



**Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.**

**Posgrado en Ciencias en Energía Renovable**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS DE  
CALENTADORES SOLARES EN UNA ZONA  
CÁLIDA-SUBHÚMEDA**

**Tesis que presenta**

**ING. JAVIER ENRIQUE BARRÓN DÍAZ**

**En opción al título de**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA  
RENOVABLE**

**Mérida, Yucatán, México  
Diciembre de 2012**



## DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó, para desarrollar mi trabajo de tesis, en las instalaciones del Laboratorio de Materiales en colaboración con la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. A razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a ambas Instituciones. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la declaración.

Mérida, Yucatán, Diciembre de 2012



---

Javier Enrique Barrón Díaz



El trabajo de tesis titulado “Estudio Comparativo de dos sistemas de calentadores solares en una zona cálida sub-húmeda” fue desarrollado por el estudiante Javier Enrique Barrón Díaz en el laboratorio de la Unidad de Materiales del Centro de Investigación Científica de Yucatán, bajo la dirección del Dr. Gonzalo Carrillo Baeza y del Dr. Víctor Manuel Romero Medina, en el programa de Maestría en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.



---

Dr. Felipe Vázquez Flota  
Coordinador de Docencia  
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.



## **DEDICATORIAS**

A Dios por darme vida y salud para poder terminar este trabajo de tesis.

A mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han dado, así como sus enseñanzas y consejos, por haberme dado fuerzas, en base a su mismo ejemplo de luchar siempre y no rendirse, para continuar y llegar hasta el final.

A mis hermanas que sin importar la distancia, me dan sus buenos deseos y me han motivado para lograr mis metas.

A mi novia por estar conmigo en las buenas y en las malas, por alentarme a continuar siempre adelante, darme fuerzas y mostrarme que ante las adversidades siempre hay alguien que te alegra la vida con una sonrisa.





## **AGRADECIMIENTOS**

Antes que nadie a mi asesor el Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza por su apoyo y orientación, así como sus conocimientos y sus enseñanzas, bases que me ayudaron a terminar este trabajo y me ayudaron a madurar profesionalmente.

Al CONACYT por el apoyo económico que me dio, apoyo que de no haberlo obtenido, se me hubiera dificultado terminar esta maestría.

Al CICY y a la Unidad de Energía Renovable.

A mi Co-Aesor Dr. Víctor Romero por su tiempo e interés en tomar este proyecto y poder aportar sus conocimientos; a mis revisores: Dr. Felipe Barahona, Dr. Luis Carlos Ordoñez, Dr. Eduardo Ordoñez y al Dr. José Hernández por sus oportunas revisiones, así como su apoyo y tiempo invertido en este proyecto.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVO GENERAL .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
HIPÓTESIS.....	4
JUSTIFICACIÓN .....	4
CAPITULO 1	
ANTECEDENTES .....	5
1.1. Introducción .....	5
1.2. El Sol .....	6
1.2.1. Espectro Electromagnético.....	7
1.2.2. Constante Solar .....	8
1.2.3. Radiación Solar .....	9
1.3. Energía Solar Térmica.....	12
1.4. Calentador Solar de Agua.....	14
1.4.1. Calentadores solares de agua activos y pasivos.....	16
1.4.2. Transferencia de calor .....	18
1.4.2.1. Conducción .....	18
1.4.2.2. Convección.....	20
1.4.3. Propiedades físicas de los materiales .....	21
1.4.3.1. Absorbancia .....	21
1.4.3.2. Reflectancia .....	22
1.4.4. Tipos de Calentadores Solares.....	22
1.5. Utilización de Calentadores Solares en México.....	26
CAPÍTULO 2	
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	29
2.1. Instrumentación.....	29
2.1.1. Sistemas automáticos de adquisición de datos (Data Logger) .....	29

2.1.2. Estación Meteorológica.....	30
2.1.3. Electroválvulas .....	31
2.1.4. Bomba Sumergible .....	32
2.1.5. Flauta con Timer y sistema de respaldo eléctrico.....	32
2.1.6. Flujoímetro.....	33
2.1.7. Sistemas de Calentadores Solares.....	33
2.2. Diseño y construcción de los gabinetes de resguardo .....	35
2.3. Instalación y ubicación de los sistemas de monitoreo.....	37
2.4. Metodología de evaluación de los sistemas. ....	40
2.4.1. Monitoreo de temperaturas de los termotanques .....	40
2.4.2. Circulación Forzada.....	42
2.4.3. Descargas de agua caliente.....	43
2.4.4. Monitoreo climatológico .....	44
2.4.5. Medición de flujo de agua .....	44
2.4.6. Procesamiento de los datos .....	44
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>46</b>
3.1. Condiciones climáticas durante el período de estudio .....	46
3.3. Modo de circulación forzada .....	59
3.4. Pruebas con Flujoímetro .....	62
3.5. Eficiencia Térmica .....	66
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>68</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 El efecto Invernadero y su relación con la radiación solar .....	6
Figura 2. Radiación Electromagnética .....	8
Figura 3. Relación Sol- Tierra.....	9
Figura 4. Movimiento de Traslación y Rotación de la Tierra.....	10
Figura 5. Tipos de Radiación percibida en la Tierra.....	11
Figura 6. Arquitectura Bioclimática.....	11
Figura 7. Movimiento de electrones a través de una celda fotovoltaica .....	12
Figura 8. Aplicación de la Energía Solar.....	13
Figura 9. Esquema de un Calentador Solar de Agua .....	15
Figura 10. Efecto Termosifón .....	15
Figura 11. Sistema de Circulación Directa .....	17
Figura 12. Sistema de Circulación Indirecta.....	17
Figura 13. Transferencia de calor por Conducción .....	19
Figura 14. Esquema de un colector plano .....	23
Figura 15. Sistema de Autocontenido .....	24
Figura 16. Partes de un tubo de vacío .....	24
Figura 17. Funcionamiento del Caloducto o Heat Pipe.....	25
Figura 18. DataLogger OMEGA.....	30
Figura 19. Estación meteorológica DAVIS.....	31
Figura 20. Electroválvula de paso. ....	31
Figura 21. Bomba Sumergible.....	32
Figura 22. Fluviómetro con balín de vidrio.....	33
Figura 23. Flujo en “Z” .....	34
Figura 24. Sistema Calentador Solar de Tubo y Placa.....	34
Figura 25. Sistema de Calentador Solar de Tubos de Vacío .....	35
Figura 26. Gabinete de control con respaldo eléctrico.....	36
Figura 27. Gabinete del DataLogger.....	37
Figura 28. Ubicación de los sistemas .....	38
Figura 29. Ubicación final de los calentadores solares y sistemas de monitoreo.....	40
Figura 30. Distribución eléctrica de los sistemas.....	40
Figura 31. Distribución de las tuberías de alimentación de los sistemas .....	42
Figura 32. Curva representativa de la distribución de la radiación solar .....	43
Figura 33. Irradiación solar global a diferentes tipos de cielo.....	45
Figura 34. Disco Solar representativo de la zona de estudio .....	47
Figura 35. Disponibilidad de la Irradiancia e Irradiación Solar durante el período de estudio.....	48
Figura 36. Representación de la disponibilidad energética de un día típico soleado .....	48
Figura 37. Representación de la disponibilidad energética de un día mixto .....	49
Figura 38. Representación de la disponibilidad energética de un día nublado....	50
Figura 39. Gráfica comparativa de la irradiancia promedio mensual y la temperatura promedio mensual máxima registrada.....	50
Figura 40. Gráfica comparativa de la irradiancia promedio mensual y la velocidad del viento predominante mensual registrada .....	51
Figura 41. Gráfica comparativa de la irradiancia promedio mensual y la precipitación total mensual registrada.....	52
Figura 42. Comportamiento del Sistema de Tubo y Placa en un día soleado.....	53

Figura 43. Comportamiento del sistema de Tubo y Placa .....	55
Figura 44. Comportamiento del sistema de Tubo y Placa en un escenario de baja radiación .....	56
Figura 45. Comportamiento del sistema de tubos de vacío en un escenario típico soleado .....	57
Figura 46. Comportamiento del sistema de tubos de vacío en un día mixto .....	57
Figura 47. Comportamiento del sistema de tubos de vacío en día nublado .....	58
Figura 48. Circulación forzada en un día típico soleado .....	60
Figura 49. Circulación forzada en un día mixto .....	61
Figura 50. Circulación forzada en un día nublado .....	62
Figura 51. Tabla de Calibración del flujómetro .....	63
Figura 52. Comportamiento del Flujo en un día soleado .....	63
Figura 53. Flujo en un día mixto .....	64
Figura 54. Comportamiento del flujo en un sistema de tubo y placa en un día nublado .....	65

#### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales Gases de Efecto Invernadero en la Atmósfera .....	5
Tabla 2. Conductividad Térmica de algunos materiales .....	19
Tabla 3. Resumen Climatológico del 2011 de la Ciudad de Mérida .....	27
Tabla 4. Ángulo de operación del colector en la zona .....	39
Tabla 5. Distribución y aplicación de los termopares .....	41
Tabla 6. Distribución de los tiempos de operación de la bomba .....	43
Tabla 7. Resumen de la eficiencia térmicas en los días de pruebas de flujómetro .....	66

## RESUMEN

Hoy en día el uso de calentadores de agua solares para residencias está logrando una aceptación cada vez más importante a nivel global, esto debido en parte por las altas eficiencias que se logran en este tipo de sistemas de bajo mantenimiento (alrededor del 60%), pudiendo omitir prácticamente todo el año, la necesidad del uso de sistemas tradicionales de calentadores que utilizan energías convencionales como el gas o la electricidad, en especial en zonas cálidas-subhúmedas como es el caso de Yucatán.

En este trabajo se evaluó y comparó el desempeño de un calentador solar de tubo y placa con otro comercial de tubos de vacío, así como el desempeño de cada uno; mediante la medición de temperaturas máximas, energía calorífica disponible, y tiempo de recuperación, apoyado con la colección de datos climáticos (Radiación Solar, Temperatura Ambiente, Precipitación y Viento) en una zona en particular a lo largo de un año. Así mismo, también se elaboró un protocolo para medir la eficiencia de estos sistemas permitiendo predecir su comportamiento en condiciones climáticas de diferentes regiones, una vez identificados los factores que interactúan con el sistema.

## **ABSTRACT**

Today the use of residential solar water heaters is achieving an increasingly important acceptance in the world, in part due to high efficiencies that are obtained in these low maintenance systems (around of 60%), omitting, practically all year around, the necessity of the use of traditional heater systems that use conventional energies like gas or electricity, especially in warm-subhumid areas like the Yucatan Peninsula.

In this work, the performance of a tube and plate solar heater were evaluated and compared with another commercial solar evacuated tubes heater; by measuring maximal temperatures, available heat energy, and recovery time; supported by climate data (solar radiation, ambient temperature, precipitation and wind) in a particular area over a year. A protocol was developed to measure the efficiency of these systems allowing the prediction of their behavior in climate conditions of different regions, once the factors that interact with the system were identified.



## INTRODUCCIÓN

En la historia del hombre, se ha hablado siempre de su dependencia con la Naturaleza. Dicha dependencia estriba en la obtención de energía para satisfacer sus necesidades en forma de calor, luz y trabajo. La energía química fue la primera transformación conocida, mediante la quema de leña y velas, se obtenía calor y luz, respectivamente [1]. También es conocido, cómo mediante el uso de animales de arrastre y/o flujo de las corrientes de agua de los arroyos, se obtenía energía mecánica para el funcionamiento de molinos y transportación de personas y bienes.

En el siglo XIX llega la Revolución Industrial, la cual trae avances tecnológicos importantes, como la máquina de vapor alimentada por carbón, siendo éste el primer artefacto que utilizó recursos energéticos fósiles para convertirlo en trabajo. Se hizo posible que las civilizaciones pudieran estar lejos de donde hubieran recursos naturales (ríos, arroyos) ya que el carbón podía ser transportado y almacenado en donde se le requiriera, proveyendo de recursos energéticos a casi cualquier región [1].

También durante esta época llega la introducción de la electricidad, fuente de energía que fue un gran suceso, ya que la energía eléctrica podía ser fácilmente convertida en luz, calor o trabajo en los lugares de uso final. Otra innovación fue el motor de combustión interna, el cual desde entonces fue utilizado en el transporte individual y colectivo. Se desarrolló por consiguiente una creciente dependencia del petróleo como el energético primario para la generación eléctrica y para transporte que día a día fue mayor [1].

Debido a que el uso de energías fósiles provoca impactos ambientales negativos, la mayoría irreparables, el mundo se está preocupando y está buscando otras alternativas de donde obtener energía, como son la Solar, la Eólica, la Hidráulica, la Mareomotriz, Geotérmica y las provenientes de biomasa, como el bioetanol, biodiesel, biogás; todas estas denominadas fuentes de Energía Renovable.

El poder calentar agua a una temperatura aceptable para el baño diario con ayuda del Sol es relativamente sencillo, ya que sólo se necesita una superficie que se exponga al Sol y que esté en contacto con el agua. Esto se logra mediante el uso de materiales con

conductividad térmica alta, como el caso de los metales, en particular el cobre [2]. Los beneficios del uso de los calentadores solares de agua se pueden clasificar en dos principales factores: económicos y ambientales.

Entre los beneficios económicos se relaciona la instalación de este tipo de sistemas, donde a pesar de tener un costo de adquisición relativamente alto, es rentable a mediano plazo, ya que se puede obtener agua caliente para su uso cotidiano en una residencia sin requerir de otras fuentes como son el gas o la electricidad, por lo que se reducirá significativamente el pago de estos servicios [3].

En consecuencia, los beneficios ambientales que conlleva el uso de sistemas solares están directamente relacionados, donde: al igual que el transporte urbano y la industria, el uso de calentadores convencionales de gas ó electricidad, generan un alto índice de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que contribuye al deterioro de la misma y también a que los estragos del fenómeno de Efecto Invernadero se sientan con mayor intensidad [3].

Este trabajo de tesis es parte de un proyecto de investigación y desarrollo tecnológico sobre el diseño, construcción y evaluación de un calentador solar instalado en este Centro. Aquí se realizó un estudio evaluativo de dos tipos de sistemas de calentadores solares, uno considerado el de mejor eficiencia en el mercado mundial para uso residencial y otro previamente elaborado en el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. (CICY) de relativa baja tecnología, evaluando a fondo el aprovechamiento energético de cada tipo, obteniendo su eficiencia y proponiendo mejoras, en particular para el calentador de tubo y placa (CTP).

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad la fuente de energía más usada es el petróleo y sus derivados, situación que ha traído una sobre explotación de dicho recurso, provocando que su extracción del subsuelo cada día sea más difícil y limitado, lo que conlleva a su escasez y un alza en su precio, sin mencionar todas las complicaciones medioambientales.

Parte del problema que traen estas alzas de precios de los hidrocarburos son las alzas en el precio de productos que son destinados a alimentación y servicios de las viviendas

(gas y luz).

La contaminación ambiental ha traído consigo un cambio climático, que ha dado como resultado temporadas de mucho calor, lo que trae en consecuencia una alta demanda por parte de la sociedad de los recursos energéticos convencionales, por el uso de aires acondicionados, ventiladores, calentadores eléctricos, de gas, electricidad, etc., provocando que las emisiones de gases de invernadero aumenten, que las temperaturas suban más de lo normal, temporadas de lluvia torrenciales fuera de los períodos normales, o que deje de llover en otras partes del Planeta.

Para mitigar estos fenómenos adversos, se cuenta ya con tecnología de energía renovable sostenible y sustentable que debieran ser impulsada cada vez con mayor ímpetu en concordancia con políticas gubernamentales que incentiven su uso, donde se incluya mayor información de los beneficios que trae el uso de estas tecnologías, ayudando a mitigar el cambio climático que es evidente día con día.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio comparativo de las temperaturas alcanzadas por los dos sistemas de calentadores solares y de sus eficiencias, en un clima cálido sub-húmedo, uno construido en el CICY y uno de marca comercial altamente eficiente.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Instrumentar y automatizar tanto el sistema de calentador solar elaborado en el CICY, como el comercial de tubos evacuados, así como los dispositivos de monitoreo.
- Implementar una estación climatológica, medir y documentar las condiciones climatológicas del sistema (radiación solar global, precipitación, velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa, presión barométrica) en el punto de estudio durante un año.

