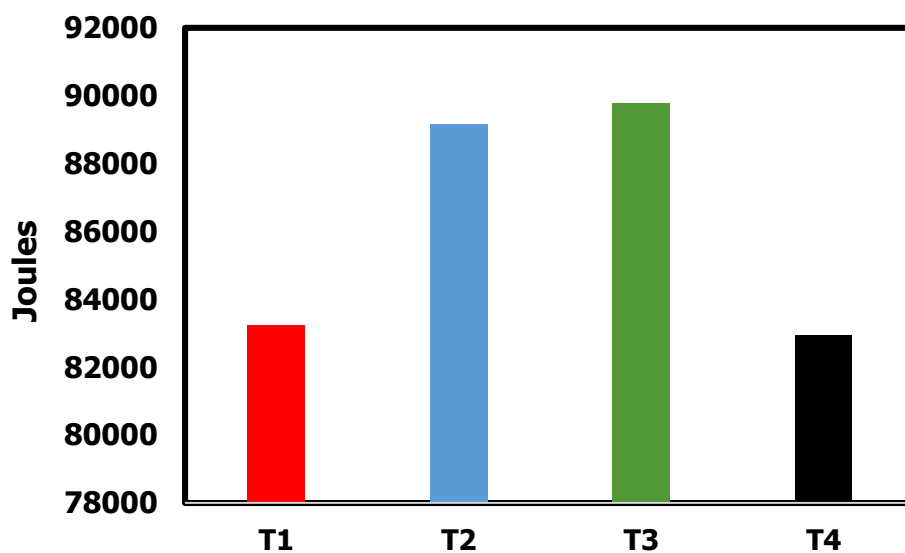


Figura 42. Análisis del flujo total de calor para cada composición en los reservorios.

Esta gráfica muestra como, al poseer un mayor valor de flujo de calor, los prototipos T2 y T3 liberan mayor cantidad de calor que los dispositivos T1 y T4 en el mismo lapso de tiempo. Al liberar rápidamente calor, T2 y T3 mantienen una temperatura alta por menos tiempo, lo que disminuye su capacidad de almacenamiento térmico. Por otra parte, el dispositivo T1 logró alcanzar su pico de temperatura, en promedio, dos horas después que el resto de los dispositivos, logrando mantener una temperatura superior a la ambiental por mayor tiempo en comparación al resto de los prototipos. Así mismo, T4 mostró estabilidad en su temperatura durante las pruebas de desempeño térmico, sin embargo, este último no alcanzó altas temperaturas en comparación con T1 y el resto de los prototipos. Si cuanto más grande es el valor de flujo de calor, mayores pérdidas se generan; otro factor importante que influye en esta pérdida es la emisividad, por lo tanto es probable que los prototipos T2 y T3 posean los mayores valores de emisividad.

Los resultados obtenidos de la simulación, caracterización térmica, análisis termográfico y de varianza, muestran concordancia con algunos resultados de los análisis de espectrofotometría y flujo de calor mostrados en esta discusión. El dispositivo que mostró un mejor desempeño en todas las pruebas fue T1, con un reservorio conformado por 95% grava y 5% hollín (MAT 1). Dicho resultado fue producto de un bajo coeficiente de flujo de calor y una alta absorptividad solar de sus materiales. T2 y T3, por su parte, mostraron el menor desempeño en el análisis de espectrofotometría, con lo cual se intuye que su absorptividad solar no es la mejor, a su vez, en el análisis de flujo de calor obtuvieron ambas también el menor desempeño. Sin embargo, en la prueba de caracterización térmica, T3 mostró un desempeño mucho mayor que T2, inclusive, T3 lograba alcanzar temperaturas casi tan altas como T1, salvo por su alta capacidad para liberar calor. La razón por la cual T3 obtuvo un mejor desempeño que T2 es aún incierta, sin embargo, el mal aislamiento de la cámara en las pruebas, pudo ser un factor importante.

La incorporación de hollín en un porcentaje del 10% dentro del reservorio de T4 pudo generar una variación en el resultado de las pruebas de desempeño térmico y los análisis de espectrofotometría y flujo de calor. El MAT de dicho dispositivo incrementó fuertemente su eficiencia y potencial para incorporarse a un calefactor en comparación con su contraparte, T3, al cual no le fue adicionado hollín en su reservorio. Con ello se comprueba el resultado en el estudio de López-Sosa et. al (2018), en el que se resalta la funcionalidad del hollín para la absorción y almacenamiento de energía solar en tecnologías termo-solares. A su vez, el diseño de experimento planteado evidenció que una proporción mayor de MAT 1 favorece el incremento de temperatura en el reservorio térmico.

Regresando a los objetivos del presente trabajo, de forma general se buscó desarrollar, caracterizar y evaluar el desempeño de un dispositivo alternativo de calentamiento de aire termo-solar, vislumbrado como estrategia ecotecnológica para satisfacer necesidades asociadas al confort térmico del sector residencial. Dicho objetivo se logró cumplir mediante los objetivos específicos, los cuales consistieron en analizar, dimensionar y diseñar por computadora el dispositivo propuesto. Posteriormente se construyeron cuatro prototipos y se caracterizaron mediante el análisis de desempeño térmico y la estimación de su eficiencia. Se estimó el costo final de cada dispositivo y se realizó una prospectiva ambiental para conocer las posibles ventajas de implementación de un dispositivo con características similares.

Con los resultados obtenidos es posible corroborar la hipótesis establecida en el presente trabajo, pues 'Un sistema de colección solar, vinculado a un reservorio térmico con materiales de bajo impacto ambiental, puede ser una estrategia ecotecnológica para generar calefacción', dadas las potenciales ventajas que puede conllevar su implementación.

Dicho esto, es prudente entonces dar respuesta a la pregunta de investigación establecida en el presente trabajo, la cual fue: '¿Cuáles son las potenciales ventajas ambientales, económicas, energéticas y funcionales de una propuesta ecotecnológica de generación de calefacción solar?'. Los cuatro prototipos construidos como propuesta de calefacción solar pasiva pueden poseer múltiples ventajas, resultado de la sencillez en su operación, su bajo costo de construcción/adquisición y operación, además de las ventajas ambientales que éste posee. Como se explicó en la prospectiva económica-ambiental, dichas ventajas serían producto de la implementación del sistema, pero no como prototipo, sino como un dispositivo a una mayor escala, que pueda responder a las necesidades de confort térmico del sector residencial mexicano.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Acorde a los objetivos, resultados y discusiones del presente trabajo se presentan las siguientes conclusiones:

- Se logró de forma satisfactoria, diseñar, construir y evaluar un prototipo de sistema de calefacción termo-solar innovador como estrategia ecotecnológica para la calefacción de aire en el sector residencial.
- El uso de materiales como la piedra caliza, grava y hollín son favorables para ser utilizados como materiales de almacenamiento térmico por calor sensible, dentro del reservorio térmico de un sistema de calefacción termo-solar.
- Se construyeron cuatro prototipos con diferentes composiciones de materiales de almacenamiento térmico al interior de sus reservorios, obteniendo resultados variables, los cuales, dependen de dicha composición.
- De la caracterización térmica, se logró identificar que el dispositivo cuya concentración del reservorio térmico es de 95% grava y 5% hollín, es decir 'T1', posee el mejor rendimiento térmico y el mejor desempeño general en comparación con los otros tres prototipos desarrollados.
- Mediante imágenes termográficas, fue posible identificar la distribución de calor a través de las horas con sol en el sistema y al interior del reservorio térmico.
- El análisis de varianza, derivado del diseño de experimento llegó a la conclusión de que en la medida que hay mayor presencia de MAT 1 (grava/hollín), la capacidad de incremento de temperatura del reservorio térmico es mayor.
- El mejor rendimiento térmico, asociado a los materiales del reservorio del dispositivo, se estudió para fundamentar la funcionalidad de los materiales. Lo anterior, a través del análisis de espectrofotometría y el análisis de flujo total de calor.
- Del análisis de espectrofotometría, fue posible comprobar que las características ópticas de los materiales dentro del reservorio del prototipo T1, son las más ventajosas para utilizarse en sistemas termo-solares, pues dicho MAT posee una menor reflectividad.