- Evaluar las variables de los dos sistemas solares tales como: disminución de la temperatura del agua en horas sin Sol, gradiente de temperaturas dentro de los sistemas.
- Determinar la eficiencia del sistema de calentador solar de tubo y placa, en base a la radiación solar recibida.

## **HIPÓTESIS**

La característica más importante de una zona cálida sub-húmeda, es la cantidad de radiación solar disponible para poder aprovecharse fototérmicamente, por lo que para esta zona en particular, la implementación de baja tecnología para la elaboración de calentadores solares de tubo y placa es factible para su aprovechamiento en uso residencial la mayoría del año.

## **JUSTIFICACIÓN**

Las zonas cálidas-subhúmedas tienen tiempos de mucho calor y poco frío, sin embargo, la temperatura del agua de los tinacos residenciales mayormente se encuentran bajo la temperatura de confort para las duchas cotidianas. La radiación solar percibida en estas zonas es alta, por lo que pueden ser aprovechadas para la instalación de sistemas de calentadores solares de baja tecnología, reduciendo así el uso de las fuentes convencionales de energía como el gas o la electricidad, pudiendo reflejarse en un importante ahorro y a su vez una reducción en las emisiones contaminantes.

Esta tesis surge de la necesidad de saber cuan eficiente es un sistema construido en el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. y compararlo con un sistema de tubos de vacío, que hoy en día es el sistema más eficiente que se encuentra en el mercado internacional, pero que en zonas como en las que se realizaron las pruebas, resulta peligroso, debido a las altas temperaturas que estos sistemas pueden alcanzar.

# CAPITULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1. Introducción

La utilización energética de carburantes derivados del petróleo implica la emisión de gases de combustión: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, etc. llamados también gases de efecto invernadero (ver Tabla 1). Los combustibles, así como sus derivados generan residuos sólidos y residuos líquidos (lixiviados, derrames constantes, etc.); los cuales provocan un impacto ambiental negativo creciente, ya que la demanda energética aumenta en forma exponencial [4], esto debido al incremento demográfico que ha existido en el transcurso de los años.

**Tabla 1. Principales Gases de Efecto Invernadero en la Atmósfera [5]**

GEI	Potencial de Calentamiento Global (PCG)	Origen	Persistencia en la atmósfera (años)
<b>Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	1	Quema de combustibles fósiles	Variable
<b>Oxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)</b>	310	Agricultura y cambios en el uso de la tierra	114
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	21	Agricultura y residuos	12
<b>Perfluorocarbono (PFC)</b>	7.390 - 12.200	Actividades industriales	>50.000 para el tetrafluormetano
<b>Hidrofluorocarbonos (HFC)</b>	124 - 14.800	Actividades industriales	250 para el CHF3
<b>Hexafluóro de Azufre (SF<sub>6</sub>)</b>	22.8	Actividades industriales	3.2

Para combatir este problema climático se han empleado sistemas energéticamente más eficientes e incluso promover el uso de otras fuentes de energías alternativas, conocidas como fuentes de energía renovable [4]. Estas fuentes de energía renovables ofrecen grandes beneficios a los países en desarrollo, principalmente en la generación de servicios energéticos a comunidades que carecen de ellos. Las fuentes renovables no habían tenido gran impacto por razones económicas por lo que se espera que estas sean económicamente competitivas conforme sus precios de producción bajen [6].

## 1.2. El Sol

El Sol es un generador y distribuidor de energía a otros planetas como la Tierra. El Sol tiene un diámetro  $R = 1.39 \times 10^6 \text{ km}$ . Se estima que el 90% de la energía se genera en la región comprendida entre 0 y  $0.23R$ , que contiene 40% de la masa del Sol. La temperatura central varía entre  $8 \times 10^6 \text{ K}$  y  $40 \times 10^6 \text{ K}$ , y la densidad se estima en alrededor de 100 veces la del agua. En una distancia de  $0.7R$  desde el centro, la temperatura baja a cerca de  $130.000^\circ\text{K}$ , donde la densidad es de aproximadamente  $70 \text{ kg} / \text{m}^3$ . La región de  $0.7R$  a  $1.0R$  se conoce como la zona de convección con una temperatura de unos  $5.000^\circ\text{K}$  y la densidad es de  $10^{-5} \text{ kg} / \text{m}^3$  [6]. Cerca del 74% de la masa del Sol es hidrógeno, el 25% es helio, y el resto se compone de trazas de elementos más pesados. El Sol genera la energía por fusión nuclear de núcleos de hidrógeno en helio [7].

Se encuentra a una distancia de unos 150 millones de kilómetros de la Tierra y la radiación que emite tarda algo más de ocho minutos en alcanzar nuestro planeta, a una velocidad de  $300.000 \text{ km/s}$ . Desde el punto de vista cuantitativo se puede decir que sólo la mitad de la radiación solar que impacta a la Tierra, llega a la superficie. La restante se pierde por reflexión y absorción en la capa de aire [4] (Figura 1).



Figura 1 El efecto Invernadero y su relación con la radiación solar [8]

Básicamente todas las formas de energía que se conoce, son o fueron originadas por el Sol. El petróleo, carbón, gas natural y la madera fueron producidos originalmente por el proceso de la fotosíntesis, seguida por reacciones químicas complejas en las que la vegetación fue descompuesta a temperaturas y presiones muy altas durante un largo período de tiempo [9].

La principal ventaja de la energía solar en comparación con las otras formas de energía convencional, es que la energía solar es limpia y se puede suministrar sin contaminar el medio ambiente. Desde el siglo pasado, los combustibles fósiles han proporcionado la mayor parte de nuestra energía, ya que estos son mucho más baratos que la energía de fuentes alternativas, y hasta hace algunos años, la contaminación del medio ambiente había sido de poco interés [10].

### **1.2.1. Espectro Electromagnético**

Toda la materia sólida, líquida y gaseosa no es más que un movimiento de la energía vibratoria. La materia es percibida por los seres humanos en una forma cuatridimensional con la estructura, densidad, color y sonido. La densidad hace que la materia sea sólida, líquida o gaseosa, además, el movimiento de sus átomos y las moléculas dan lugar a las sensaciones de calor y frío. La interacción de la materia con la zona del espectro electromagnético (EM) que se conoce como luz da un color, percibido a través de los ojos [6].

La radiación del Sol que llega a la tierra mediante ondas electromagnéticas, equivale a 10.000 veces el consumo mundial de energía [11]. Aproximadamente la mitad de la radiación solar que recibimos, comprendida entre  $0.4\mu\text{m}$  y  $0.7\mu\text{m}$ , puede ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta [12], es decir, fuera del rango que el ojo humano puede percibir (Figura 2).

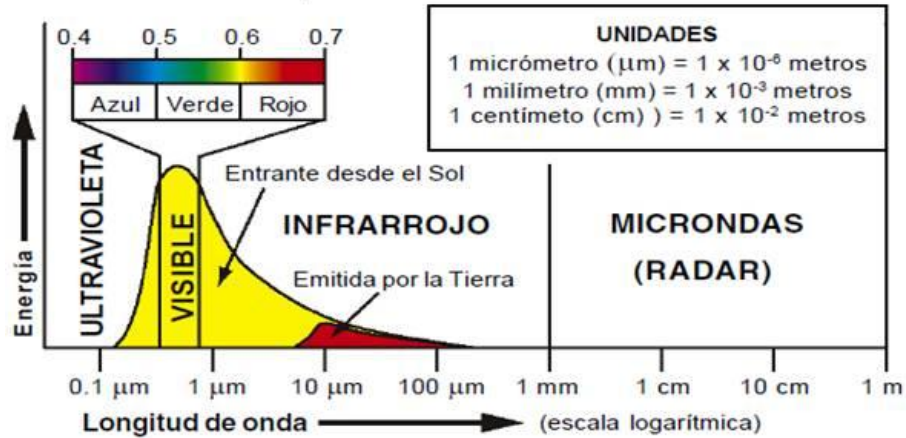


Figura 2. Radiación Electromagnética [13]

### 1.2.2. Constante Solar

Dada la cantidad de energía radiada por el Sol y la relación geométrica entre la Tierra y el Sol, la cantidad de radiación interceptada por los límites exteriores de la atmósfera de la Tierra es casi constante. La variable de salida de energía solar puede ser referida como la irradiación solar total (TSI) — irradiación es la energía incidente por unidad de superficie en un determinado período de tiempo, se mide en Watts-hora por metro cuadrado ( $\text{Wh/m}^2$ ) — mientras que la media a largo plazo de la TSI comúnmente se conoce como la constante solar ( $I_{sc}$ ). La constante solar se puede definir como la TSI integrada a lo largo de todo el espectro electromagnético de entrada a una superficie hipotéticamente perpendicular a los rayos del Sol y situada fuera de la atmósfera a una distancia de 1 AU (Unidad Astronómica por sus siglas en inglés), por unidad de tiempo y por unidad de superficie [10].

$1 \text{ AU} = 149, 597, 870.691 \text{ Km}$ . Una Unidad Astronómica es aproximadamente la distancia media entre la Tierra y el Sol (Figura 3). Se trata de una constante derivada y se utiliza para indicar distancias en el sistema solar. Su definición formal es el radio de una órbita circular sin perturbar, de un cuerpo sin masa que gira alrededor del sol en  $2\pi/k$  días (es decir  $365.2568983\dots$ días), donde  $k$  se define como la constante de Gauss exactamente igual a  $0,01720209895$ . Dado que la AU se basa en el radio de una órbita circular, una AU es en realidad un poco menos de la distancia media entre la Tierra y el Sol (unos 150 millones de kilómetros) [14].



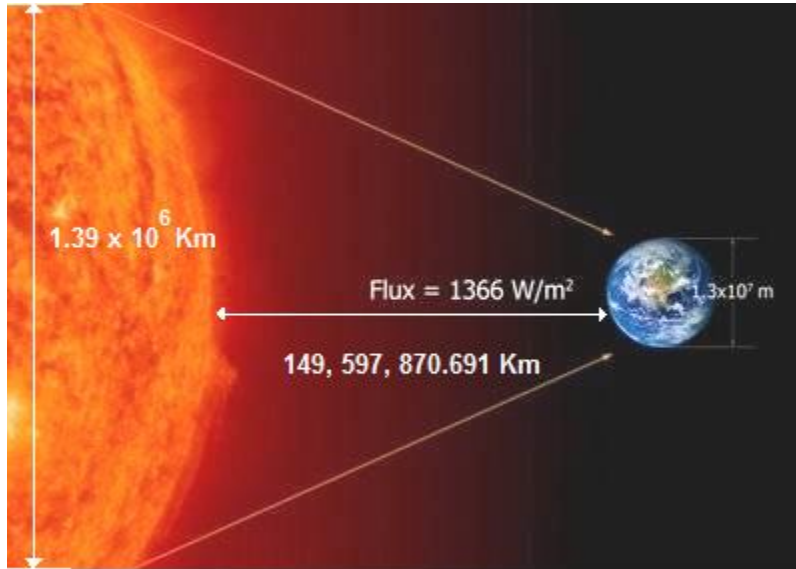


Figura 3. Relación Sol- Tierra [15]

### 1.2.3. Radiación Solar

La radiación es el fenómeno de propagación de energía a través del espacio vacío o de un medio material, que se transmite mediante la combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes [16].

La composición atmosférica es el factor más importante para determinar el total de radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra. Debido a la traslación y rotación de la Tierra, el espesor de la atmósfera que debe de atravesar la radiación solar varía según la hora del día y el mes del año (Figura 4).



Figura 4. Movimiento de Traslación y Rotación de la Tierra [17]

Cuanto mayor es el espesor que debe atravesar la radiación, menor es su contenido energético a causa de la absorción y de la difracción creciente. Durante el día, cuando el Sol incide verticalmente cercano al Ecuador, la radiación atraviesa el mínimo espesor de atmósfera. Cuando el Sol se pone en el horizonte (el atardecer), el trayecto de la radiación a través de la atmósfera aumenta.

Sin embargo, no toda la radiación total del Sol que recibe la Tierra llega hasta la superficie, una gran cantidad se pierde debido a las capas atmosféricas y los diversos fenómenos que ocurren en ellas, por lo que se puede dividir en tres componentes o tipos (Figura 5):

- **Radiación Directa:** Es la recibida desde el Sol sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
- **Radiación Difusa:** Es la que sufre cambios en su dirección principalmente debido a la reflexión y difusión en la atmósfera.
- **Albedo ó Radiación Reflejada:** Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies cercanas [18].



Figura 5. Tipos de Radiación percibida en la Tierra [19]

Las aplicaciones que se le pueden dar a la radiación solar son diversos, de las maneras más simples como secar productos, hasta las más complejas como producir electricidad destinada a hogares u oficinas [20]. Estas aplicaciones son clasificadas como:

- **Utilización Directa:** esta se logra mediante la incorporación de acristalamientos y otros elementos arquitectónicos con elevada capacidad de absorción térmica, este tipo de aplicación también es llamado energía térmica pasiva. Un ejemplo de este tipo de aplicación la encontramos en la arquitectura bioclimática, donde se ubica la vivienda hacia el sentido de la trayectoria del Sol, para así aprovechar esta energía en proporcionar calefacción (ver Figura 6).



Figura 6. Arquitectura Bioclimática [21]

- **Transformación en Calor:** o también conocida como Energía Solar Térmica, esta consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para calentar un cuerpo, un

ejemplo es un fluido que circulan por el interior de captadores solares, los cuales se pueden destinar para su uso de Agua Caliente Sanitaria (ACS), otro ejemplo es el emplearlo para secar un producto. Al igual que la utilización directa, este emplea el efecto invernadero para alcanzar sus objetivos.

- **Transformación en Electricidad:** es la llamada energía solar fotovoltaica, que permite la transformación de la radiación solar en electricidad por medio de celdas fotovoltaicas integradas en módulos solares [18], estas celdas son compuestas por materiales semiconductores, en donde al percibir ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético de la luz solar (fotones), provocan la excitación de los electrones dicho material, produciendo un flujo de electrones entre las capas del semiconductor (ver Figura 7).

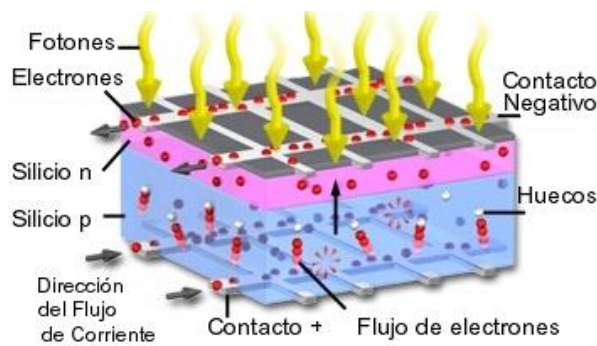
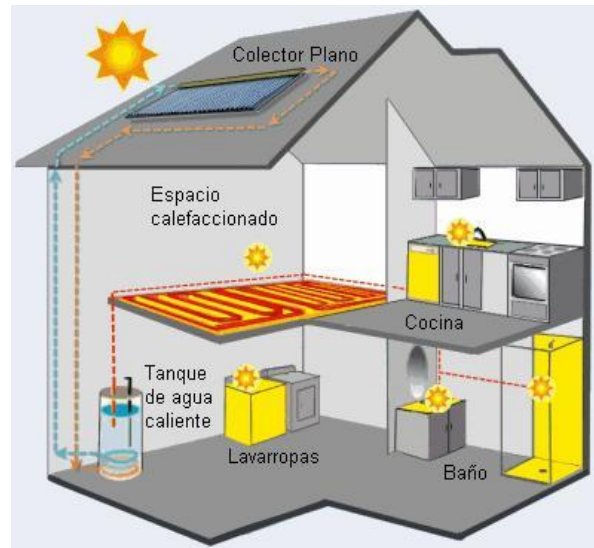


Figura 7. Movimiento de electrones a través de una celda fotovoltaica [22]

### 1.3. Energía Solar Térmica

La Energía Solar Térmica se utiliza fundamentalmente para calentar agua, sobre todo para uso residencial, y para procesos industriales o de calefacción (ver Figura 8). Este tipo energía es la más económica, donde la inversión inicial, depende del tamaño del equipo. Son sistemas que pueden durar más de 20 años con un mínimo de mantenimiento [23].