- Mediante el procedimiento estándar de UNE (2013), se obtuvieron los valores de absorptividad solar, donde T1 obtuvo el valor más alto de este parámetro, seguido por T4, T2 en tercer lugar, y por último T3. Este posicionamiento es consistente con los resultados del análisis de espectrofotometría.
- Del análisis de flujo de calor, se llegó a la conclusión de que los materiales con un alto valor de flujo total de calor  $q$ , transfieren una mayor cantidad de calor de forma instantánea en lugar de almacenarlo. Por lo tanto, los prototipos T1 y T4 poseen una característica ventajosa, pues su valor de  $q$ , es menor en comparación al resto de los prototipos.
- En general, la simulación, la caracterización térmica, el análisis de espectrofotometría, termografía y flujo de calor, muestran resultados consistentes en cuanto al prototipo con mejor desempeño, siendo éste T1. A su vez, gran parte de las pruebas realizadas (exceptuando la espectrofotometría y flujo de calor), muestran a T4 como el dispositivo con el menor desempeño. T2 y T3 mostraron un desempeño regular, pues en el análisis de espectrofotometría y flujo de calor obtuvieron el menor desempeño, no así en las pruebas de caracterización térmica.
- Mediante una prospectiva económica, fue posible conocer el ahorro económico anual por la adquisición y disminución del consumo energético de un dispositivo de calefacción termo-solar pasivo en comparación con un dispositivo de calefacción eléctrica convencional.
- Mediante una prospectiva ambiental, fue posible conocer la mitigación en la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente al año, derivada de la sustitución de todos los dispositivos de calefacción eléctrica convencional por calefactores termo-solares pasivos en el sector residencial mexicano.
- Con todos los resultados obtenidos se logró dar respuesta a la pregunta de investigación, pues se dieron a conocer las potenciales ventajas ambientales, económicas, energéticas y funcionales de esta propuesta, así como se logró corroborar la hipótesis establecida, afirmando que un sistema de colección solar, vinculado a un reservorio térmico con materiales de bajo impacto ambiental, puede ser una estrategia ecotecnológica para generar calefacción.
- En resumen, esta propuesta ecotecnológica es viable para su escalabilidad a nivel residencial considerando su capacidad para alcanzar altas



temperaturas, la capacidad de su reservorio térmico para almacenar calor, la simplicidad en su funcionamiento y su viabilidad económica y ambiental.

- El presente trabajo resulta de gran interés para conocer el proceso de desarrollo ecotecnológico. Como se observó en el desarrollo del sistema de calefacción termo-solar, el presente trabajo planteó en primer lugar el diseño y dimensionamiento, en segundo lugar, la construcción, caracterización y análisis y, en tercer lugar, una prospectiva de sus posibles ventajas.
- Por último, es necesario mencionar que el presente trabajo resulta novedoso en cuanto a la incorporación de análisis como el de espectrofotometría, lo cual contribuye a las líneas de investigación relacionadas a los sistemas alternativos de calefacción termo-solar.

## REFERENCIAS

- Aboul-Enein S., El-Sebaï A., Ramadan M., El-Gohary H. (2000). *Parametric study for a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications*. *Renew Energy*. Vol. 21 (3-4). 505-522.
- Arenas I., López J. L. (2004). *Espectrofotometría de absorción*. Curso de Métodos de Laboratorio. Instituto de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México. Cuernavaca, Morelos.
- ASHRAE (1985). *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. (SI edition)
- (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. 2017 ed.
- ASTM G173-03 (2012). *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Designation: G 173 – 03*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.
- ATPP (2008). *Tablas de Densidad y Peso específico. Aplicaciones Técnicas Procesos Productivos*. Barcelona, España. [Versión Electrónica]. Recuperado el 12 de mayo de 2018, de: <http://www.atpplleal.com/Pujat/file/DENSIDAD%20Y%20PESO%20ESPECIFICO.pdf>
- Auliciems A. (1981). *Towards a psycho-physiological model of thermal perception*. *International Journal of Biometeorology*. 25, 109-122.
- Auliciems A., Szokolay S.V. (1997). *Thermal comfort. Passive and Low Energy Architecture International Design tools and techniques*. PLEA: Passive and Low Energy Architecture International. Department of Architecture, The University of Queensland. Brisbane, 4072. Second revision (2007). 14-59.
- Banco Mundial (2017). *Acceso a la electricidad (% de población)*. [Versión electrónica]. Recuperado el 15 de diciembre de 2017, de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=MX>
- Bedford T. (1936). *Warmth factor in comfort at work*. A Physiological Study of Heating and Ventilation. Industrial Health Research Board Report. Medical Research Council 1936. No.76.
- Çengel Y. A., Ghajar A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. 4° ed. ISBN: 978-607-15-0540-8. 12-720.
- Çengel Y. A., Boles M. A. (2012). *TERMODINAMICA*. 7a ed. México: MCGRAW-HILL. 5-7.
- CFE (2019). *Consulta tu tarifa: Tarifa 1*. Comisión Federal de Electricidad. México. [Versión electrónica]. Recuperado el 4 de julio de 2019, de: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1.aspx>
- Chapman A. J. (1984). *Transmisión del calor*. 3ª, ed. Madrid: BELLISCO. ISBN 84-85198-42-5.
- Chefurka P. (2007). *World Energy and Population: Trends to 2100*. [Versión electrónica]. Recuperado el 15 de diciembre de 2017, de: <http://www.paulchefurka.ca/WEAP/WEAP.html>
- Choudhury S.C., Chauhan P.M., Garg H.P. (1995). *Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy*. *Sol Energy*. Vol. 55 (1). 29-37.
- CIME (s.f.). *Tablas de consumo eléctrico*. Soluciones integrales para generación y ahorro de energía. [Versión electrónica]. Oficinas Centrales: Mar Cantábrico No. 20, Col. Popotla. C.P.11400, México, D.F. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de: [http://cimepowersystems.com.mx/descargas/Tablas\\_Consumo-Electrico.pdf](http://cimepowersystems.com.mx/descargas/Tablas_Consumo-Electrico.pdf)
- CONUEE, SENER (2016). *Estudio de Caracterización del Uso de Aire Acondicionado en Vivienda de Interés Social*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Secretaría de Energía. México D. F.

- CRE (2019). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional*. Comisión Reguladora de Energía. Ciudad de México.
- De Buen O., Hernández F. (2015) *Logros de la eficiencia energética en las viviendas en México*. [Versión electrónica]. Recuperado el 15 de diciembre de 2017, de: <https://www.energiaadebate.com/logros-de-la-eficiencia-energetica-en-las-viviendas-en-mexico/>
- De Buen O., Hernández F., Navarrete J. (2016). *Análisis de la evolución del consumo eléctrico residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía. Cuadernos de la Conuee, núm. 1.
- de Dear R.J., Brager G., Cooper D. (1997). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. Final report. ASHRAE. RP-884. March.
- Díaz Y., Alvares-Guerra M. (2016). *Estado del arte de técnicas activas y pasivas de la climatización sustentable para edificaciones*. DOI: 10.13140/RG.2.1.5080.2327. 1-2.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Worek, W. M. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. (Vol. 3). New York: Wiley.
- Duque L. (2008). *Impacto ambiental de los refrigerantes ecológicos*. El Cuaderno - Escuela de Ciencias Estratégicas. Vol 2 N° 4 P. 213-222 (2008). Medellín, Colombia. ISSN: 2011-0170.
- El-Sebaili A.A., Ramadan M. R. I., Aboul-Enein S., El-Bialy E. (2007-A). *Thermal performance of a packed bed double-pass solar air heater*. Department of Physics, Faculty of Science, Tanta University, Tanta, Egypt. *Energy Conversion and Management*. 32 (2007). 1524–1535.
- (2007-B) *Year round performance of double pass solar air heater with packed bed*. Department of Physics, Faculty of Science, Tanta University, Tanta, Egypt. *Energy Conversion and Management*. 48(2007). 990-1003.
- Energía solar (2018). *Energía solar pasiva*. [Versión electrónica]. Recuperado el 10 de abril de 2019, de: <https://solar-energia.net/energia-solar-pasiva>
- EPA, Universidad de Cartagena (2015). *Diseño del Sistema Inteligente de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Distrito de Cartagena*. Convenio administrativo 0133-2015 entre el Establecimiento Público Ambiental de Cartagena – EPA y la Universidad de Cartagena. Colombia.
- Escoto A., Sánchez L., Pérez G. (2016). *Hogares y energía eléctrica en México*. *Revista Espinhaço*. 5(2). 30-40.
- Evans J.M., De Schiller S. (1994). *Diseño bioambiental y arquitectura solar*. Secretaría de Extensión Universitaria y Bienestar Estudiantil. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Fanger P. O. (1982). *Thermal comfort*. Kreiger, Florida. Original: Danish Technical Press. 1970.
- Franco A., Velázquez M. (2017). *La situación demográfica de México 2016: Una aproximación sociodemográfica al consumo de energía en los hogares Mexicanos, 2014*. Consejo Nacional de Población. México D. F. 159-181.
- Franco J. T. (2011). *En detalle: Muro Trombe*. ArchDaily México. [Versión electrónica]. Recuperado el 12 de abril de 2019, de: <https://www.archdaily.mx/mx/02-68622/en-detalle-muro-trombe> ISSN 0719-8914.
- GCEC (2014). *The new climate economy report 2014*. Global Commission on the Economy and Climate. [Versión electrónica]. Recuperado el 21 de marzo de 2019, de: <https://newclimateeconomy.report/2014/>
- Giraldo W., Herrera C. A. (2017). *Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial*. Ingeniería y Desarrollo, Vol. 35. n°1. Barranquilla, Colombia. ISSN 2145-9371.

- Haldorai S., Gurusamy S., Pradhapraj M. (2019). *A review on thermal energy storage systems in solar air heaters*. Int J Energy Res. DOI: 10.1002/er.4379. 1-17.
- Homify México (2018). *Tipos de sistemas de calefacción en México: ventajas y desventajas*. [Versión electrónica]. Recuperado el 7 de marzo de 2019, de: [https://www.homify.com.mx/libros\\_de\\_ideas/6162585/tipos-de-sistemas-de-calefaccion-en-mexico-ventajas-y-desventajas](https://www.homify.com.mx/libros_de_ideas/6162585/tipos-de-sistemas-de-calefaccion-en-mexico-ventajas-y-desventajas)
- Howell R.H. (2017). *Principles of heating, ventilating and air conditioning*. 8th ed. Based on the 2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta.
- INECC (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. Convenio INECC/A1-008/2014. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México.
- (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2015 (INEGyCEI)*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México.
- INEGI (2010). *Volumen y crecimiento: Población total según tamaño de localidad para cada entidad federativa, 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [Versión electrónica]. Recuperado el 17 de diciembre de 2017, de: [http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur\\_urb.aspx?tema=P](http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P).
- (2012). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2012*. México.
- (2014). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2014*. México.
- (2014). *Encuesta Nacional sobre Uso del Tiempo (ENUT) 2014*. México.
- INEGI, SENER, CONUEE (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares ENCEVI 2018*. Presentación de resultados. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Secretaría de Energía. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. México. 31.
- INE-UNAM (2010). *Guía de metodologías y medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero para la elaboración de programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- IPCC (2013). *Glosario en: Cambio Climático 2013. Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Kareem M.W., Habib K., Ruslan M. H., Saha B. B. (2017). *Thermal performance study of a multi-pass solar air heating collector system for drying of Roselle (Hibiscus sabdariffa)*. Renewable Energy, Vol. 113. 281-292.
- Kreith F. (1970). *Principios de transferencia de calor*. Herrero Hermanos Sucesores, S. A. México.
- Krishnananth S., Murugavel K. (2013). *Experimental study on double pass solar air heater with thermal energy storage*. J king Saud Univ-Eng Sci. Vol 25, Núm. 2. 135-140.
- Lira Cortés L., García Duarte S., Méndez Lángo E., González Durán E. (2010). *Conductividad Térmica de Materiales*. Simposio de Metrología 2010. Laboratorio de Propiedades Termofísicas, División de Termometría. Área Eléctrica, Centro Nacional de Metrología.
- López-Sosa L. B., Hernández-Ramírez L. M., González-Avilés M., Servín-Campuzano H., Zárate-Medina J. (2018). *DEVELOPMENT OF A LOW-COST SOLAR ABSORBER COATING BASED ON SOOT OF BIOMASS-FOREST: THERMAL CHARACTERIZATION AND APPLICATION IN A SOLAR COOKING SYSTEM*. Revista Mexicana de Ingeniería Química 17.2 (2018): 651-668.

- Masera O., Friedmann R., de Buen O. (1993). *Residential energy use in Mexico: Structure, evolution, environmental impacts, and savings potential*. United States: N. p., Web DOI: 10.2172/10176360. 3-11.
- Mercado M. V., Esteves A. (2006). *Muro solar pasivo en viviendas construidas con quincha*. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV), (INCIHUSA). Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CRICYT) (CONICET). Mendoza, Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, 2006. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Mercado M. V., Esteves A., Filippín C., Flores S. (2009). *Sistema de calefacción radiante solar pasivo. Diseño, construcción de un prototipo y obtención de resultados*. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 23, 53 -61, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0328-932X.
- Mohanraj M., Chandrasekar P. (2008). *Drying of copra in forced convection solar drier*. Biosyst Engineering. Vol. 99 (4). 604-607.
- Monrroy M. (1995). *Comportamiento térmico de cerramientos soleados: un modelo de simulación por diferencias finitas*. Tesis Doctoral. Universidad de la Palmas de Gran Canaria. 35-44.
- Montgomery, D. (2002). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley, Segunda Edición, México.
- Nicol J.F., Humphreys M.A. (2002). *Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings*. Oxford Centre for Sustainable Development, School of Architecture, Oxford Brookes University, Oxford.
- NOM-026-ENER-2015. *Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire. Límites, métodos de prueba y etiquetado*. Norma oficial Mexicana.
- O'Neill B., Chen B. (2002). *Demographic Determinants of Household Energy Use in the United States" in Population and Environment: Methods of Analysis*. A Supplement to Vol. 22 of Population and Development Review. Population Council, Nueva York, 53.
- Ortiz-Moreno J., Masera-Cerutti O., Fuentes-Gutiérrez A. (2014). *LA ECOTECNOLOGÍA EN MÉXICO*. Unidad de Ecotecnologías del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán.
- Pachuri S. (2004). *Energy Policy*, Vol. 32, 1732-1735.
- Profeco (2012). *Estudio de Calidad: Calefactores eléctricos de cuarto*. Procuraduría Federal del Consumidor. México.
- PROMÉXICO. (2015). *Energías Renovables*. Fideicomiso Público ProMéxico. Ciudad de México. 12.
- PROMÉXICO, GIZ, IER. (2017). *La industria fotovoltaica y fototérmica en México*. Fideicomiso Público ProMéxico. Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GmbH. Instituto de Energías Renovables. 1° ed. Ciudad de México. 2017. ISBN: 978-607-97294-8-6
- RAE ASALE (2018). *Termografía*. Real Academia de la Lengua Española. Diccionario de la lengua española. Ed. Tricentenario. [Versión electrónica]. Recuperada el 2 de mayo de 2019, de: <https://dle.rae.es/?id=ZZZRbR7>
- Ramírez-Granados J. C., Gómez-Luna B. E., Díaz-Pérez C., Gasca-Tirado J. R. (2017). *Análisis de la Absorbancia y Transmitancia Espectral del Mucílago de Salvia hispanica L. para la Fotoprotección de la Piel*. Revista de Ciencias de la Salud. 2017. 4-10: 13-22.
- Rebolledo H. (octubre-diciembre 2011). *Ahorro y uso eficiente de la energía: Alternativas para la reducción del consumo residencial en tarifas DAC*. Boletín IIE: Breves técnicas, 169-171.
- Rivasplata Cabanillas C. E. (2011). *Efectos térmicos de una pared colector-acumulador de energía solar, como sistema de acondicionamiento en la climatización habitacional*. Facultad de

- Ciencias. Centro de Energías Renovables. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT). Tacna, Perú.
- Rodríguez H. (2003). *Quincha architecture: The development of an antiseismic structural system in seventeenth century Lima*. Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20th-24th January 2003, ed. S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, ETSAM, A. E. Benvenuto, COAM, F. Dragados, 2003
- Ruano San José M. A. (2011). *Análisis térmico de la aplicación de materiales de cambio de fase en climatización*. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior - Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Área de Térmica. 27.
- Sánchez L. (2012) *HOGARES Y CONSUMO ENERGÉTICO EN MÉXICO*. Revista Digital Universitaria, Vol. 13, núm. 10. 2-5.
- Saxena A., Srivastava G. (2014). *Design and thermal performance evaluation of a novel solar air heater*. ELSERVIER, Renewable Energy 77(2015).
- SEMARNAT (2017). *¿Qué es el carbono negro?* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [Versión electrónica]. Recuperado el 1 de mayo de 2019, de: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-el-carbono-negro-134747>
- SENER (2011). Indicadores de eficiencia energética en México: 5 sectores, 5 retos. Secretaría de Energía. México. 92-97.
- (2015). *Prospectiva de Gas Natural y Gas LP 2015-2029*. Secretaría de Energía. México. Equivalencias caloríficas.162.
- (2018). *Balance Nacional de Energía 2017*. Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energéticas. México 2018. 11-121.
- Serway R., Jewett J. (2004). *Calor específico*. Física 1. México: Thomson. ISBN 970-686-339-7.
- Sheinbaum C. (1994). *Tendencias Y Perspectivas de la Energía Residencial en México: Análisis comparativo con las experiencias de conservación eficiencia de los países de la OCDE*. Tesis de Doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sheinbaum C., Rodríguez V., Robles G. (2009). *POLÍTICA MEXICANA E INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD*. Problemas del Desarrollo: Revista Latinoamericana de economía, Vol. 40, núm. 158, 113-135.
- Singh P.L., Deshpandey S.D., Jena P.C. (2015). *Thermal performance of packed bed heat storage system for solar air heaters*. Energy Sustain Dev. 2015. Vol. 29. 112-117.
- Suárez C. A. (2012). *Diagnóstico y control de material particulad: partículas suspendidas totales y fracción respirable*. PM10. Revista Luna Azul. No. 34. ISSN 1909-2474.
- The Home Depot Mexico (2019). *Tienda en línea: Calefactor cerámico de Torre*. [Versión electrónica]. Recuperado el 4 de julio de 2019, de: <http://www.homedepot.com.mx/ventilacion-y-calefaccion/calefactores/electricos/calefactor-ceramico-de-torre-126446>
- TuandCo (2014). *Elegir una caldera de gas para la calefacción*. [Versión electrónica]. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de: <https://www.tuandco.com/aprendeymejora/como-elegir-una-caldera-de-gas-para-la-calefaccion/>
- UNE (2013). *Solar thermal electric plants*. Terminology. UNE 206009, 2013.
- Vaquiro J. D. (2013). *Periodo de recuperación de la inversión*. Revista electrónica PYMES Futuro. [Versión electrónica]. Recuperado el 2 de mayo de 2019, de: [https://moodle2.unid.edu.mx/dts\\_cursos\\_md/pos/AN/PI/AM/10/Periodo.pdf](https://moodle2.unid.edu.mx/dts_cursos_md/pos/AN/PI/AM/10/Periodo.pdf)
- Xie C. (2010). *ENERGY 2D, Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone*. The Concord Consortium, Concord, MA 01742. [Versión Electrónica]. Recuperado el 12 de mayo de 2018, de: <http://energy.concord.org/energy2d/index.html>

Zalba B., Marin J. M., Cabeza L. F., Mehling H. (2003). *Review on thermal energy storage with phase change materials: heat transfer analysis and applications*. Applied thermal engineering. Elsevier, Vol. 23, 251-283.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Datos obtenidos en la simulación de ENERGY 2D.