**Figura 8. Aplicación de la Energía Solar [24]**

En cuanto a los usos de la energía solar térmica, se puede citar el acondicionamiento de aire, potabilización y calentamiento del agua, hornos solares, etc. A modo de ejemplo, las experiencias positivas que pueden dar las cocinas solares para preparar alimentos, como es lo ocurrido en el poblado norteño de Villaseca, en Chile, una zona que se distingue porque durante todo el año los días son soleados. A principios de la década de 1990 se comenzó a investigar el uso de cocinas solares, buscando dar una solución a la extrema pobreza y con el objetivo secundario de sustituir el uso de la leña como combustible, lo que trajo la disminución de uso de la leña y de emisiones de CO<sub>2</sub>, y lo más importante que fue accesible para cualquier persona. [25].

Otro claro ejemplo, son los destiladores solares. Estos dispositivos usan el mismo principio de la destilación ordinaria en donde mediante la aplicación de calor se pueden separar las distintas sustancias de una mezcla líquida. Este proceso se basa en las diferentes temperaturas que necesitan cada una de las sustancias de una mezcla para evaporarse y en la posterior condensación por separado de cada una de ellas, con la diferencia que la energía térmica aplicada aquí es la obtenida por el Sol [26].

Con respecto a esta aplicación se pueden encontrar varios estudios, uno de ellos es el realizado en Israel por Dan Sagie et al (2001) quienes llegan a la conclusión de que la

desalación con energía solar es concebible en Israel a un costo razonable y que tiene un potencial aún más amplio económicamente a lo largo del Mar Rojo y sitios en condiciones ambientales similares, sin embargo la viabilidad de dicha tecnología en Israel es altamente dependiente de las políticas gubernamentales y la actitud del marco institucional de la economía del agua israelí [27].

Por su parte México tiene condiciones geográficas de latitud y clima que son excelentes para utilizar estos equipos de calentamiento solar de agua en hogares e industrias, ya que el calentar agua llega a representar hasta el 50% del consumo de gas (ya sea LP o natural). También, si se toma por ejemplo que en México existe una gran cantidad de hoteles con albercas, las cuales requieren que su agua sea calentada. Se puede concluir que existe un gran mercado para el calentamiento solar de agua en México [2].

Existe la idea errónea de que en zonas cálidas, el agua caliente para el uso en duchas no se requiere, pero la mayoría de las casas de las ciudades principales cuentan con algún tipo de sistema de calentamiento de agua o boiler, contradiciendo esta suposición que tendría que ser estudiada aparte y a fondo, ya que conlleva un entendimiento socioeconómico y de comportamiento de usos y costumbres (ej. el bañarse de noche o en las mañanas).

#### **1.4. Calentador Solar de Agua**

Un calentador solar de agua es un sistema fototérmico capaz de utilizar la energía térmica del Sol para calentar un cuerpo (colector) y transfiriendo este calor a un fluido con procesos físicos de conducción y convección. Evitando el uso de algún tipo de combustible [28].

Consta principalmente de tres partes (ver Figura 9):

- El **Colector**, que se encarga de capturar la energía del Sol y transferirla al agua

- El **Termo-tanque**, donde se almacena el agua caliente, y
- El **Sistema de tuberías** por donde el agua circula [29].

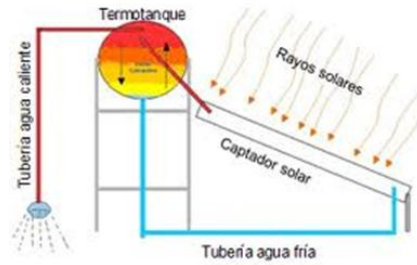


Figura 9. Esquema de un Calentador Solar de Agua [30]

En las ciudades donde se alcanzan temperaturas muy bajas durante las noches, los colectores de los calentadores solares se aíslan para evitar el enfriamiento del agua en el interior del colector solar [29]. La mayoría de los calentadores solares utilizan como principio fundamental el efecto físico de “termosifón” que se genera por la diferencia de temperaturas, que genera un diferencial de densidades, donde el agua caliente es más ligera que la fría y, por lo tanto, tiende a subir (ver Figura 10). Esto es lo que sucede entre el colector solar y el termotanque, con lo cual se establece una circulación natural, sin necesidad de ningún equipo de bombeo [3]

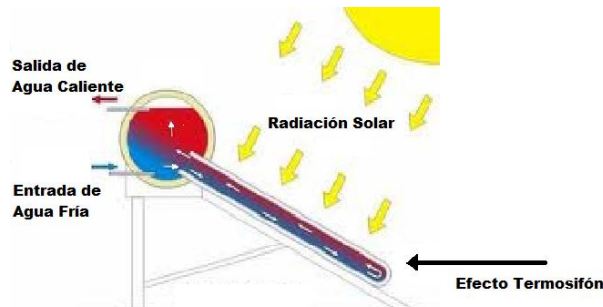


Figura 10. Efecto Termosifón [31]

Los colectores solares térmicos o calentadores solares están divididos en tres clases:

- De **baja temperatura**. Generan temperaturas menores a 65°C. Son ideales para calentar piscinas, uso doméstico de agua y actividades industriales en las que la temperatura del proceso no sea mayor a 60°C (pasteurización, lavado, etc.).

- De **temperatura media**. Generan temperaturas de entre 100 y 300°C. Este tipo de colectores son utilizados en procesos industriales, como en la industria textil, en lavado o teñido de la ropa.
- De **alta temperatura**. Generan temperaturas mayores a 500°C, la cual se puede usar para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica; se instalan en regiones donde la posibilidad de días nublados son mínimos [28].

Este trabajo se enfoca al estudio de sistemas de calentadores solares de baja temperatura para uso residencial.

#### 1.4.1. Calentadores solares de agua activos y pasivos

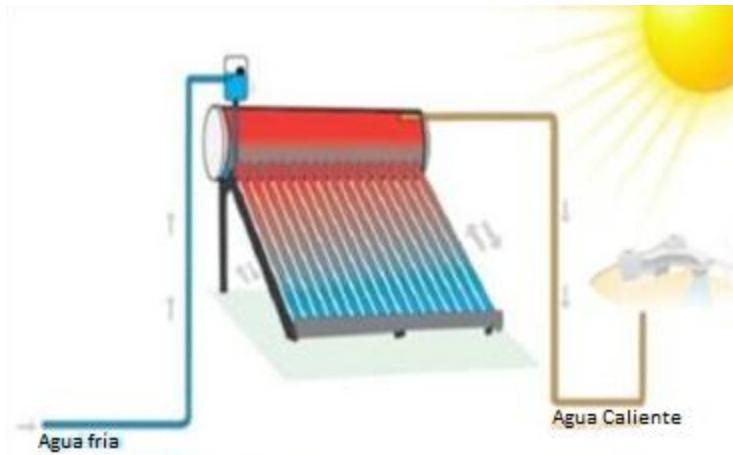
Cada uno de estos calentadores de agua solares trabaja de una manera diferente para lograr el objetivo de capturar la energía del sol y transformar esa energía en calor, que a su vez transfiere ese calor al agua y se obtiene agua caliente [29].

Los sistemas de recolección y almacenamiento se consideran como calentadores de agua **pasivos**, y son ideales para el uso residencial, pero deben ser usados en donde las temperaturas no bajen más allá de 0°C. Los sistemas pasivos utilizan el principio de termosifón, y trabajan al permitir que el agua caliente suba a través del sistema y el agua fría baje para ser calentada.

Los calentadores de agua solares **activos** pueden ser de sistemas de circulación directos o indirectos.

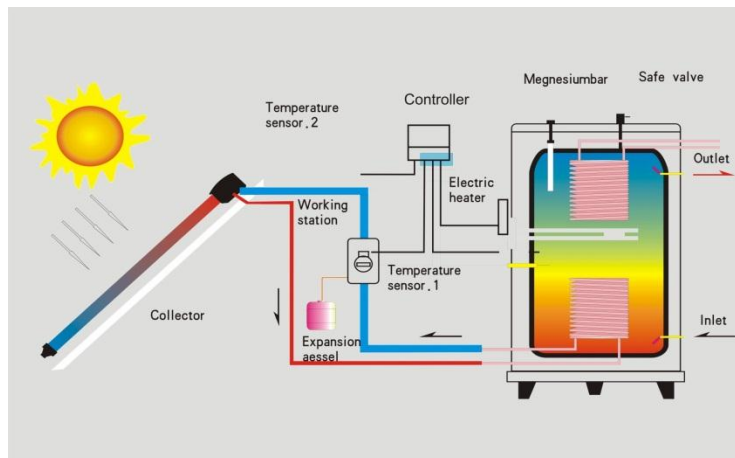
- En un sistema de *circulación directa*, el agua circula a través de los colectores y después hacia la casa. Éste tipo de sistema trabaja mejor en climas templados en donde no se registren heladas. Los sistemas utilizados en este trabajo entran en esta clasificación (ver Figura 11).





**Figura 11. Sistema de Circulación Directa [32]**

- Los sistemas de *circulación indirecta* son ideales para casas en áreas en donde la presencia del viento es frecuente. Estos sistemas emplean el uso de bomba para hacer circular un fluido (medio de transferencia de calor) a través del colector solar y posteriormente por un serpentín ubicado dentro del termotanque, para lograr el intercambio de calor, lo que calienta el agua del sistema y mitiga las pérdidas de calor por la circulación del viento en el colector (ver Figura 12).



**Figura 12. Sistema de Circulación Indirecta [33]**

La ventaja de usar sistemas pasivos es que son menos costosos que los activos y generalmente duran más tiempo. La desventaja de usar estos sistemas es que el tipo de sistemas no son tan eficientes como un sistema activo.

### 1.4.2. Transferencia de calor

Siempre que existe un gradiente de temperatura dentro de un sistema, o cuando dos sistemas a diferentes temperaturas se ponen en contacto, la energía se transfiere. El proceso por el cual el transporte de energía tiene lugar es conocido como *transferencia de calor* [34]. Existen 3 tipos de transferencia de calor, a los que se le llama *mecanismos*:

- Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, pudiendo ser un sólido o un líquido, a este tipo de transferencia de calor en el medio se le conoce como *conducción*.
- *Convección* se le conoce a la transferencia que ocurre en un fluido en movimiento, cuando existe diferencia de temperaturas en el espacio que ocupa, generando un flujo constante en busca de una homogeneidad en el volumen compartido.
- Y por último se tiene a la transferencia de calor por *radiación térmica*, esto se da debido a que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, por lo tanto, al no existir algún medio, esta transferencia se produce por medio de la radiación de una superficie a otra [35].

El proyecto se enfoca más en los mecanismos de conducción y convección, ya que son estos los que hacen posible la conversión de la energía solar en energía calorífica.

#### 1.4.2.1. Conducción

*Conducción* calorífica como se mencionó anteriormente es el mecanismo de intercambio de energía interna de un cuerpo, o parte de él, a otro, esto debido al intercambio de energía cinética que se genera del movimiento de las moléculas por comunicación directa o por el flujo de electrones libres, cuando se refiere a los metales [36]. El calor fluirá desde la región de mayor temperatura a la de menor temperatura (ver Figura 13). La velocidad a la que se transfiere calor por conducción ( $q_k$ ) es proporcional al gradiente de temperatura ( $dT/dx$ ) por el área,  $A$ , a través del cual el calor se transfiere. La situación es muy similar en los líquidos, aunque en estos las moléculas están menos

esparcidas y las interacciones son más fuertes y frecuentes [35] tal como se muestra en la ecuación 1.

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx}$$

En esta relación,  $T$  es la temperatura local y  $x$  es la distancia en la dirección del flujo de calor. La tasa real de flujo de calor depende de la conductividad térmica  $k$ , que es una propiedad física del medio. Para la conducción la tasa de transferencia de calor a través de un medio homogéneo es [34]:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

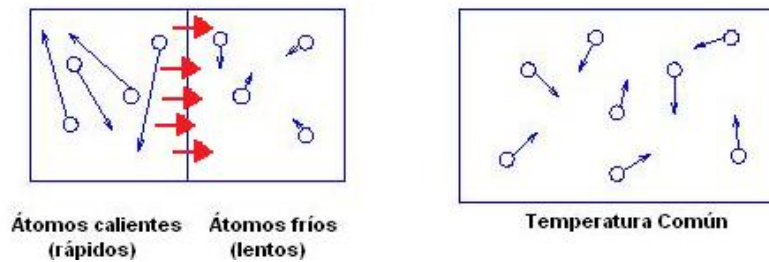


Figura 13. Transferencia de calor por Conducción [37]

En la tabla 2, se muestran algunos materiales y su conductividad térmica, entre ellos encontramos los empleados por el sistema del CICY como es el cobre.

Tabla 2. Conductividad Térmica de algunos materiales [34]

Material	W/m °K	Material	W/m °K
Acero	47-58	Hierro	1.7
Agua	0.58	Ladrillo	0.80
Aire	0.02	Ladrillo Refractario	0.47 – 1.05
Alcohol	0.16	Latón	81 – 116
Alpaca	29.1	Litio	301.2
Aluminio	209.3	Madera	0.13
Amianto	0.04	Mercurio	83.7
Bronce	116 – 186	Mica	0.35
Cinc	106 – 140	Níquel	52.3
Cobre	372.1 – 385.2	Oro	308.2
Corcho	0.04 – 0.30	Parafina	0.21

<b>Estaño</b>	64	Plata	406.1 – 418.7
<b>Fibra de Vidrio</b>	0.03 – 0.07	Plomo	35
<b>Glicerina</b>	0.29	Vidrio	0.6 – 1

#### 1.4.2.2. Convección

Se puede definir como *convección* al mecanismo de transmisión de calor que existe en un fluido debido al transporte de energía térmica como consecuencia de los movimientos [36]. Se dice que puede existir tanto una **convección natural** o libre que es cuando el movimiento del fluido no es propiciado por una agitación mecánica, y la **convección forzada** que es donde si existe tal agitación [38].

Sin importar el origen del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación quedaría representada como:

$$q^n = h (T_S - T_\infty) \quad (2)$$

Donde  $q^n$  es el flujo de calor por convección ( $W/m^2$ ), y es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie  $T_S$  y la temperatura del fluido  $T_\infty$  esta expresión se le conoce como la *ley de enfriamiento de Newton* y la constante de proporcionalidad  $h$  ( $W/m^2 \cdot K$ ) es el *coeficiente de transferencia de calor por convección* [35].

#### 1.4.2.3. Radiación

La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por la superficie de un cuerpo excitado térmicamente. Esta se emite en todas direcciones y cuando incide sobre otro cuerpo parte de esta radiación puede ser reflejada, otra transmitida y otra absorbida [36]. El mecanismo de emisión se relaciona con la energía liberada por la oscilación de electrones que constituyen la materia del cuerpo [35].

En otras palabras, no es necesario un medio físico para que exista el intercambio de calor entre ambos cuerpos. La energía proveniente del Sol es un claro ejemplo de este tipo de transferencia de calor.

### **1.4.3. Propiedades físicas de los materiales**

#### **1.4.3.1. Absorbancia**

Recordando la estructura de un colector plano y uno de tubos de vacío, se podría decir que una parte importante de estos sistemas es el buen diseño de su colector, para esto es importante saber que materiales utilizar para su construcción.

Una propiedad importante es la absorbancia del material. El material más eficiente térmicamente hablando, es el que absorbe la mayor cantidad posible de energía solar (ya que una parte se pierde por reflexión, conducción y convección), transfiere esta energía a través del material absorbente, luego la transfiere al agua en forma de calor.

El cobre, el aluminio y el fierro llevan a cabo estas funciones muy bien y se usan comúnmente para construir absorbentes en sistemas de colectores planos, y como se mencionó en el apartado anterior el vidrio es aplicado en los sistemas de tubos de vacío. Algunos materiales tales como el asfalto o el concreto se han usado con éxito también; en la Tabla 2 se comparan algunos de los materiales más utilizados y su capacidad para transmitir calor.

Se han realizado estudios sobre los sistemas de calentadores solares, en los cuales buscan que dichos sistemas sean más eficientes, tal es el caso del estudio elaborado por M. R. Riazi et al (2009) [39] en el cual se reportan los resultados experimentales para el desempeño y la velocidad de transferencia de calor en los tubos de cobre con flujo termosifónico, haciendo comparaciones con otros tipos de tubos de polipropileno y acero, mostrando que el cobre da los mejores resultados.

Otro caso de estudio es el realizado por Madhukeshwara y Prakash [40], en este trabajo se enfocan en los posibles recubrimientos que se le pueden aplicar al colector, en la superficie de tubo y placa, la cual es la que tiene el contacto con el fluido a calentar, en este caso, agua. Concluyen que el mejor recubrimiento de los estudiados aquí fue el

cromo negro, ya que en los tres ángulos experimentales dio temperaturas arriba de los 60°C, siguiéndole muy de cerca el recubrimiento de negro mate.

#### 1.4.3.2. Reflectancia

La reflectancia es la proporción de la radiación reflejada desde una superficie. La reflectividad es la propiedad de reflejar la radiación, post-evaluada por todos los materiales en diferentes grados, también llamada albedo en referencia a la atmósfera [9].

Existen estudios que se enfocaron en como mitigar la pérdida de energía debido a la reflectancia, como es el caso de Khoukhi et al. [41], en donde probaron materiales que sirvieran como complemento al vidrio colocado en los colectores, ya que este a pesar de ser un buen material como absorbedor, tiene la propiedad de reflejar. Utilizaron un material llamado sol-gel poroso, el cual provocó un incremento en la energía útil aprovechada y una disminución en la reflectancia del vidrio.

Otro estudio fue el realizado por Siyoul y Tebeom [42] sobre una estimación de las pérdidas de calor que llegan a existir en los receptores solares. Ellos implementaron dos tipos diferentes de receptores parabólicos, dando como resultado que entre un tipo de receptor y otro si hay mejoría, y que la radiación que no es absorbida por estos receptores la reflejan, caso que puede ser significativo si la temperatura del fluido es baja.

#### 1.4.4. Tipos de Calentadores Solares

Dentro de los calentadores solares más utilizados, encontramos sistemas como:

- Los sistemas de **colector de tubo y placa**, también llamados *colectores planos*, consisten en un panel metálico plano que presenta una superficie con propiedades tanto de absorción como de transmisión de calor (3), que es colocada sobre una estructura protectora (1),(6), y en la parte superior se

coloca una lámina de vidrio (2) y por la parte inferior y los laterales se colocan materiales aislantes (5) [28], tal y como se muestra en la Figura 14.

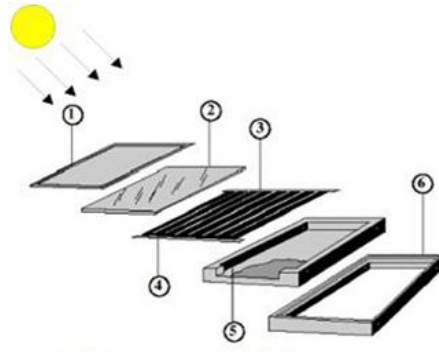


Figura 14. Esquema de un colector plano [28]

En este tipo de sistema el fluido se hace pasar a través de los tubos los cuales al hacer el contacto se produce la transferencia de calor, calentando el agua y así propiciando el flujo natural ó de termosifón, o en otros casos es impulsado por medio de una bomba o circulación forzada.

La caja en la que es colocado el panel de tubos, así como el panel de vidrio, además de proteger el colector, ayuda a que se absorba la mayor cantidad de energía térmica posible, esto por medio de el efecto invernadero que ocurre dentro de ella.

- Los sistemas de **calentadores de Autocontenido**, son los calentadores más simples y económicos, aunque con algunas limitaciones técnicas. El calentador de autocontenido es simplemente un recipiente (una caja, un tambo, varios tambos pequeños, etc.) dispuesto de tal manera que presente su mayor área hacia la posición promedio del Sol. Esta cara se pinta de negro y hace las veces de colector solar. El recipiente se llena con agua, que se calienta directamente por contacto con la cara expuesta al Sol. Por los lados y el fondo se aísla térmicamente para evitar las fugas de calor. El nombre de "autocontenido" viene de que en el mismo elemento físico del sistema se conjugan las funciones de colector y de termo tanque [43] (ver figura 15).



Figura 15. Sistema de Autocontenido [44]

- Los sistemas de **calentadores con colector de tubos al vacío**: dichos tubos están colocados en líneas paralelas, cada uno consiste generalmente de un tubo exterior y de uno interior o también llamado tubo de absorción; el tubo interior está cubierto con una capa especial que absorbe la energía solar e inhibe la pérdida de calor radiante. Estos tubos son elaborados de tal forma que en el espacio entre los dos tubos se pueda generar un vacío (ver Figura 16), para mejorar el aislamiento, el cual elimina la pérdida de calor convectivo y conductivo, que a su vez calienta el agua que fluye adentro del tubo de absorción [45].

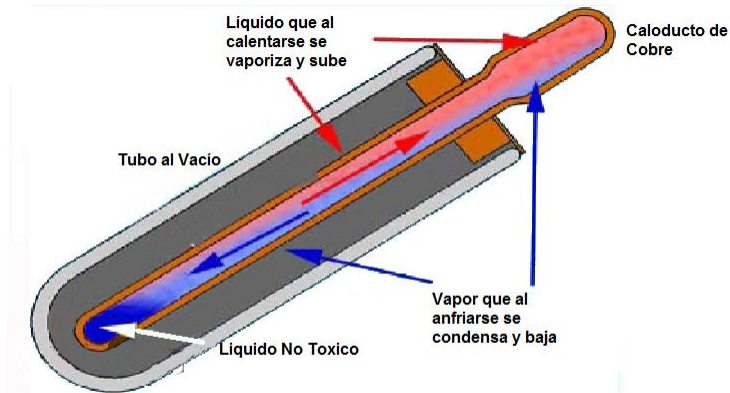


Figura 16. Partes de un tubo de vacío [45]

Los sistemas de este tipo, se encuentran en dos tipos, pueden ser sistemas de transmisión directa, en la cual la radiación solar esta en contacto directo con el agua, ya que esta se hace pasar por los tubos y produce el efecto de termosifón, llegando el agua caliente a la parte superior donde se encuentra al termotanque, en el cual se almacena el agua caliente.



También encontramos sistemas de transmisión indirecta, en el cual se usa un tercer elemento como medio de transmisión, son conocidos como heat pipe, en ellos se emplea como medio de transmisión otro fluido que vaporiza, localizado en la parte interna de los tubos, dicho fluido al vaporizarse asciende al termotanque, donde al transmitir su calor se condensa y vuelve a bajar (ver Figura 17).



**Figura 17. Funcionamiento del Caloducto o Heat Pipe [46]**

Tanto el sistema de tubo y placa y el sistema de tubos de vacío, pueden ser utilizado tanto como sistemas pasivos (termosifón), como sistemas activos (propulsado por una bomba) para hacer circular el agua a través del colector.

Entre algunas pruebas que se han realizado se encuentra la de D.A. Siqueira et al. quienes realizaron un estudio llamado "Analysis and performance of a low-cost solar heater" [47], fue realizado en Brasil donde buscaron la forma de usar la energía del Sol como medio para la calefacción del agua para uso doméstico. Para ello utilizaron materiales de bajo costo en la construcción de los colectores, como son los materiales poliméricos, que requieren una baja inversión. Llegaron a la conclusión de que su sistema no mostró pérdidas de calor significativas en un clima tropical, así también la eficiencia y la temperatura del agua lograda fue buena, otra parte de este estudio fue un comparativo con otro sistema con el colector descubierto, en donde este fue más sensible a los cambios climáticos, presentando variaciones en comparación con el colector convencional.

También existen estudios con referencia al termotanque, como por ejemplo el realizado por M. Issa y M. Al-Nimr [48], el cual fue una investigación analítica-experimental en el campo de temperatura en el interior del tanque de almacenamiento de agua caliente de un calentador solar. En este trabajo utilizaron un termotanque cilíndrico y sus estudios tomaron en cuenta el ambiente en el que se encontraba el sistema, estudiaron la conducción y los modos de transferencia de calor por convección. En los resultados de dicho trabajo las pérdidas de calor se minimizaron evitando el uso de una placa de absorción y tubos de gran longitud. Sin embargo, se observó que el colector diseñado matemáticamente en este estudio es más sensible a la variación en el coeficiente de pérdida de calor global, en comparación de los colectores convencionales, así también el factor de eliminación de calor  $F_R$  del sistema de este estudio tiende a ser más sensible a la variación de la velocidad de masa fluida que en los colectores convencionales.

Así como estos estudios existen otros que dirigen sus proyectos a como obtener una mayor eficiencia en sistemas elaborados con materiales convencionales.

### **1.5. Utilización de Calentadores Solares en México**

El calentamiento del agua por medio del Sol, es una práctica que en países de Europa y Norteamérica se ha venido aplicando desde hace ya algunos años, esto a pesar de ser países que no cuentan con una ubicación con alta radiación solar que les sea favorable para el uso de estos sistemas, sin embargo es en donde más auge han tenido los sistemas de calentadores solares. Caso contrario de México que cuenta con características geográficas idóneas para el uso de estos sistemas de calentadores solares [29].

El estado de Yucatán es uno de los estados en el País que registra una mayor exposición a la radiación solar. Mérida es el centro neurálgico de la zona metropolitana en la que se encuentran conurbados cinco municipios de Yucatán, conteniendo un total de 1,955,577 habitantes en el 2010, la duodécima mayor área metropolitana de México [49].

La ciudad de Mérida se ubica geográficamente a 20° 58' Norte y 89° 37' Oeste, a una elevación de 10 metros sobre el nivel del mar.

El clima de Mérida y en general de la península de Yucatán es caliente y húmedo. La extensión de lluvias es larga y va desde mayo hasta enero aunque no es raro que llueva durante los llamados meses secos como febrero, marzo y abril. Los meses más calurosos son abril y mayo, subiendo a veces la temperatura hasta 40°C, esto se puede observar en la Tabla 3.

**Tabla 3. Resumen Climatológico del 2011 de la Ciudad de Mérida**

Mes	Media Máxima	Media Mínima	Temperatura Máxima	Día	Temperatura Mínima	Día
ENERO	28.8	18.5	33	18	14.5	8
FEBRERO	30.7	19.7	35.2	28	15.6	14
MARZO	33.3	21	39.4	30	16.3	13
ABRIL	37.4	23.8	40.4	27	22.1	8
MAYO	37.5	24.6	40.8	19	21.6	16
JUNIO	34.8	24.8	38.3	23	22.2	12
JULIO	33.7	24.6	35.4	20	22.9	12
AGOSTO	34.6	25	37.1	17	22.9	29
SEPTIEMBRE	32.9	24.6	34.5	5	22.9	8
OCTUBRE	29.8	22.7	34.2	11	18.3	23
NOVIEMBRE	29.9	21.1	33	16	18	30
DICIEMBRE	28.9	19.8	31.7	22	16.8	9
	<b>32.7</b>	<b>22.5</b>	<b>40.8</b>	<b>MAYO</b>	<b>14.5</b>	<b>ENERO</b>

Fuente: <http://www.mda.cinvestav.mx>

El Gobierno Federal para hacer avanzar a la industria en el mercado residencial, creó la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) en el 2002 con la participación de seis principales fabricantes nacionales, la implementación del programa piloto de venta de colectores solares para el sector doméstico, el cual se planteó después de un largo proceso de discusión interna en la CONAE hoy Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE) para tener un programa a gran escala [2].

Para octubre del 2005 surge la primera norma mexicana, elaborada por el Comité Técnico de Normalización Nacional de Energía Solar NESO-13, llamada “Norma Mexicana Energía Solar, Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua. Métodos de Prueba y etiquetado (NMX-ES-001-NORMEX-2005)” [29] esta surge de la ISO 9806-1: 1994.

Posteriormente a raíz de esta primera norma, surgen otras como: las normas “Energía Solar. Definiciones y Terminología” (NMX-ES-002-NORMEX-2006), que surge de la ISO 31-6:1194 e ISO-9488:1999; “Energía Solar. Requerimientos Mínimos para la Instalación de Sistemas Solares Térmicos, para Calentamiento de Agua” (NMX-ES-003-NORMEX-2008) y “Energía Solar. Evaluación Térmica de Sistemas Solares para Calentamiento de Agua” (NMX-ES-004-NORMEX-2010) que desciende de la ISO 9459-2:1995, a excepción de los puntos 1; 7.4-7.6; 7.8.3; 8.0 y 8.4.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Este proyecto consistió en monitorear en el transcurso de un año —de Junio del 2011 a Junio del 2012— las condiciones climáticas en las que dos sistemas de calentadores solares fueron expuestos a condiciones naturales y en uso continuo controlado. Este monitoreo se basó en la captura sistematizada de datos de radiación solar global, viento y temperatura; así como también el monitoreo interno de cada uno de los sistemas mencionados, específicamente los gradientes de temperatura que se presentaron en los termotanques para identificar eficiencias de trabajo en uso continuo. Para ello se implementaron dos sistemas de monitoreo continuo de temperaturas de cuatro puntos por sistema, válvulas de descargas programadas y un formato de circulación forzada con bomba para un sistema de tubo y placa, entre otros.

#### **2.1. Instrumentación**

Este estudio está soportado por una serie de adquisiciones de datos continuos y simultáneos en diferentes puntos de dos sistemas de interés, un calentador solar de tubo y placa hecho en casa y otro de manufactura extranjera. Adicionalmente, una estación climática fue incorporada al estudio la cual cuenta con una capacidad de almacenamiento de datos continuos para estudios extensos.

##### **2.1.1. Sistemas automáticos de adquisición de datos (Data Logger)**

Para el monitoreo de los gradientes de temperatura de cada termotanque se emplearon dos data loggers modelos HH309A de la marca OMEGA, los cuales cuentan con la capacidad de programar y resguardar los datos registrados a intervalos de tiempo definido previamente. Con respecto a la programación, estos sistemas cuentan con la función de salvar datos cada minuto y tienen una memoria total de 16,000 bytes, esto dividido en sus cuatro canales para cada termopar (ver Figura 18). El equipo cuenta con un software, el cual da la facilidad de descargar los datos guardados en su memoria a una PC de forma simplificada. Los termopares de cada equipo fueron situados en diferentes profundidades de los termotanques permitiendo observar el gradiente de temperaturas que se registra dentro de estos, dichos termopares se distribuyeron dentro del

termotanque a una distancia de 18 cm entre cada termopar, con la finalidad de abarcar tres capas de la columna de agua, dividiéndose estas en superficie del termotanque, mitad del termotanque y fondo del termotanque.

Para el caso del sistema de tubos de vacío un cuarto termopar se empleó para monitorear la temperatura ambiente en el lugar donde se encuentran estos sistemas, y para el sistema de tubo y placa, el cuarto termopar se empleó para que registrará la temperatura del agua que viene del colector, llamándole como temperatura del termosifón.



**Figura 18. DataLogger OMEGA**

El tipo de termopar utilizado es de tipo K. Estos termopares tienen la característica de resistir altas temperaturas, su rango de operación va desde los  $-270^{\circ}\text{C}$  a los  $1372^{\circ}\text{C}$ , además de ser de bajo costo. Las puntas bimetálicas de los termopares fueron protegidas con resina.

### **2.1.2. Estación Meteorológica**

Para este estudio se contó con los registros de radiación solar global, así como velocidad y dirección del viento, humedad, temperatura exterior y precipitaciones de la zona, que fueron adquiridos de una estación climatológica de Davis Instruments (ver Figura 19). El equipo proporcionó los datos requeridos para identificar los días característicos, estos datos son recopilados mediante un software propio del equipo en



#### **2.1.4. Bomba Sumergible**

Este dispositivo se empleó para poder realizar el modo de circulación forzada. Fue una bomba sumergible de la marca LAWN Industry, modelo WP-750 la cual funciona a 120 V y consume un total de 10 W, esta bomba tiene un impulso de 1.4 m y un gasto máximo de 750 l/h. Figura 21.

Esta bomba sumergible se instaló dentro del termostato de tubo y placa, de manera tal que el calentador solar pueda funcionar con o sin bomba, funcionando en periodos de 15 días, para abarcar todos los climas posibles del año, intercalando con 15 días con termosifón natural.



**Figura 21. Bomba Sumergible**

#### **2.1.5. Flauta con Timer y sistema de respaldo eléctrico.**

Para la automatización de los dispositivos, de bomba y electroválvulas, se empleó un sistema de multicontacto con timer, el cual da la facilidad de poder programar el encendido y apagado de un equipo; cuenta con un reloj interno y tiene una memoria de 20 pares de programaciones (apagados y encendidos). Las cuales facilitaron la programación de activación de la bomba para modo de circulación forzada, así como también la activación de las electroválvulas que simulan las descargas de agua caliente.