Base de datos para la elaboración de la gráfica en la sección 4.2. (Comportamiento de la simulación en ENERGY 2D). Véase Figura 20.

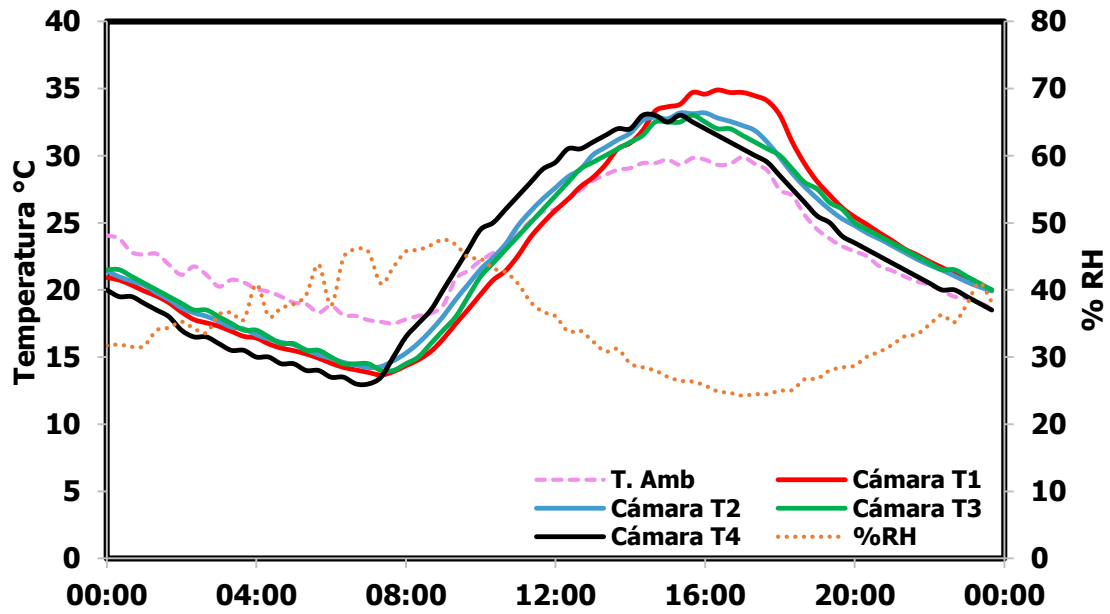
Tiempo (minutos)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
0	30.91	28.65	29.25	30.56
2	32.22	31.73	31.08	32.28
5	32.63	32.20	31.46	32.64
7	33.04	32.66	31.84	33.01
10	33.45	33.11	32.21	33.38
12	33.85	33.56	32.58	33.75
15	34.26	34.01	32.94	34.12
17	34.67	34.45	33.30	34.49
20	35.07	34.89	33.66	34.86
22	35.47	35.33	34.02	35.23
25	35.87	35.76	34.37	35.59
27	36.27	36.19	34.72	35.95
29	36.66	36.62	35.07	36.32
32	37.05	37.05	35.42	36.68
34	37.44	37.48	35.76	37.04
37	37.83	37.90	36.10	37.40
39	38.32	38.22	36.44	37.76
42	38.74	38.61	36.79	38.11
44	39.16	38.99	37.12	38.47
47	39.57	39.37	37.46	38.82
49	39.99	39.75	37.79	39.17

51	40.40	40.13	38.13	39.52
54	40.81	40.51	38.46	39.87
56	41.21	40.88	38.79	40.22
59	41.62	41.25	39.12	40.56
61	42.02	41.62	39.44	40.91
64	42.42	41.99	39.77	41.25
66	42.82	42.36	40.09	41.59
69	43.22	42.73	40.41	41.93
71	43.61	43.09	40.73	42.27
74	44.01	43.45	41.05	42.61
76	44.40	43.81	41.37	42.94
78	44.79	44.17	41.69	43.28
81	45.18	44.53	42.00	43.61
83	45.56	44.88	42.31	43.94
86	45.95	45.23	42.62	44.27
88	46.33	45.59	42.93	44.60
91	46.71	45.93	43.24	44.93
93	47.09	46.28	43.54	45.26
96	47.46	46.63	43.85	45.58
98	47.84	46.97	44.15	45.90
100	48.21	47.31	44.45	46.23
103	48.58	47.65	44.76	46.55
105	48.95	47.99	45.05	46.86
108	49.32	48.33	45.35	47.18
110	49.68	48.67	45.65	47.50
113	50.04	49.00	45.94	47.81
115	50.40	49.33	46.24	48.13
118	50.76	49.66	46.53	48.44
120	51.12	49.99	46.81	48.74
123	51.47	50.31	47.10	49.05
125	51.83	50.64	47.39	49.36
127	52.18	50.96	47.68	49.67
130	52.53	51.28	47.96	49.97

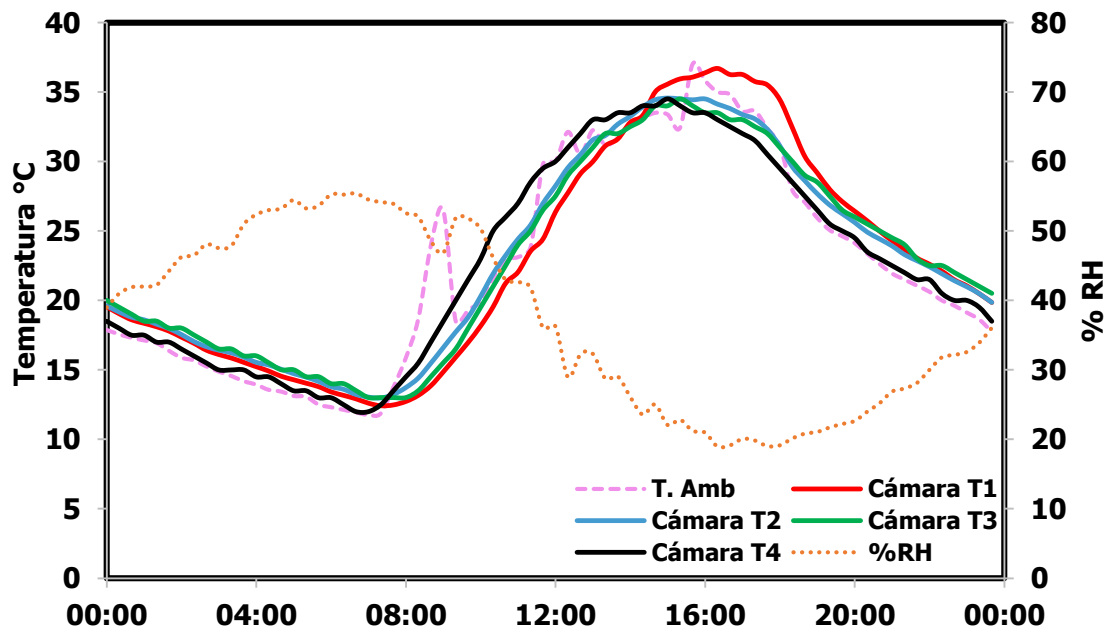


## ANEXO 2. Comportamiento térmico al interior de las cámaras de prueba.

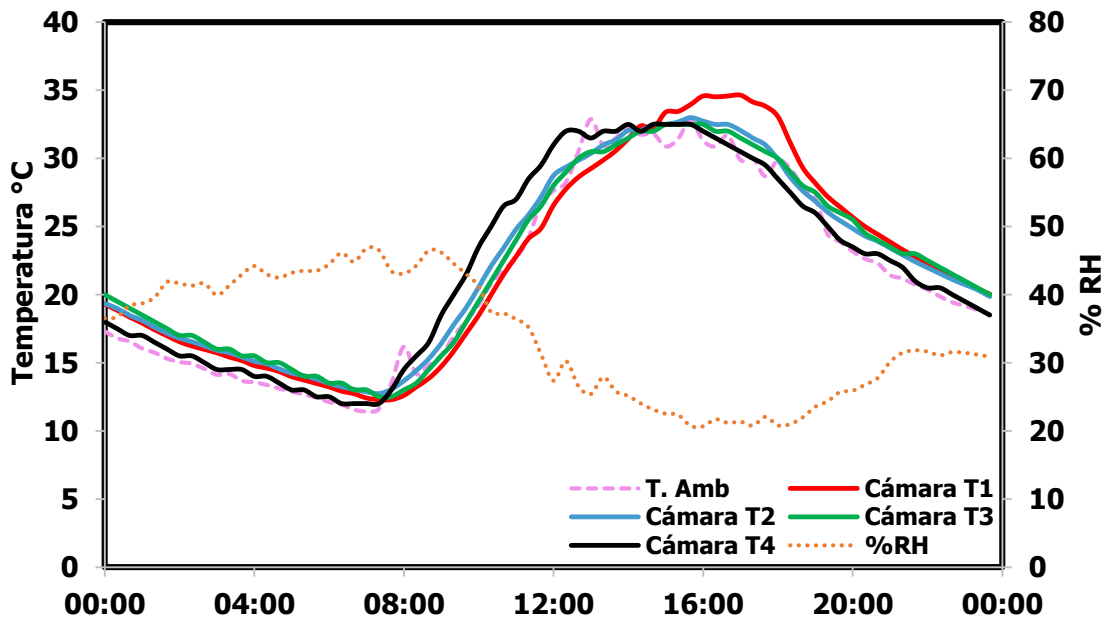
MIÉRCOLES 13 DE MARZO DE 2019.