Previendo que el sistema eléctrico puede fallar, y así garantizar que los sistemas eléctricos, principalmente los datalogger, funcionen continuamente durante el período experimental, se utilizó un No-Break de la marca APC con una garantía de respaldo eléctrico de aproximadamente de una hora.



### 2.1.6. Flujómetro

Como parte complementaria del estudio también se tomaron lecturas del flujo que existe por el fenómeno de termosifón, así como el flujo que se genera al ser activada la bomba, estas lecturas se realizaron mediante un flujómetro o caudalímetro de la marca Cole-Parmer, modelo PMR1-010422, con capacidades de lectura de los 3 ml/min a los 210 ml/min, con la característica de soportar hasta 121°C de temperatura (Figura 22) ideal para este trabajo, debido a que se trabaja con temperaturas reportadas de hasta 90°C.



Figura 22. Flujómetro con balín de vidrio

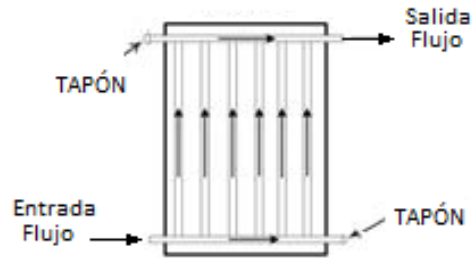
Este dispositivo se instaló en la línea que conecta la salida de agua caliente del colector y el termotanque, lo que permitió medir la variación de flujo termosifónico a diferentes condiciones climáticas.

### 2.1.7. Sistemas de Calentadores Solares

En este proyecto se estudiarán dos tipos de calentadores solares. Uno de ellos es un sistema de Tubo y Placa hecho en laboratorio (ver Figura 24), con un colector de área aproximada de 1 m<sup>2</sup>, de la cual el 95 % aproximadamente es lo que colecta la energía solar, con un arreglo de 9 tubos de cobre de 0.9 m de longitud, insertados en una placa de acero acanalada y pintada con esmalte negro mate, esto último para mejorar la absorción de la radiación solar.

La simetría constructiva empleada en este sistema es de distribución en “Z” (ver Figura 23) en donde el fluido se ve obligado a ascender de forma simétrica en cada uno

de los tubos, lo que es indispensable para que el colector aproveche la mayor cantidad de irradiancia disponible [50].



**Figura 23. Flujo en "Z" [51]**

El colector está cubierto por una caja de aluminio y una cubierta de vidrio (ver Figura 24), este colector tiene una capacidad de almacenamiento de 1.2 litros de agua.



**Figura 24. Sistema Calentador Solar de Tubo y Placa**

Con respecto al termotanque en posición vertical, está elaborado en base a un tanque comercial Rotoplas, con una capacidad de 250 litros, cubierto con una espuma aislante de 25.4 mm, colocado dentro de una caja de aluminio. La capacidad de agua de este termotanque fue adaptada a 150 litros para este estudio, con el fin de igualar la capacidad del otro sistema estudiado aquí.

El calentador solar comercial de tubos al vacío, utilizado en este estudio, es de la marca Thermosol, modelo TH-470-47/1500-20, el cual cuenta con un colector de tubos

con un área de apertura total de  $1.92 \text{ m}^2$ , dicho colector cuenta con 20 tubos con longitud de 1.5 m y 47 mm de diámetro externo, con una capacidad total de agua de 30 litros, según el fabricante. Estos se encargan de recibir la radiación solar y transmitir esa radiación transformada en calor al agua que circula a través de ellos por efecto termosifónico; cada tubo se encuentra conectado directamente al termotanque con una capacidad de 150 litros, con dimensiones de cubierta de 1.50 m de longitud externa por 0.47 m de diámetro externo, y tanque interno de 1.40 m por 0.37 m; relleno de poliuretano entre sus paredes. Este termotanque almacena el agua calentada, el cual con su cubierta aislante evita que el calor se pierda con facilidad [45] (ver Figura 25).



**Figura 25. Sistema de Calentador Solar de Tubos de Vacío [45]**

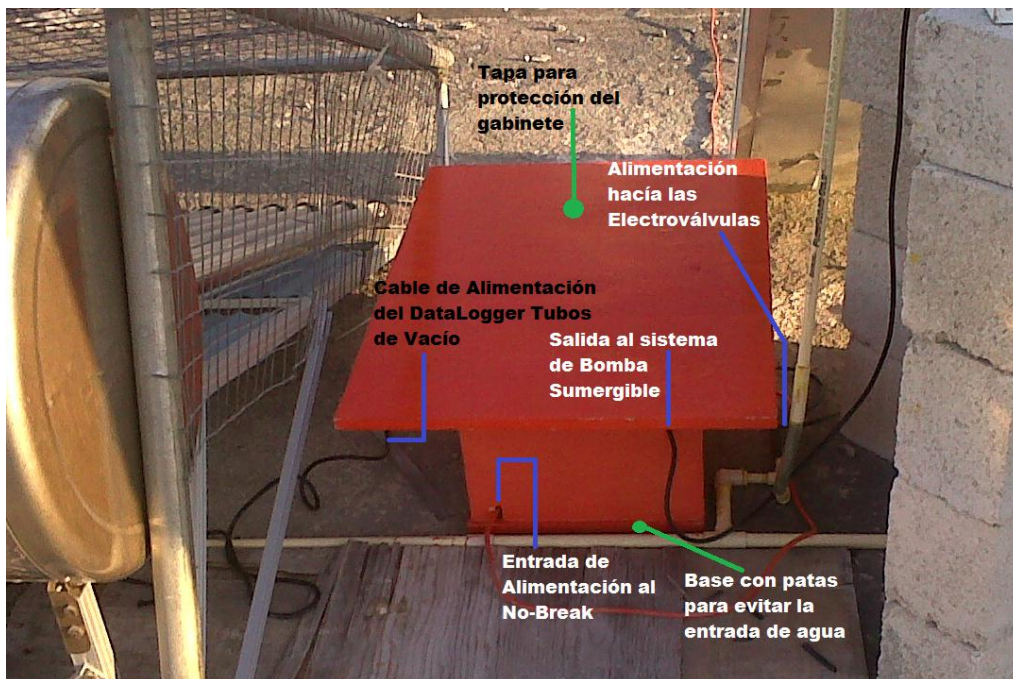
## **2.2. Diseño y construcción de los gabinetes de resguardo**

Ya que los sistemas de monitoreo se encuentran a la intemperie, fue necesario construir unos gabinetes en donde se resguardaron los sistemas. Estos gabinetes fueron diseñados para que soportaran las inclemencias del tiempo, como son la exposición al Sol, las precipitaciones de la zona, así como sus altas temperaturas, con referente a esto último se consideró que estos equipos al estar en constante funcionamiento, irradian calor, ya que son equipos eléctricos, por lo que estos gabinetes también tuvieron que ser capaces de mitigar esas temperaturas y mantener a los equipos en condiciones confortables y así asegurar su óptimo funcionamiento.

Se elaboraron dos tipos de gabinetes, uno para resguardar los sistemas eléctricos (no-break y timers), con dimensiones de 50 cm de largo, 27 cm de ancho y 30 cm de alto, y otro donde se resguardó uno de los datalogger (sistema de tubos de vacío) de 25 cm de largo, 10 cm de ancho y 6 cm de alto. Solo se resguardó uno ya que el datalogger que monitoreó el sistema de tubo y placa fue instalado en una cámara que se forma entre el

material aislante del termotanque y la tapa de aluminio; para este datalogger se condicionó de manera tal que la humedad interna no afectara al equipo, esto mediante un recubrimiento plástico, apoyado con la utilización de sílice absorbente.

Al gabinete se le hicieron algunas perforaciones para poder pasar los cables tanto de alimentación al no-break, como las salidas hacia los dataloggers, las electroválvulas y a la bomba sumergible, así también se le colocó patas y una doble tapa, con la cual se buscó evitar el contacto del agua en caso de lluvias y el sobrecalentamiento por la radiación solar (ver Figura 26).



**Figura 26. Gabinete de control con respaldo eléctrico**

De igual manera al gabinete del datalogger asignado al calentador de tubos de vacío se le realizaron las mismas modificaciones, para el mejor cuidado y rendimiento del equipo (Figura 27).



**Figura 27. Gabinete del DataLogger**

### **2.3. Instalación y ubicación de los sistemas de monitoreo**

Como parte complementaria de este proyecto se requirió de una estación meteorológica. Un factor importante que se tomó en cuenta para la instalación de este equipo fue que se ubicará en un punto en el cual las lecturas no fueran afectadas por obstrucciones de árboles y edificios, ya que estos podían obstaculizar el paso de la luz solar, así como las corrientes de viento y caída de agua al pluviómetro.

El lugar indicado para la colocación de la estación fue en uno de los edificios con mayor altura del Instituto (ver Figura 28), ya que cuenta con buena ubicación y con fácil acceso para cualquier problema que se presente o simplemente dar mantenimiento a la

estación, esta se localiza a 21.02879 Norte y 89.6374 Oeste. Esto a 40 metros aproximadamente de los calentadores solares estudiados aquí.



**Figura 28. Ubicación de los sistemas**

Para la instalación de la consola receptora, quien es la que envía y recibe los datos directamente de la estación y los envía vía IP a la red, se requirieron realizar pruebas en las cuales se pretendió encontrar las condiciones en las cuales no existiera perdidas de señal, ya que el fabricante indica que la distancia máxima que debe existir entre estos equipos son de 300 m al aire libre (sin obstáculos) y si existe obstáculos como paredes, arboles, etc. es de 120 m., así también se buscó un lugar en donde la humedad y la temperatura no afectara a la consola. Actualmente la consola se localiza dentro del mismo edificio en donde instaló la estación, en un área donde existe ventilación y se encuentra a la vista de cualquier persona.

Para el buen funcionamiento de los calentadores solares a lo largo del año, la consideración más importante es el ángulo de incidencia del Sol. A continuación se expone en la Tabla 4 la inclinación que debe tener el colector dependiendo de la latitud de la zona y el mes [20]. El ángulo preferencial que se tomó debido a que el ángulo promedio da igual al ángulo de la latitud de la zona, se colocaron ambos colectores a un ángulo de 30°.

**Tabla 4. Ángulo de operación del colector en la zona [20]**

Lat.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
15°	36.26	28.28	17.81	5.59	-3.79	-8.31	-6.51	1.22	12.79	24.59	34.14	38.33
16°	37.26	29.28	18.81	6.59	-2.79	-7.31	-5.51	2.22	13.79	25.59	35.14	39.33
17°	38.26	30.28	19.81	7.59	-1.79	-6.31	-4.51	3.22	14.79	26.59	36.14	40.33
18°	39.26	31.28	20.81	8.59	-0.79	-5.31	-3.51	4.22	15.79	27.59	37.14	41.33
19°	40.26	32.28	21.81	9.59	0.21	-4.31	-2.51	5.22	16.79	28.59	38.14	42.33
20°	41.26	33.28	22.81	10.59	1.21	-3.31	-1.51	6.22	17.79	29.59	39.14	43.33
21°	42.26	34.28	23.81	11.59	2.21	-2.31	-0.51	7.22	18.79	30.59	40.14	44.33
22°	43.26	35.28	24.81	12.59	3.21	-1.31	0.49	8.22	19.79	31.59	41.14	45.33
23°	44.26	36.28	25.81	13.59	4.21	-0.31	1.49	9.22	20.79	32.59	42.14	46.33
24°	45.26	37.28	26.81	14.59	5.21	0.69	2.49	10.22	21.79	33.59	43.14	47.33
25°	46.26	38.28	27.81	15.59	6.21	1.69	3.49	11.22	22.79	34.59	44.14	48.33
26°	47.26	39.28	28.81	16.59	7.21	2.69	4.49	12.22	23.79	35.59	45.14	49.33
27°	48.26	40.28	29.81	17.59	8.21	3.69	5.09	13.22	24.79	36.59	46.14	50.33
28°	49.26	41.28	30.81	18.59	9.21	4.69	6.49	14.22	25.79	37.59	47.14	51.33
29°	50.26	42.28	31.81	19.59	10.21	5.69	7.49	15.22	26.79	38.59	48.14	52.33
30°	51.26	43.28	32.81	20.59	11.21	6.69	8.49	16.22	27.79	39.59	49.14	53.33
31°	52.26	44.28	33.81	21.59	12.21	7.69	9.49	17.22	28.79	40.59	50.14	54.33
32°	53.26	45.28	34.81	22.59	13.21	8.69	10.49	18.22	29.79	41.59	51.14	55.33
33°	54.26	46.28	35.81	23.59	14.21	9.69	11.49	19.22	30.79	42.59	52.14	56.33

Al igual que la estación meteorológica, se ubicaron en un punto en el cual no fueran afectados por sombras de árboles u otros edificios, así también se buscó un lugar, como se ve en la Figura 28, en el cual estos sistemas estuvieran en uso (antes de comenzar el proyecto), esto para evitar el acumulamiento de agua caliente y así garantizar que los sistemas no sufrieran daño alguno, esto por el acumulamiento de calor del día a día.

Finalmente los sistemas de monitoreo quedaron instalados como se muestra en la Figura 29, y la distribución eléctrica quedó como se muestra en la Figura 30.



Figura 29. Ubicación final de los calentadores solares y sistemas de monitoreo

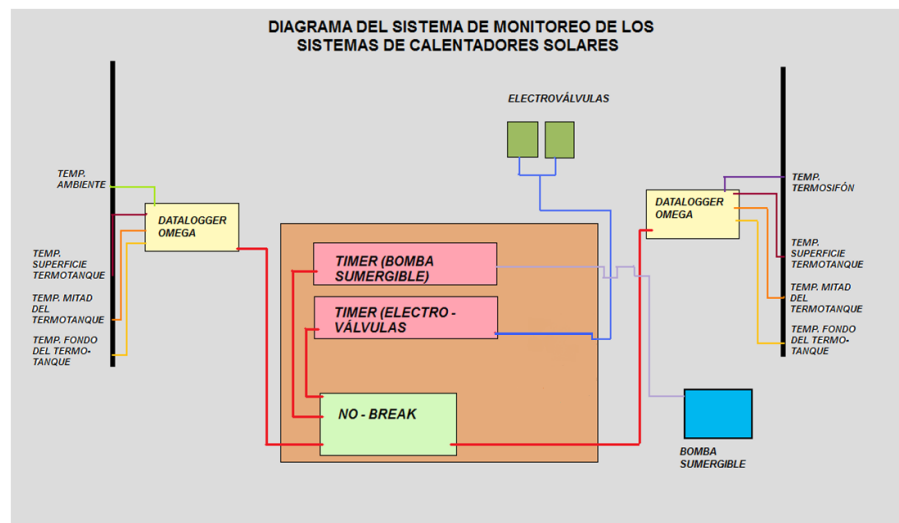


Figura 30. Distribución eléctrica de los sistemas

## 2.4. Metodología de evaluación de los sistemas.

### 2.4.1. Monitoreo de temperaturas de los termotanques

Para el monitoreo y adquisición de datos, los dos dataloggers fueron programados para que almacenen datos cada minuto, con un tiempo limitado de 11 días usando cuatro canales, antes de que se llene la memoria del dispositivo, sin embargo se procuró realizar la descarga de datos a la PC cada semana, para garantizar la colección de datos con



continuidad. Este estudio implementó dos modalidades; flujo natural (por termosifón) y flujo forzado (por bomba). Para ello se crearon periodos de 15 días entre cada modalidad de funcionamiento, de forma continua a lo largo del año de estudio, en el caso del sistema de tubo y placa.

Para este estudio, se implementaron descargas controladas sincronizadas de los dos sistemas de calentadores, descargando aproximadamente 20 litros de agua a las 7:00 am y otros aproximadamente 20 litros a las 8:00 pm. Esto de forma periódica para simular un uso típico de los calentadores en una residencia.

Con respecto al sistema de tubos al vacío simplemente se realizaron descargas de datos semanales en un solo formato, el de flujo natural. Como se mencionó anteriormente, los termopares de estos datalogger son cuatro por dispositivo, los cuales fueron distribuidos como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5. Distribución y aplicación de los termopares**

SISTEMA	TERMOPAR	FUNCIÓN
<b>TUBOS DE VACÍO</b>	T1	Mide la temperatura ambiente
	T2	Mide la temperatura del agua en la superficie del termotanque
	T3	Mide la temperatura del agua a la mitad del termotanque
	T4	Mide la temperatura del agua en el fondo del termotanque
<b>TUBO Y PLACA</b>	T1	Mide la temperatura del agua en el fondo del termotanque
	T2	Mide la temperatura del agua a la mitad del termotanque
	T3	Mide la temperatura del agua en la superficie del termotanque
	T4	Mide la temperatura del agua que viene del colector (termosifón)

## 2.4.2. Circulación Forzada

Esta modalidad se realizó cada 15 días, para saber los intervalos de funcionamiento de bomba, se realizaron pruebas preliminares y se consideraron los tiempos de horas con Sol. La prueba consistió en activar la bomba en un período de alta radiación, donde se estimó que alrededor de los 5 minutos el agua caliente concentrada en el colector ya estaba siendo removida, bajando a temperaturas ambientes de alrededor de los 38 °C.

Utilizando la bomba Lawn, se programó, por medio de un timer, para que funcione durante 5 minutos cada media hora, desde las 8:50 de la mañana hasta las 4:30 de la tarde, tratando de cubrir horas en las cuales la radiación en la zona es relativamente alta.

A la falta de resultados positivos, se realizó un cambio de bomba, por la descrita en la sección de materiales, respetando la misma programación, así como una nueva configuración en la alimentación de cada sistema (ver Figura 31).

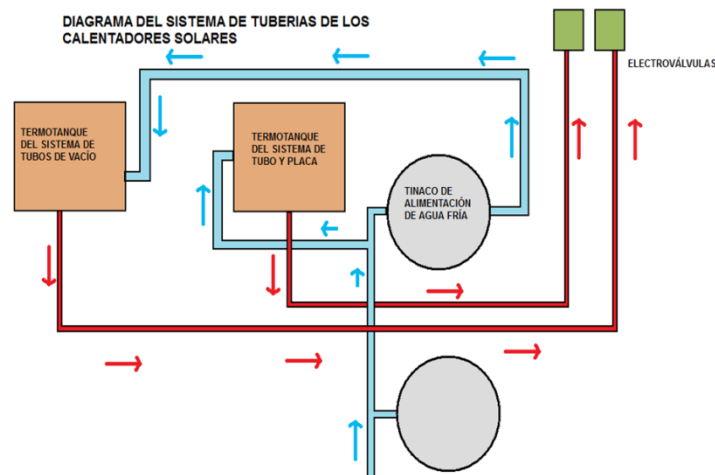


Figura 31. Distribución de las tuberías de alimentación de los sistemas

Con los resultados preliminares que se lograron obtener del funcionamiento de bomba, se logró estimar los tiempos idóneos en los que la bomba impulsaría agua al termotanque con un mayor de flujo, en los tiempos en lo que la radiación solar global llega con mayor intensidad al colector. Por lo que el cronograma de activación de la bomba quedó como se muestra en la Tabla 6 y en la Figura 32 se muestra una representación gráfica de un

comportamiento ideal de la radiación solar diaria. La tabla muestra dos clasificaciones, las laterales de tiempo más corto (3 minutos) e intervalos largos (cada 40 minutos), mientras que para la columna central la activación de la bomba es mas largo (5 minutos) e intervalos cortos (20 minutos).

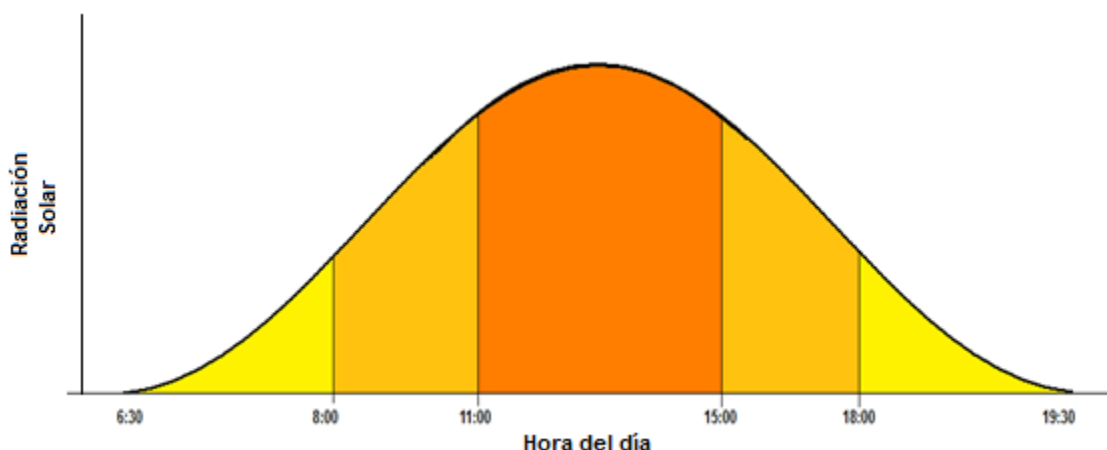


Figura 32. Curva representativa de la distribución de la radiación solar

Tabla 6. Distribución de los tiempos de operación de la bomba

Tiempos de funcionamiento de la bomba		
Baja radiación en la mañana	Horas Pico Solar	Baja radiación en la tarde
8:00 – 8:03	11:00 – 11:05	15:00 – 15:03
8:43 – 8:46	11:25 – 11:30	15:43 – 15:46
9:26 – 9:29	11:50 – 11:55	16:26 – 16:29
10:09 – 10:12	12:15 – 12:20	17:09 – 17:12
10:52 – 10:55	12:40 – 12:45	17:52 – 17:55
	13:05 – 13:10	
	13:30 – 13:35	
	13:55 – 14:00	
	14:20 – 14:25	
	14:45 – 14:50	

### 2.4.3. Descargas de agua caliente

Para la simulación de descargas de agua caliente, se realizaron pruebas de cuanta agua consume una persona al tomar un baño, arrojando un total de 20 a 30 litros de agua por baño. Tomando en cuenta que el agua se combina con agua fría (asumiendo 10 litros de cada una), se decidió utilizar un total de 20 litros de agua caliente por descarga, siendo esta cantidad representativa para el baño de dos personas. Esto se programó midiendo el tiempo requerido para descargar estos 20 litros en ambos sistemas por separado (tubo y

placa y tubos al vacío). Otro factor que se tomó en cuenta es el horario en el que el uso de agua caliente para el baño diario se requiere para el baño en la zona de la península, quedando finalmente que las electroválvulas se abran durante dos minutos en los horarios de 6:30 y otra a las 20:00 horas.

#### **2.4.4. Monitoreo climatológico**

Como ya se mencionó anteriormente, para este proceso se empleó una estación de la marca Davis, modelo Vantage Pro 2, con cual se obtuvieron datos de temperatura, radiación, viento y precipitación, por minuto. Solamente de estos cuatro factores, ya que son los que mayormente afectan el funcionamiento de los sistemas. La descarga de estos datos a la PC se realizó diariamente, para evitar la saturación de datos en la memoria del dispositivo.

#### **2.4.5. Medición de flujo de agua**

Estas pruebas se realizaron aleatoriamente en días que se clasificaron en días soleados, mixtos y nublados, para obtener un estimado de la cantidad de agua que es impulsada bajo dichas condiciones en una configuración de circulación natural. Para estas pruebas se calibró el flujometro tomando lecturas para cada nivel de flujo. Para poder medir lecturas desde el inicio, se cubrió el colector en un horario de alta radiación para que al destapar éste, se pueda observar el incremento de flujo y a su vez ir adquiriendo los datos característicos de flujo en este sistema.

#### **2.4.6. Procesamiento de los datos**

Para los datos colectados (temperatura, velocidad del viento, precipitación, radiación solar global máxima, irradiancia e irradiación de cada día) se implementó una base de datos en Excel, donde se fueron exportando los datos de la estación climatológica durante el año del estudio.

Posteriormente en base a la cantidad de irradiación percibida se procedió a clasificar los días. En la literatura se clasifica como día soleado cuando la radiación máxima registrada sea más de  $700 \text{ W/m}^2$ , un día mixto los días que presente una radiación

máxima de entre los  $300 \text{ W/m}^2$  y  $700 \text{ W/m}^2$ , y como días nublados cuando la radiación máxima percibida sea menor de los  $300 \text{ W/m}^2$  [52] (ver Figura 33).



Figura 33. Irradiación solar global a diferentes tipos de cielo [53]

## **CAPITULO 3**

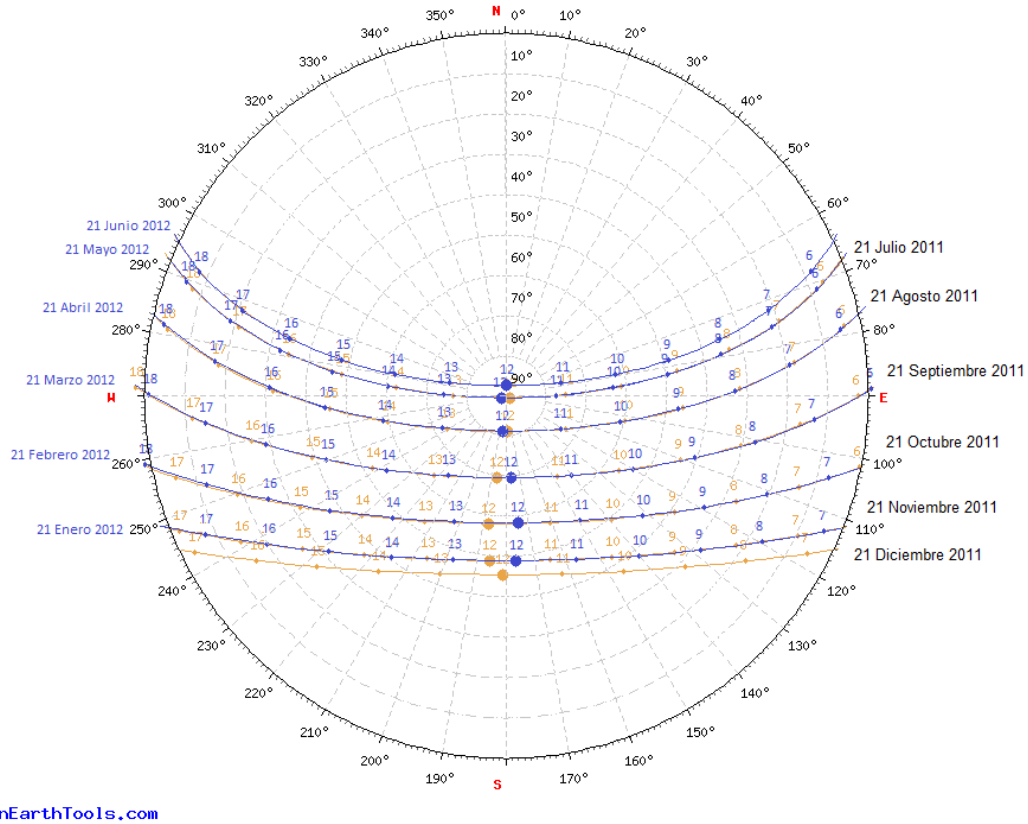
### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Esta sección de resultados muestra y discute el comportamiento de dos sistemas de calentadores solares y las condiciones que los afectan. Estos dos sistemas son representativos en este ámbito debido a su popularidad, el calentador solar de tubos al vacío por ser el sistema más tecnológico de alta eficiencia en sistemas de baja temperatura. Y por otro lado se encuentran los calentadores de placa plana (o tubo y placa), los cuales se caracterizan por su versatilidad para ser construidos, aunque de inferior eficiencia en comparación a los primeros. El comparativo muestra los pros y contras de cada sistema, incluyendo sus desempeños y desventajas. Los resultados presentados fueron obtenidos dentro del período de Julio del 2011 a Junio del 2012, de los cuales se tomaron como base los días de los meses con mayor irradiación para obtener valores promedios representativos y así posteriormente clasificarlos en día soleado, mixto y nublado, analizando el comportamiento del sistema de tubo y placa en cada caso.

#### **3.1. Condiciones climáticas durante el período de estudio**

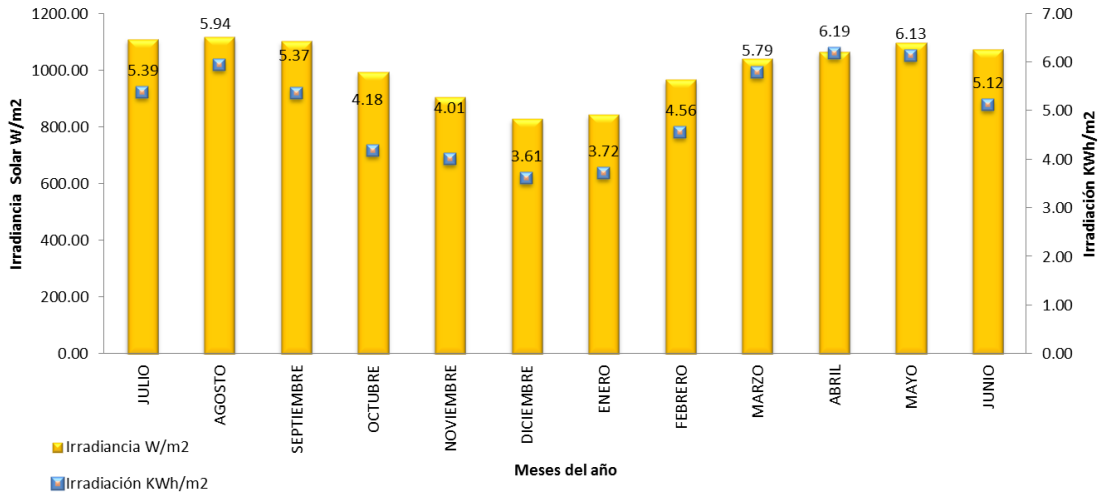
A continuación se presenta la variación de las condiciones climáticas de la zona durante el periodo de estudio, la inclinación de la Tierra así como el movimiento de rotación y traslación, son causas de que se perciba una variación en la radiación solar. Para el caso de Mérida, Yucatán con latitud  $21^{\circ}$  Norte, el ángulo solar que se puede percibir es el mostrado en la Figura 34.

En la Figura 34 se puede observar como a diferentes épocas del año, el ángulo de inclinación varía, dependiendo la hora y el mes, para este caso se obtuvo las tendencias del período de estudio. Según la literatura, se toma los días 21 de cada mes, para que estos coincidan con los días de cada equinoccio, que son estos eventos cuando la Tierra se encuentra ya sea más alejada o más cerca del Sol [50].



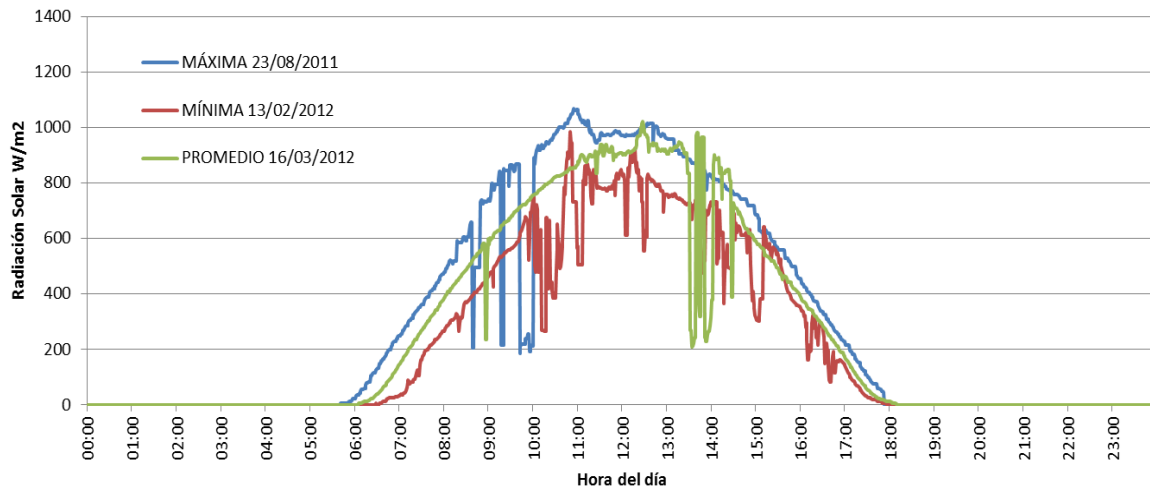
**Figura 34. Disco Solar representativo de la zona de estudio [54]**

Como ya se mencionó Julio del 2011 fue el mes inicial de estudio, donde la cantidad de irradiancia promedio fue de  $1109.77 \text{ W/m}^2$ . En la Figura 35 se presenta una gráfica de la radiación solar global promedio mensual que incidió sobre los sistemas de calentadores solares, esta se obtuvo de un total de 43 200 datos colectados por mes. En ella se puede observar que para los meses de Julio y Agosto se presentó la mayor cantidad de radiación, sin embargo los meses con mayor irradiación fueron los meses de Abril y Mayo, y en el mes de diciembre y enero se pudo observar una baja cantidad de radiación solar. Durante este período de estudio se obtuvo una irradiación promedio de  $5.02 \text{ KWh/m}^2$ .