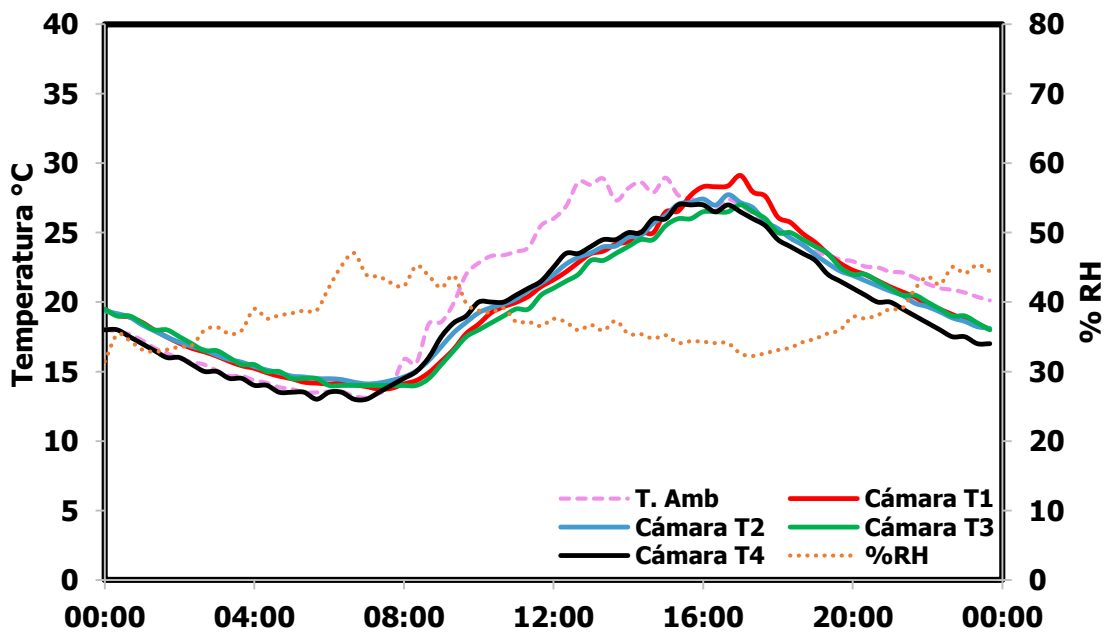
JUEVES 14 DE MARZO DE 2019.



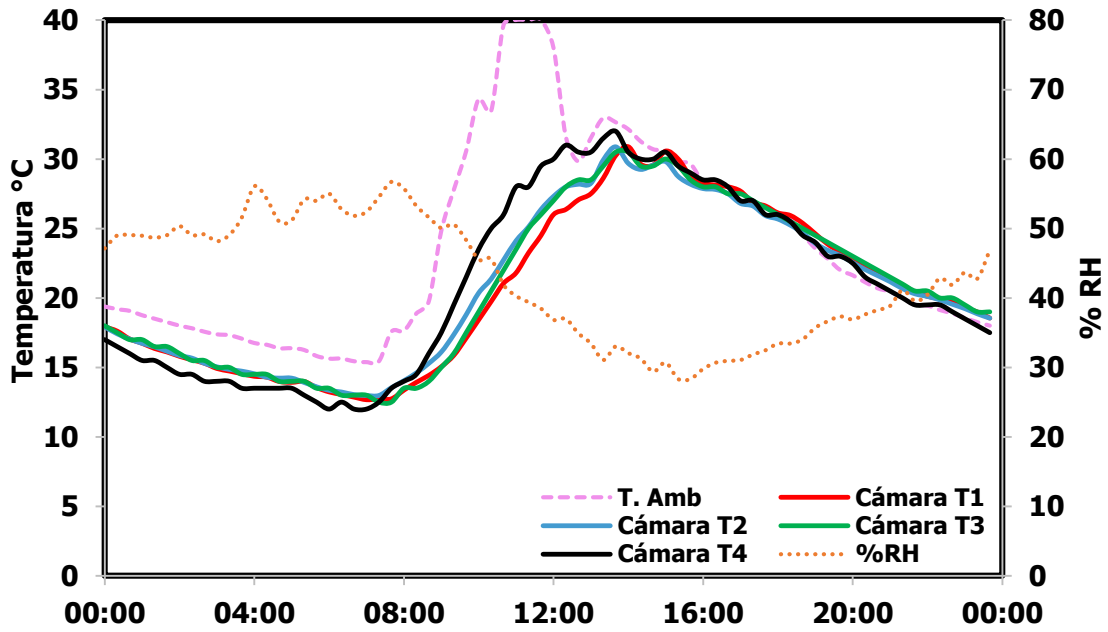
VIERNES 15 DE MARZO DE 2019.



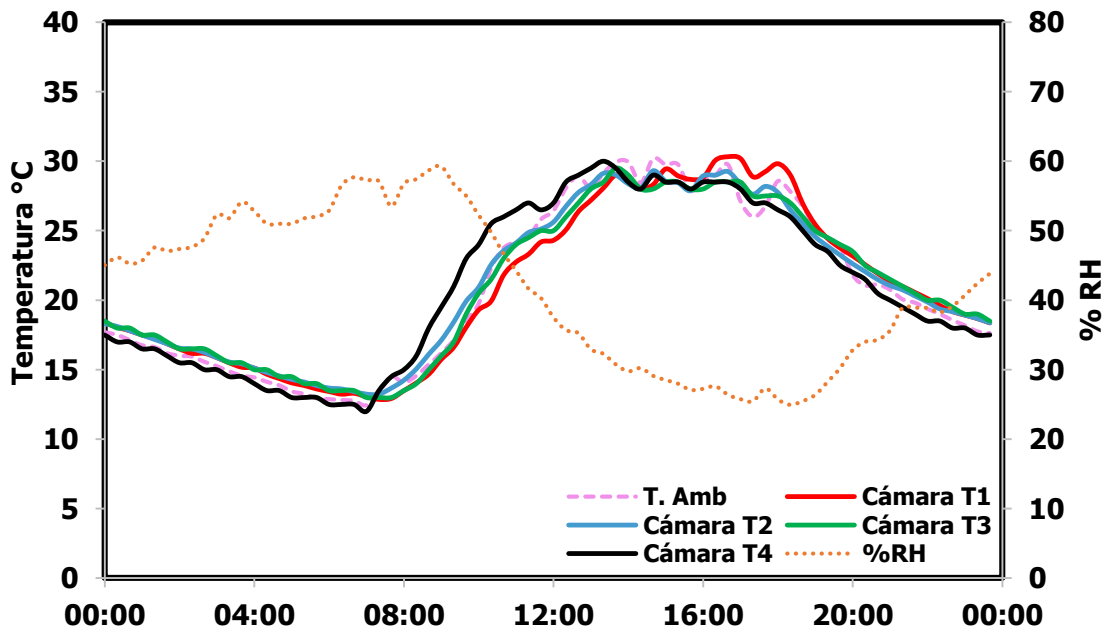
SÁBADO 16 DE MARZO DE 2019.



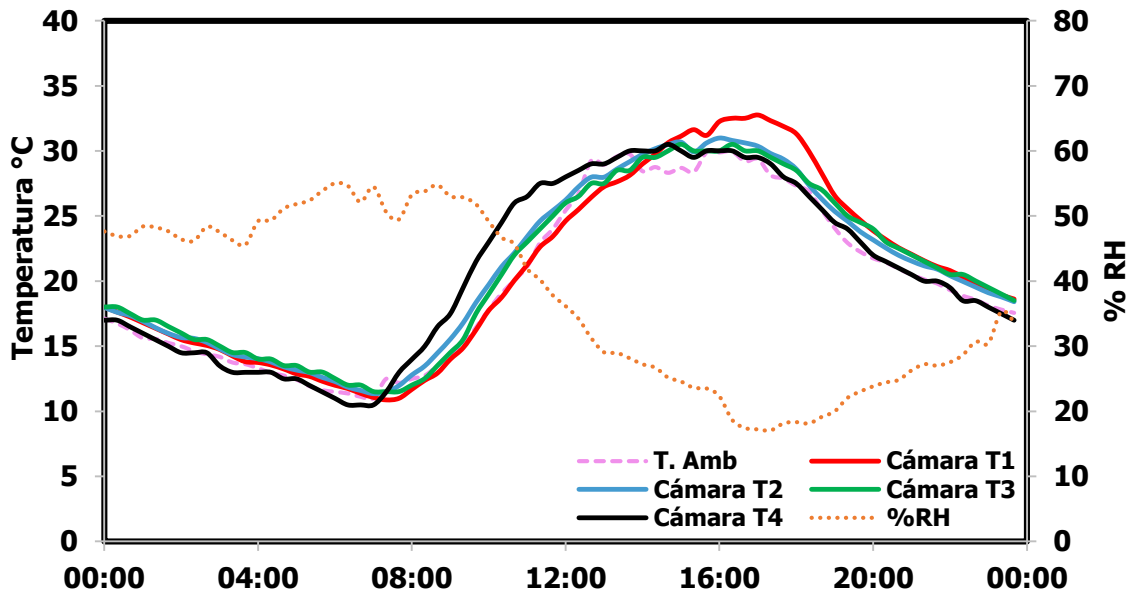
DOMINGO 17 DE MARZO DE 2019.