**Figura 35. Disponibilidad de la Irradiancia e Irradiación Solar durante el período de estudio**

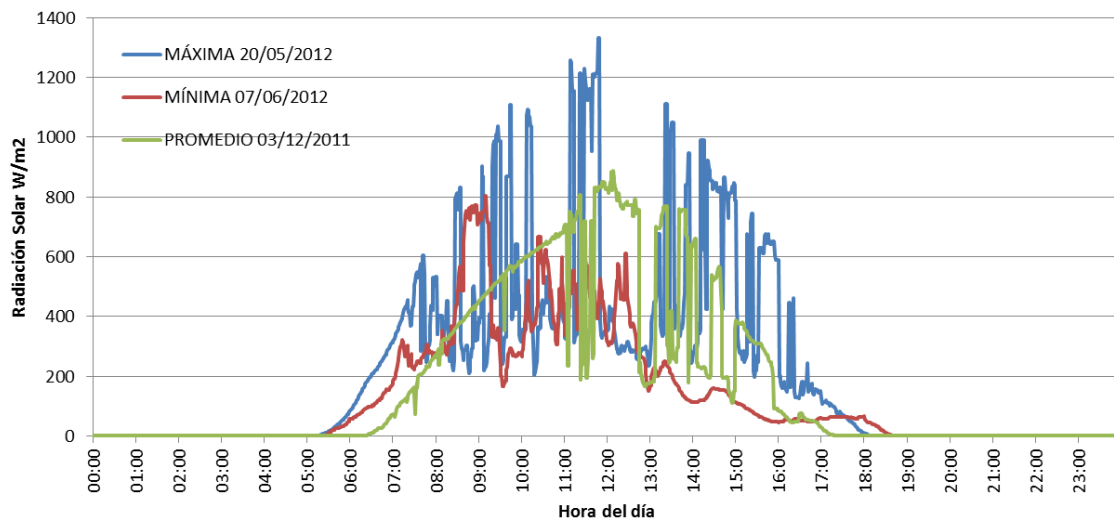
Para la clasificación de los días, se tomó en cuenta la irradiación que fue percibida, esta es calculada por medio del área bajo la curva, puesto que en la literatura es la que proporciona un dato real de la energía solar percibida en un día. Para un día soleado, se tomaron como días representativos los mostrados en la Figura 36, se obtuvo una máxima de 7.46 KWh/m<sup>2</sup>, una mínima de 6.41 KWh/m<sup>2</sup> y una irradiación promedio de 6.94 KWh/m<sup>2</sup>. Donde se puede apreciar que las horas de mayor radiación son alrededor de las 12:00 y 13:00 horas, lo que indica que en esas horas los colectores aprovechan más la energía del Sol, ya que en estas horas es cuando este se encuentra cercano a la perpendicularidad con el colector.



**Figura 36. Representación de la disponibilidad energética de un día típico soleado**

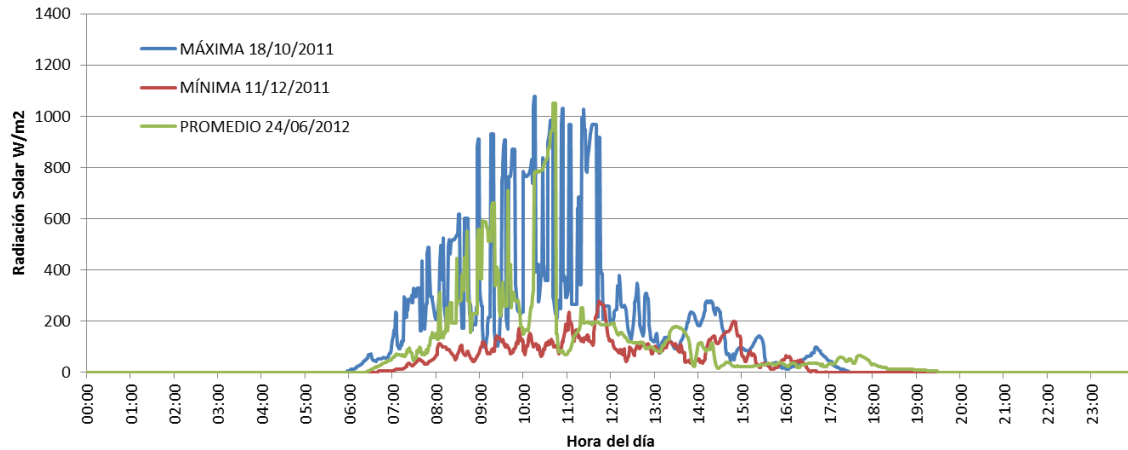


Para los días mixtos, basándose que la máxima irradiación registrada fue de 7.46 kWh/m<sup>2</sup>, y realizando un simple despeje, se tiene el comportamiento energético ilustrado en la Figura 37. Aquí se muestran las fluctuaciones de radiación que se pudieron percibir y que cumplían con las condiciones de un día mixto o semisoleado, para este escenario se obtuvieron las siguientes irradiaciones; máxima de 5.20 kWh/m<sup>2</sup>, una mínima de 3.08 kWh/m<sup>2</sup> y un promedio de 4.14 kWh/m<sup>2</sup>.



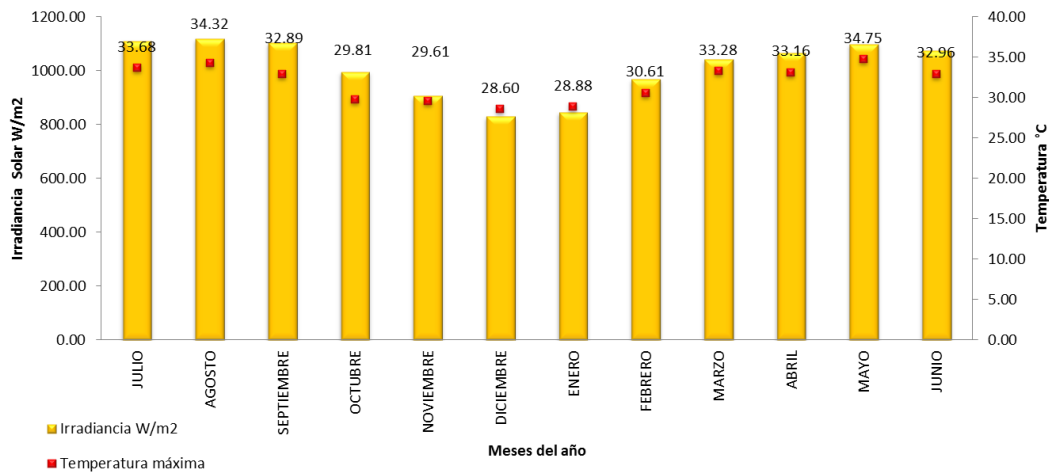
**Figura 37. Representación de la disponibilidad energética de un día mixto**

En un día nublado, que también se podría considerar de baja radiación, como en los meses de Diciembre y Enero, se pudo observar el comportamiento de la Figura 38. Obteniendo una irradiación máxima de 2.97 kWh/m<sup>2</sup>, una mínima de 0.85 kWh/m<sup>2</sup> y un promedio de 1.87 kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 38. Representación de la disponibilidad energética de un día nublado**

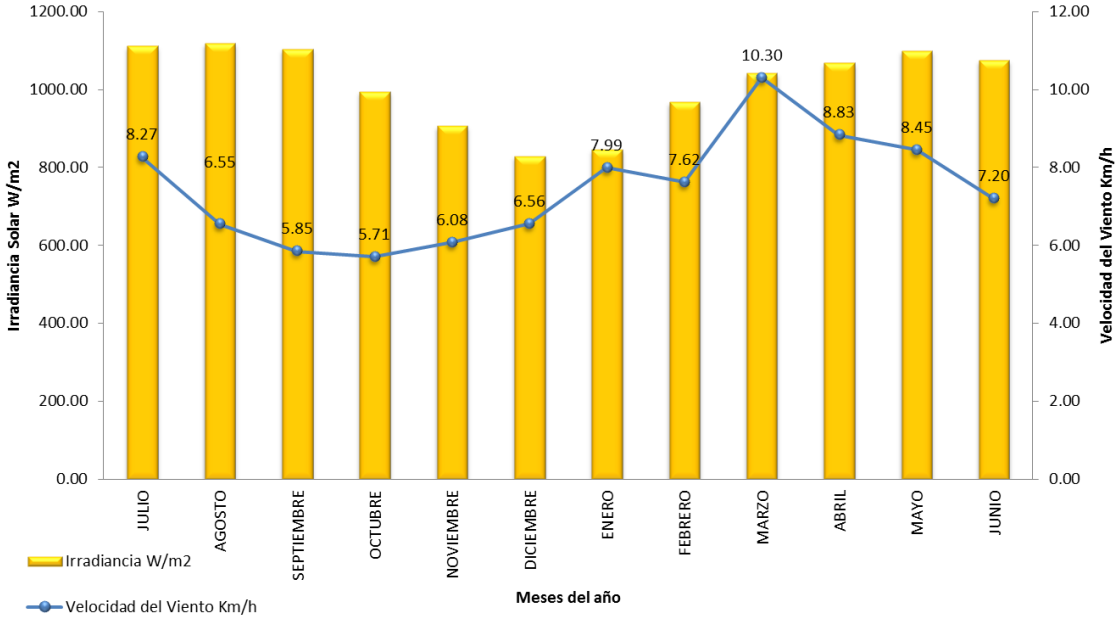
A continuación se muestran las gráficas de promedios mensuales de radiación, pero comparados con otros factores que llegan a afectar los sistemas de calentadores solares, tales como son la temperatura ambiente (ver Figura 39), donde se puede apreciar como la temperatura máxima para la zona es en cierto punto constante, y como es relativamente proporcional a la radiación percibida.



**Figura 39. Gráfica comparativa de la irradiancia promedio mensual y la temperatura promedio mensual máxima registrada**

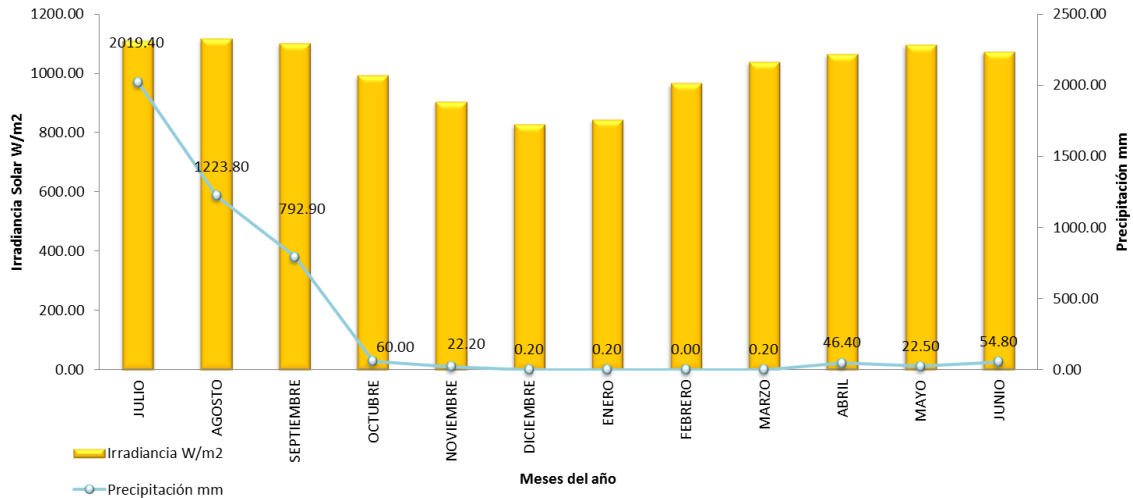
La presencia de viento (ver Figura 40) también es común, para este caso se plasma las velocidades que mas se repetían, es decir la que mas predominaba por mes, en

donde se puede observar como es que en los meses donde la radiación solar es alta, las corrientes de viento disminuyen, debido a que las masas de aire se mueven según las variaciones de temperatura.



**Figura 40. Gráfica comparativa de la irradiación promedio mensual y la velocidad del viento predominante mensual registrada**

Las precipitaciones en la zona (ver Figura 41), a pesar de ser una zona calida sub-húmeda, son solo en ciertas épocas del año, siendo Julio, por lo general, el mes donde mas lluvia se presentan, la forma en la que se representó la cantidad de lluvia, por la literatura consultada, es una sumatoria de todo lo registrado, en este caso, en cada mes.



**Figura 41. Gráfica comparativa de la irradiancia promedio mensual y la precipitación total mensual registrada**

### 3.2. Comportamiento de los sistemas de calentadores solares

En esta sección se mostrará la parte comparativa del estudio, en el cual de un día característico, se plasma el comportamiento de cada sistema de calentadores solares estudiado, esto para el caso de la modalidad de circulación natural (por termosifón).

Para el caso de circulación forzada, simplemente se plasmará como ayuda al sistema y que beneficios trae su implementación, en cuestión de temperaturas registradas en el termotanque del sistema de calentador solar de tubo y placa.

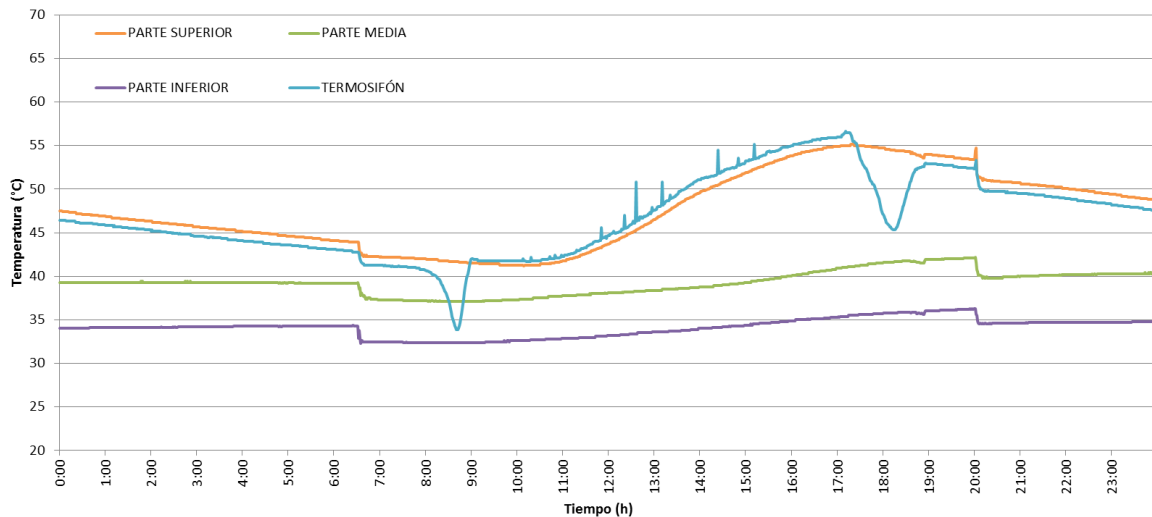
#### 3.2.1. Sistema de Calentador Solar de Tubo y Placa.