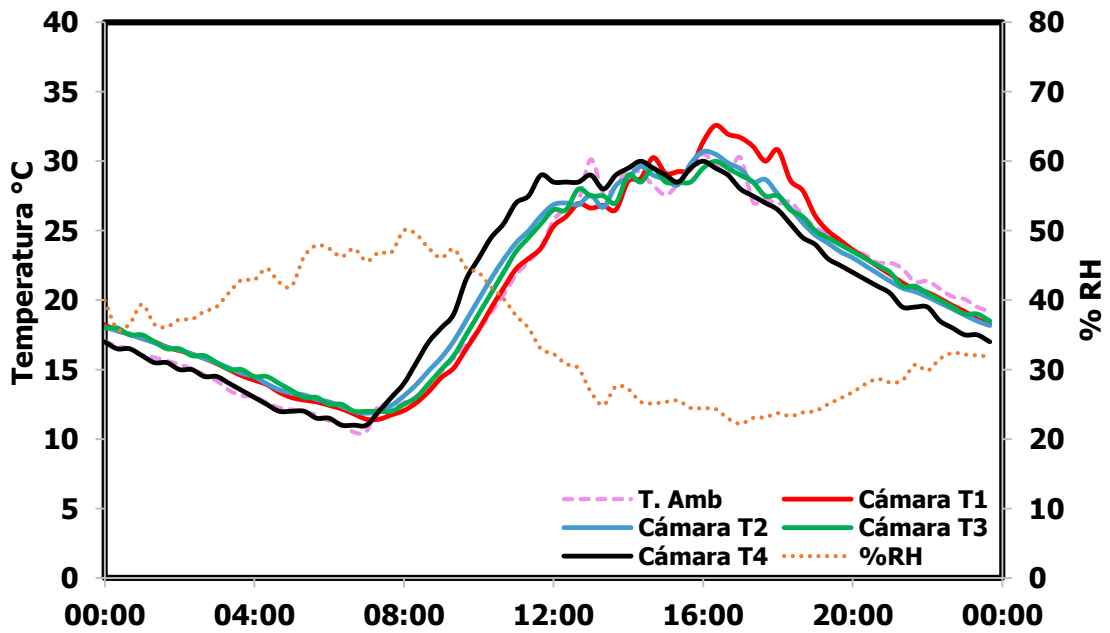
LUNES 18 DE MARZO DE 2019.



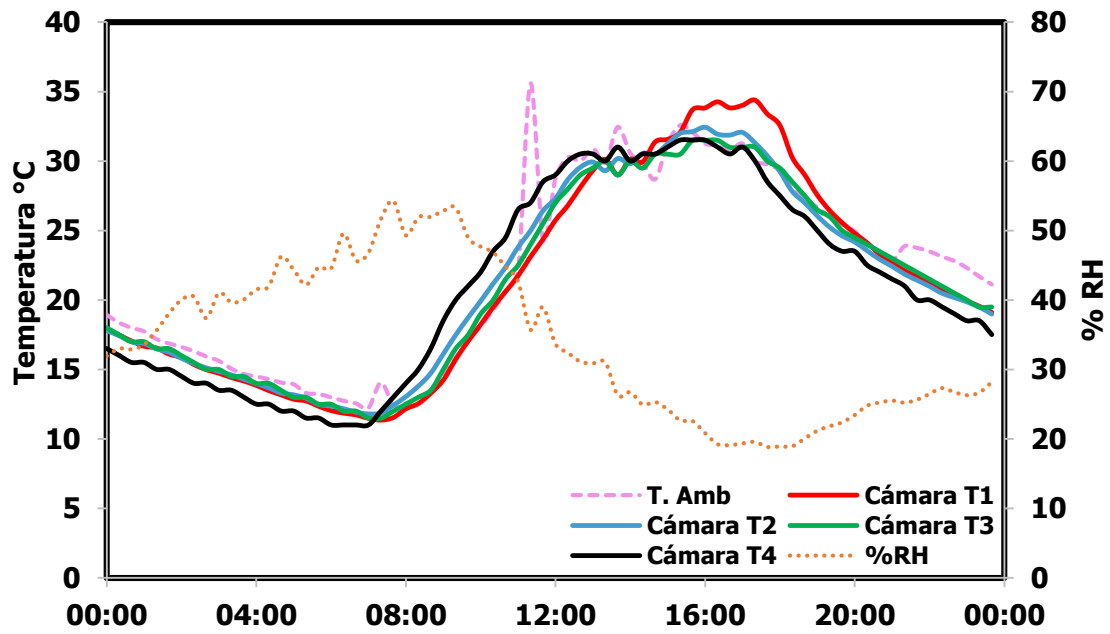
MARTES 19 DE MARZO DE 2019.



MIÉRCOLES 20 DE MARZO DE 2019.

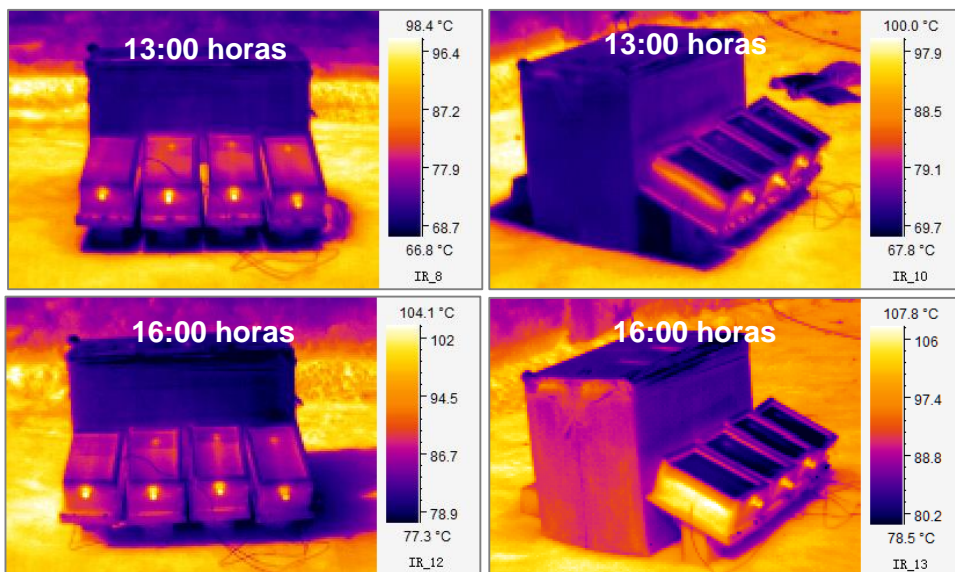


JUEVES 21 DE MARZO DE 2019.

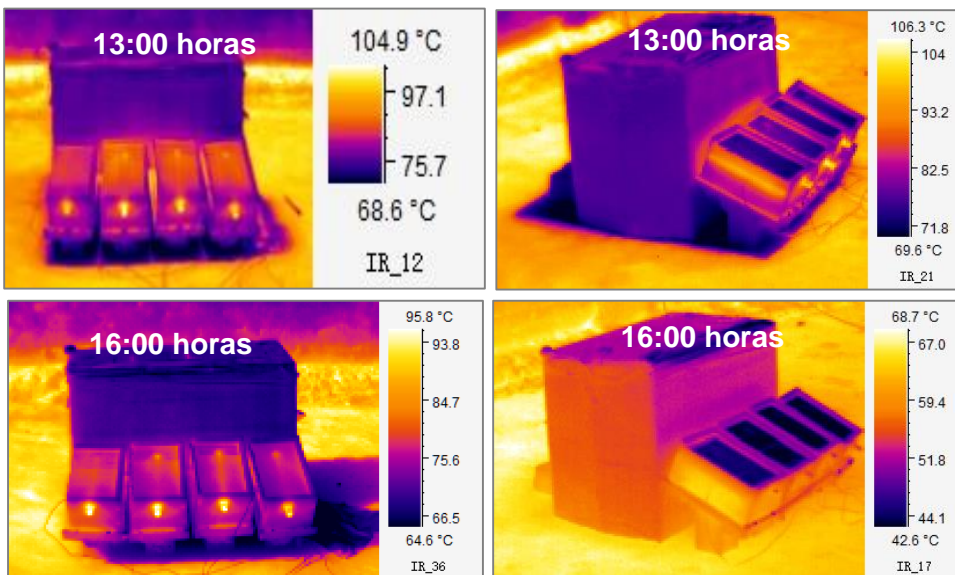


### ANEXO 3. Imágenes termográficas.

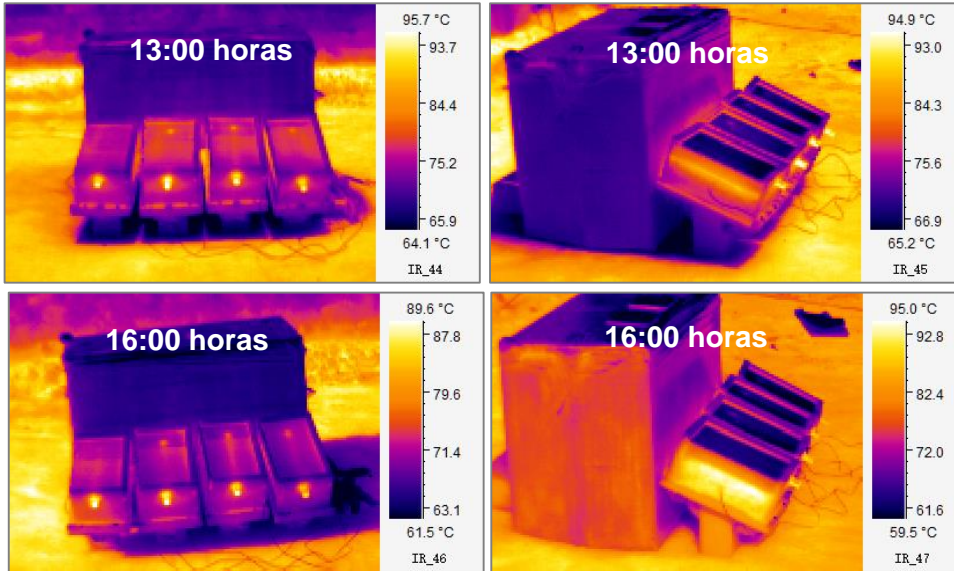
13 de marzo de 2019.



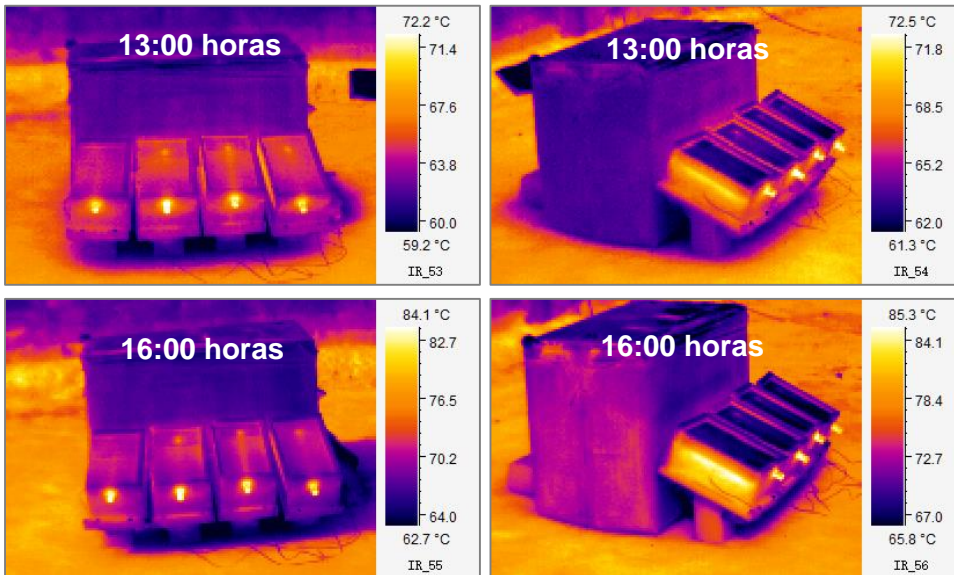
14 de marzo de 2019.



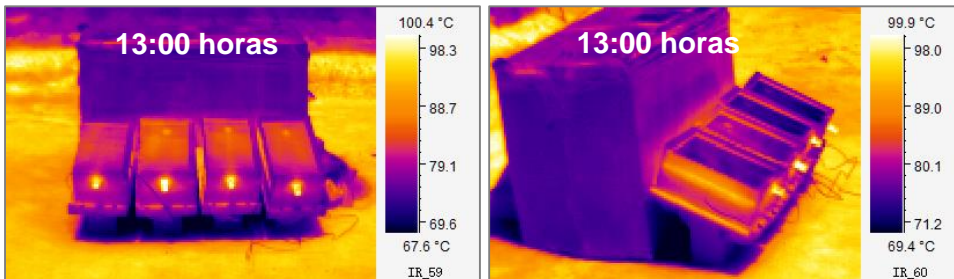
15 de marzo de 2019.

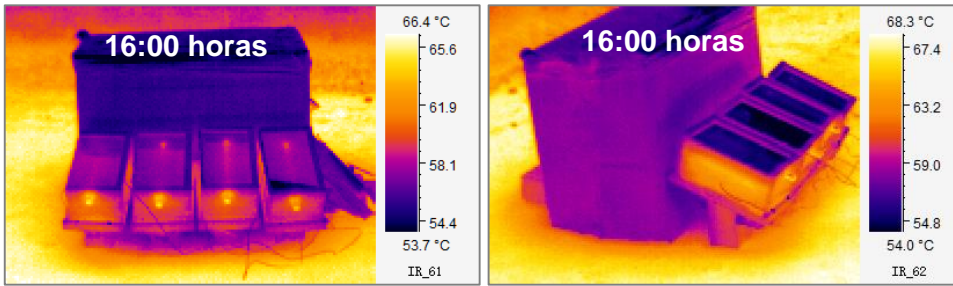


16 de marzo de 2019.

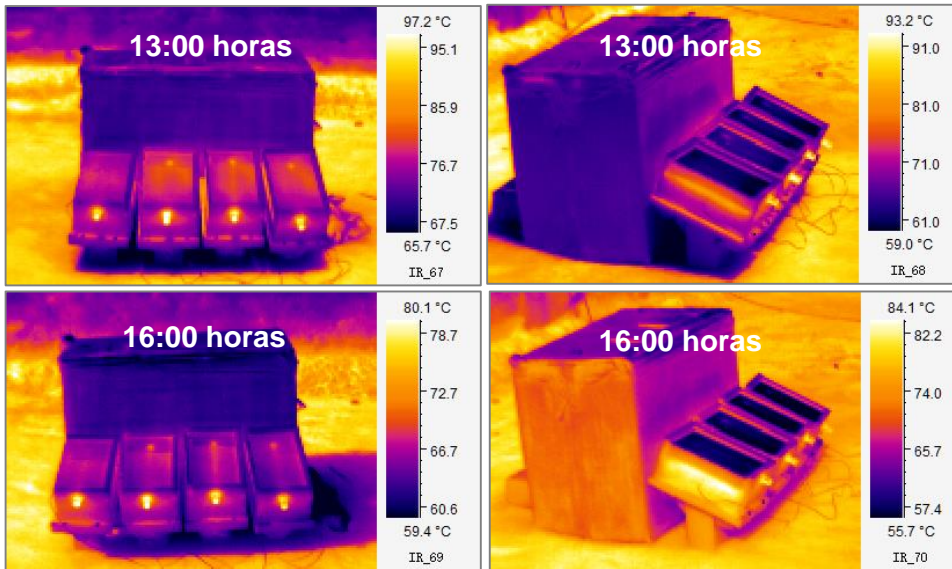


17 de marzo de 2019.

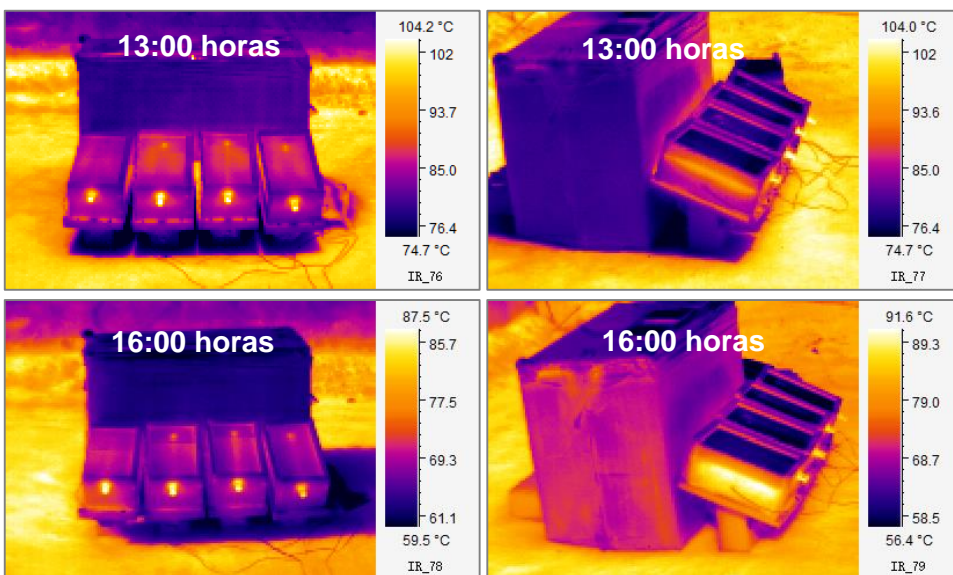




18 de marzo de 2019.

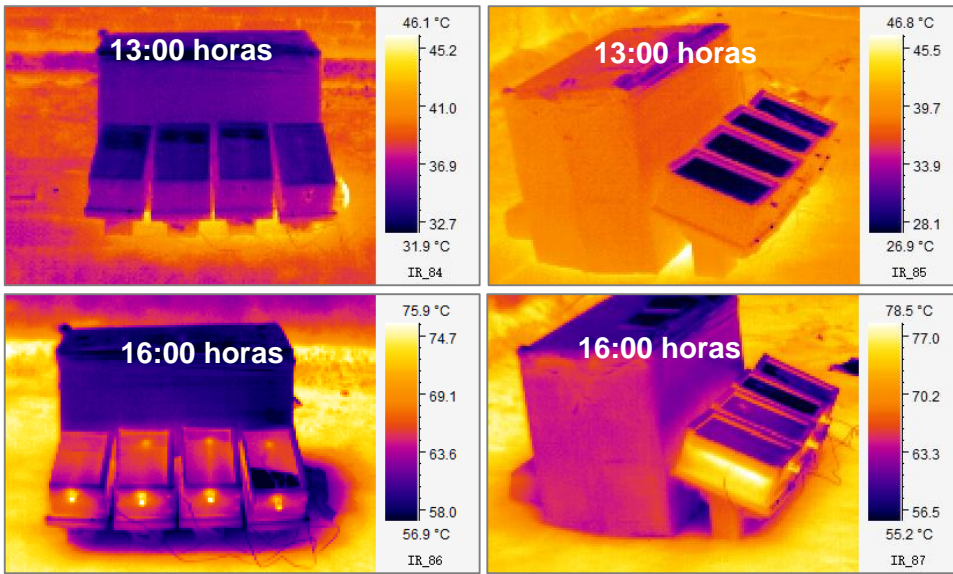


19 de marzo de 2019.

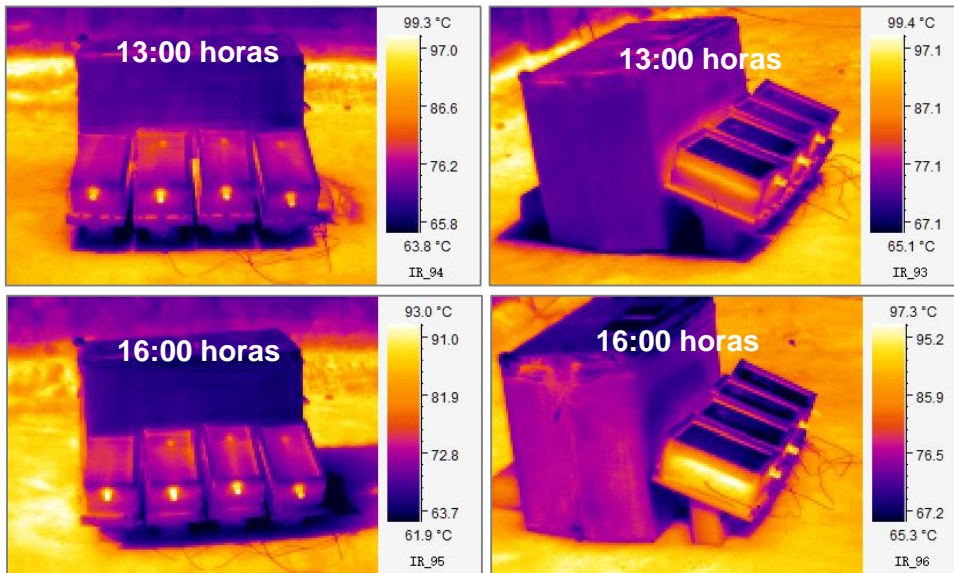




20 de marzo de 2019.



21 de marzo de 2019.



**ANEXO 4. Tabla de temperaturas máximas del diseño experimental con distintas concentraciones de MAT 1 (Hollín/grava).**

Muestra	Concentración de MAT 1 (%)	Experimento ( $T_{max}$ °C) <i>j</i>					
		1	2	3	4	5	6
T1 ( $y_{1j}$ )	100	62.9	66.6	63.7	50	59.1	66.1
T2 ( $y_{2j}$ )	0	56	55.1	52.7	52.5	49.2	62.9
T3 ( $y_{3j}$ )	0	63.6	59.7	58.1	57.6	65.9	54.3
T4 ( $y_{4j}$ )	45	47.5	49.7	47.6	51.5	50	50.6

**ANEXO 5. Datos para el cálculo de la eficiencia energética.**

Tiempo (horas)	Irradiancia ( $W/m^2$ )	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
07:40	106	10.8	11.1	11.4	11.2
08:00	180	10.9	11.2	11.1	11.5
08:20	232	11.9	12.5	12.5	13.2
08:40	285	12.8	13.8	14	14.8
09:00	440	14.1	15.5	15.8	16.1
09:20	449	17.2	19.4	20.4	20.7
09:40	638	19.9	22.7	24.2	24.1
10:00	675	22.9	26.2	28.2	27
10:20	790	25.5	28.7	31.3	29.7
10:40	892	30.1	34	36.6	34.2
11:00	915	31.3	34.9	38	35
11:20	966	34	38.3	41.7	37.8
11:40	1013	36.8	40	43.7	39
12:00	1064	42.2	44.5	48.5	42.8
12:20	1111	45.6	47.1	51.1	45
12:40	1126	46.9	47.5	50.1	42.4
13:00	1154	50.5	49.8	54	45.5
13:20	1050	52.7	51.6	55.5	45.9
13:40	1089	55.4	53.8	58.2	48.6
14:00	1115	56.7	54	58.7	48.7
14:20	1086	59.2	52.9	57.8	48.1
14:40	999	62.7	54.6	59.7	49.7

15:00	930	63.5	52.6	57.4	47.7
15:20	773	64.4	51.7	56.1	46.6
15:40	720	66	55.1	55.3	46.1
16:00	616	66.3	48.7	52.2	43.6
<b>TOTAL</b>	<b>(20414)*1200= 24496800</b>				

### **ANEXO 6. Costo de materiales para la construcción de los prototipos.**

La siguiente tabla muestra el costo de total por el material utilizado en la construcción. Dichos precios son correspondientes a ferreterías y madererías de la ciudad de Morelia en el mes de junio de 2018.

<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD TOTAL UTILIZADA</b>	<b>COSTO (\$)</b>	<b>COSTO T1 (\$)</b>	<b>COSTO T2 (\$)</b>	<b>COSTO T3 (\$)</b>	<b>COSTO T4 (\$)</b>
<b>Madera (prototipo)</b>	0.184 m <sup>2</sup>	21.37	5.34	5.34	5.34	5.34
<b>Madera (base)</b>	0.156 m <sup>2</sup>	18.12	4.53	4.53	4.53	4.53
<b>Polín de madera para base</b>	1 m	50.00	12.5	12.5	12.5	12.5
<b>Tubo de cobre</b>	3.04 m	174	43.50	43.50	43.50	43.50
<b>Coditos de cobre (uniones para tubo)</b>	16	94.40	23.60	23.60	23.60	23.60
<b>Alambre para soldar</b>	1.5 m	45.00	11.25	11.25	11.25	11.25
<b>Cartucho de gas para soplete</b>	1	39.00	9.75	9.75	9.75	9.75
<b>Placas de vidrio</b>	4	40.00	10.00	10.00	10.00	10.00
<b>Panel de acrílico</b>	4	55.00	13.75	13.75	13.75	13.75

<b>Silicón industrial</b>	2	80.00	20.00	20.00	20.00	20.00
<b>Placas de acero inoxidable</b>	0.22 m <sup>2</sup>	98.26	24.56	24.56	24.56	24.56
<b>Pintura negra</b>	1	78.00	19.50	19.50	19.50	19.50
<b>Pijas de 2 ½ pulgadas</b>	52	26.00	6.50	6.50	6.50	6.50
<b>Grava</b>	2.3 kg	0.92	0.60	0.00	0.18	0.14
<b>Piedra caliza</b>	1.3 kg	13.00	0.00	4.88	4.59	3.56
<b>Hollín</b>	0.185 kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>TOTAL</b>	<b>833.07</b>	<b>205.38</b>	<b>209.66</b>	<b>209.55</b>	<b>208.48</b>

#### **ANEXO 7. Cálculo del flujo de calor en los reservorios.**

El flujo de calor fue calculado mediante la multiplicación de los valores absolutos de densidad, calor específico, volumen y diferencia de temperatura instantánea de las cuatro composiciones para el MAT de los prototipos.

<b>Prototipo</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J/kg°C)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>(T<sub>i</sub>-T<sub>f</sub>)</b>	<b>Flujo de calor (J)</b>
T1	2560.25	788	0.001794	-23	<b>83245.136</b>
T2	2441.5	885	0.001794	-23	<b>89155.938</b>
T3	2562.5	849	0.001794	-23	<b>89768.060</b>
T4	2439.25	824	0.001794	-23	<b>82934.227</b>