Las irradiaciones mostradas en este capítulo fueron calculadas a partir de la irradiancia global percibida en el piranómetro de la estación meteorológica Davis. Para un día característico soleado, en este es tomado el 11 de octubre del 2011, se registró una irradiación de  $5.62 \text{ kWh/m}^2$  estando dentro de los rangos de irradiación para estas condiciones, el sistema de tubo y placa se comportó como se muestra en la Figura 42, donde se aprecia que la temperatura del termotanque aumenta hasta llegar a una temperatura máxima de  $55^\circ\text{C}$  con la línea de color azul, entregada por el colector al

termotanque. Esta temperatura varía entre los 50 y 60°C en un día soleado, dependiendo del ángulo de incidencia entre otros factores a considerar.

En la Figura 42, también se puede observar otras líneas las cuales representan las temperaturas de los diferentes niveles del termotanque. Estas diferencias son atribuidas al flujo laminar que el termosifón entrega con el agua caliente. La línea de color naranja es del sensor termopar instalado en la superficie, la línea verde es la parte media y la línea morada es el sensor que registró la temperatura del fondo del termotanque. Es interesante poder observar el importante diferencial de temperatura que se forma de superficie a fondo siendo de aproximadamente de 20°C de temperatura.

El motivo a que se aprecie como aumenta la temperatura después de las 12 horas del día, hora que se puede considerar como la hora donde mayor radiación se puede coleccionar, debido a que el Sol se encuentra mas cercano a la perpendicularidad al colector, es por el retardo de reacción calorífica que tiene el sistema, ya que al ser un sistema en modalidad pasiva, el termosifón no cuenta, hasta después de ese tiempo, la suficiente energía para generar un flujo para impulsar el agua caliente al termotanque.



**Figura 42. Comportamiento del Sistema de Tubo y Placa en un día soleado**

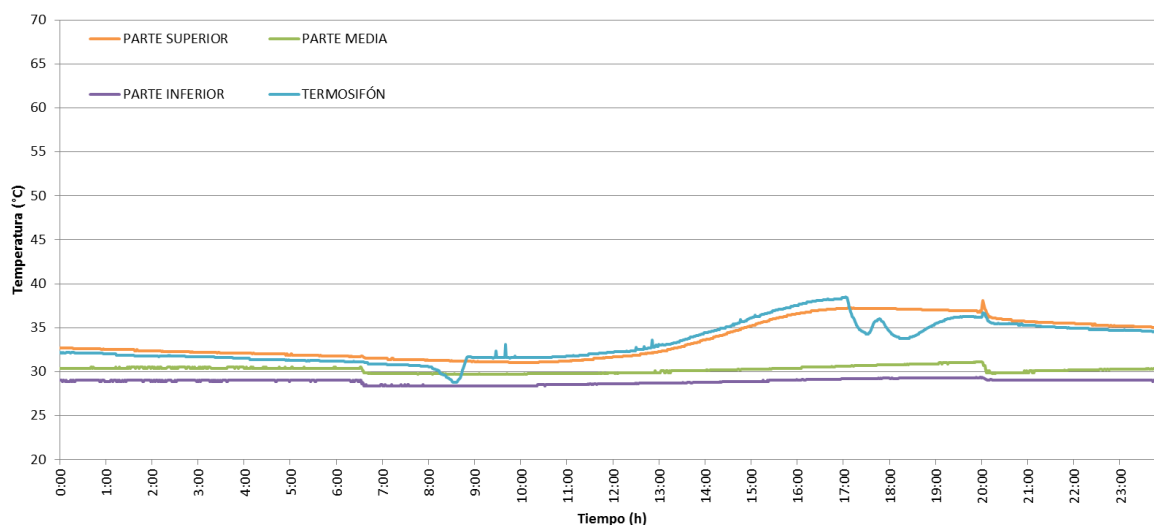
En cada una de las curvas el cambio de temperatura a las 6.30 y 20:00 horas, ocasionado por las descargas programadas como parte de la simulación del funcionamiento del sistema, se puede observar como un decremento moderado de temperatura debido al remplazo de agua durante este evento (las líneas naranja, verde y morada). Por causa de este evento se puede también apreciar un pico negativo en el sensor de la entrada de agua del colector (línea azul), es por el agua fría que entra al sistema, el cual se origina porque este compensa la pérdida de volumen en el termotanque inmediatamente después de las descargas.

En la literatura se menciona que para una ducha común, el volumen necesario para mantener el agua a una temperatura confort de 38°C se requiere utilizar un 54% de agua caliente y un 46 % de agua fría [55], aunque esto es relativo a la temperatura de las dos fuentes hídricas a mezclar, por lo que para este estudio se determinó emplear una cantidad de 20 litros agua fría y caliente, es decir 50% de cada una. Donde se descargan 20 litros en cada sesión, representando dos duchas a la vez. Igual de interesante resultó observar como cada sensor termopar de los tres ubicados en el termotanque (superficie, medio y fondo), registraron el cambio de temperatura en las descargar de agua.

Para un día típico mixto se escogió entre los días estudiados, el día 17 de octubre del 2011, con una irradiación de 4.05 kWh/m<sup>2</sup>, donde el sistema de tubo y placa presentó un comportamiento similar al mostrado en la Figura 43, en donde es apreciable que el flujo de termosifón fue de baja energía, reduciendo la cantidad de agua impulsada al termotanque, reflejándose en la temperatura de los termopares incluidos en la figura, esto provocó que el sistema no pudiera superar mas de los 40°C en la parte superior del agua en el termotanque.

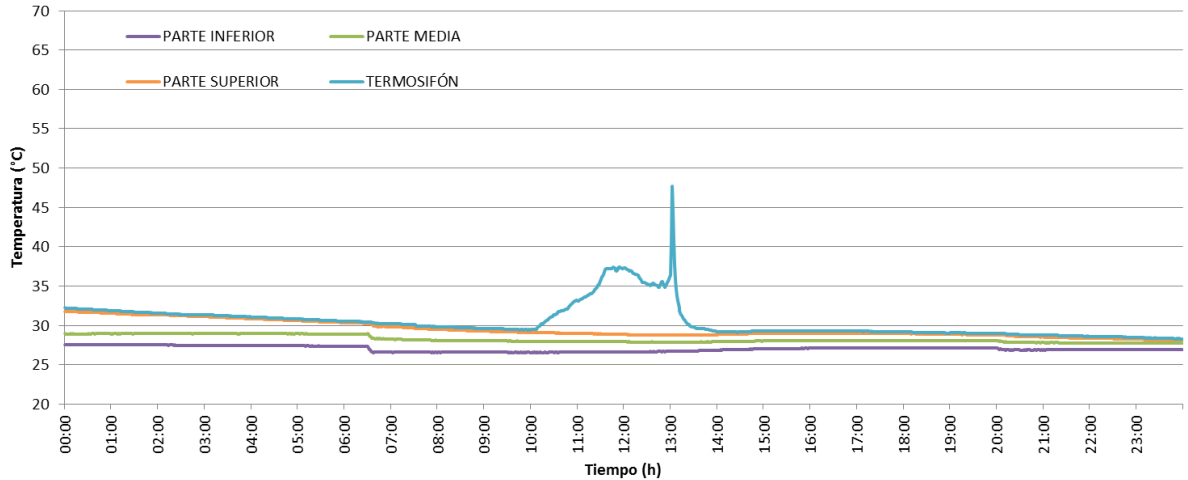
Uno de los problemas detectados en el arreglo del calentador solar de tubo y placa, es el del diferencial de altura que se generó de la salida del colector a la entrada del termotanque, la cual fue de 76 cm, donde se cree que aunque el sistema está en un circuito cerrado y continuo, a mayor altura en el diferencial del termosifón, mayor energía será requerida, reduciendo así la eficiencia del sistema en funcionar mas óptimo en días mixtos (soleado/nublado).

En la figura a continuación, también se puede observar las temperaturas de los diferentes niveles del termotanque. De igual manera, la línea de color naranja indica La temperatura de la parte superficial del termotanque, la línea verde la mitad de este, la línea morada el fondo y la línea azul representa la temperatura del agua que viene del colector. Aquí el diferencial de temperatura entre el fondo y la superficie de la columna de agua del termotanque disminuye, a consecuencia de la baja energía capturada por el colector, por lo que la temperatura en la superficie disminuyó.



**Figura 43. Comportamiento del sistema de Tubo y Placa**

En el día típico nublado se tomó como representativo el día 6 de diciembre del 2011, con una irradiación de 2.21 kWh/m<sup>2</sup>, donde el sistema presentó problemas, ya que la energía solar percibida generó un empuje térmico bajo (línea azul), el cual no fue el suficiente para mostrar cambio alguno en la temperatura del agua, por lo que no existió diferencial alguno entre las capas del termotanque (superficie, mitad y fondo), prácticamente se mantuvo a temperatura ambiente sin rebasar los 30°C (ver Figura 44). En base a los datos adquiridos, determinando los días nublados y de baja irradiancia, se determina que alrededor de un 7.38% del año el sistema no tendrá la capacidad para aportar agua caliente.



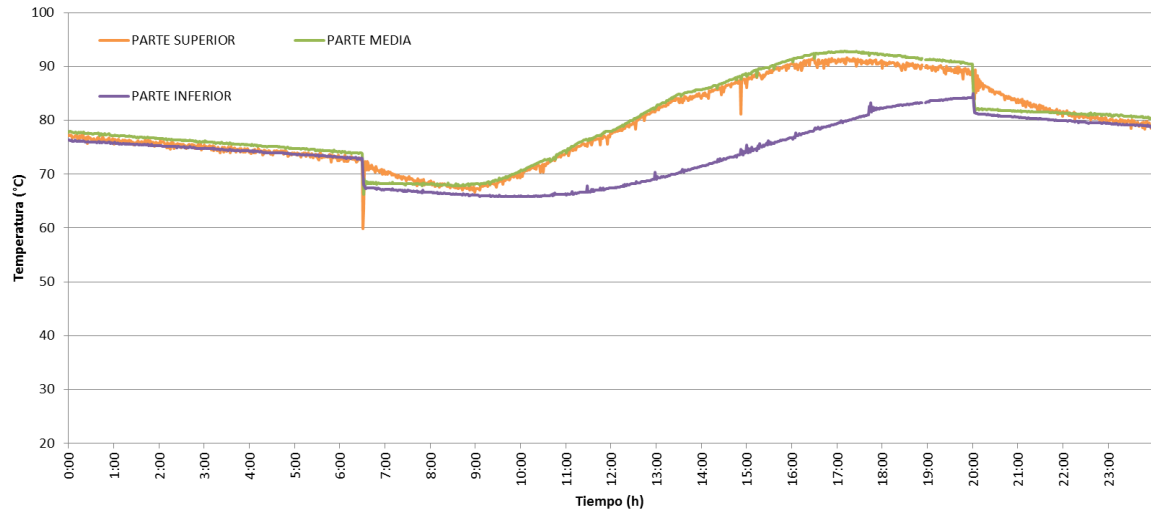
**Figura 44. Comportamiento del sistema de Tubo y Placa en un escenario de baja radiación**

### 3.2.2. Sistema de Calentador Solar de Tubos de Vacío

Para el sistema comercial de tubo de vacío, se realizó el mismo monitoreo en los días anteriormente descritos para una comparación directa, donde para un día soleado, el diferencial de temperaturas fue similar al mostrado en la Figura 45. Acá se puede observar el incremento importante de temperatura alcanzada en la superficie del termotanque, siendo de alrededor de los 94°C, temperatura muy por encima de lo permitido y estipulado para calentadores residenciales, debido al alto riesgo de sufrir quemaduras de primer grado. Adicionalmente, el sobrecalentamiento del agua ocasiona deterioro generalizado en este tipo de sistemas, más importantemente sus sellos de hule, donde a mayor temperatura, menor densidad del agua y mayor precipitación de los sólidos contenidos en ésta, donde la mayoría son carbonatos de calcio.

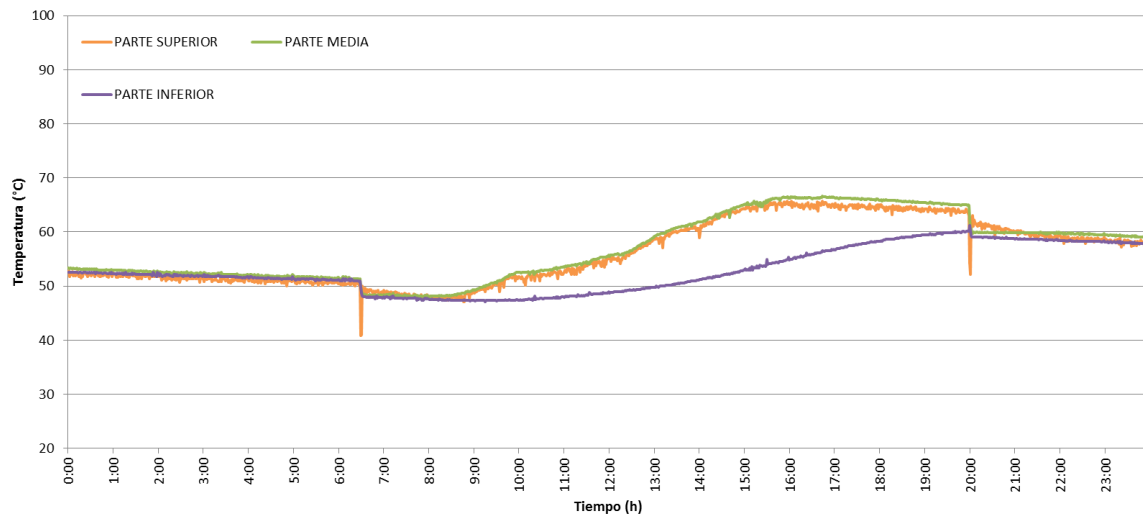
Se puede observar en este termotanque horizontal, con una columna de agua, de 37 cm, longitud que permite una homogenización mayor del agua en comparación al sistema de tubo y placa que presenta una columna de agua de 49 cm y mayor diferencial de temperaturas. Por otro lado, este sistema de termotanque horizontal, solo se encuentran disponibles en una versión cerrada, impidiendo el acceso al interior del termotanque para la eliminación de sarro que se acumule, situación muy común en la región de Yucatán, destinando al equipo a saturarse de éste sustrato.





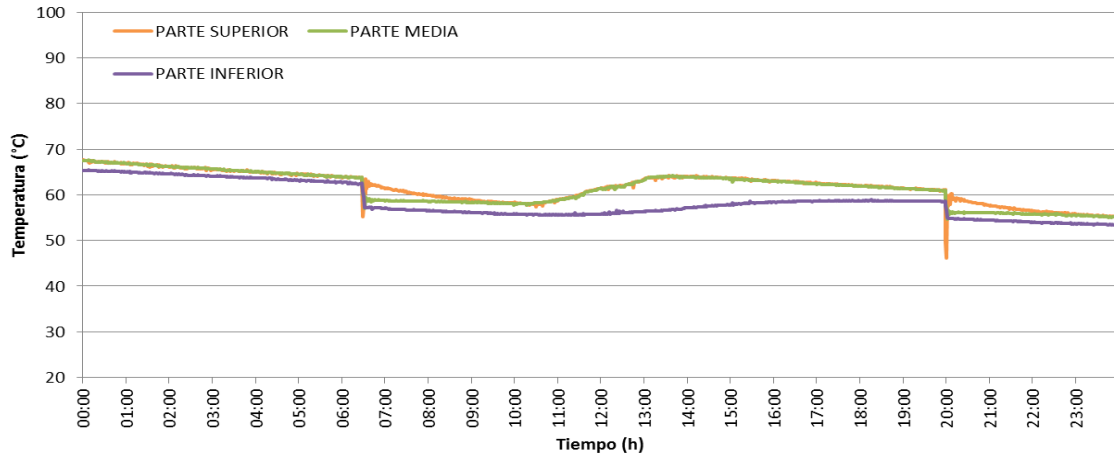
**Figura 45. Comportamiento del sistema de tubos de vacío en un escenario típico soleado**

Para el día mixto, el sistema de tubo de vacío mostró un comportamiento como el de la Figura 46, en donde al igual que en la figura anterior, y a pesar de que la columna de agua es menor, se aprecia un diferencial entre la superficie (línea naranja) y el fondo del termotanque (línea morada), no hasta después de realizar las descargas programadas. Sin embargo sigue manteniendo una temperatura aproximada entre los 60 y 70°C.



**Figura 46. Comportamiento del sistema de tubos de vacío en un día mixto**

En un día nublado, este sistema al igual que el de tubo y placa, se puede observar que no se registra una aportación importante energética, esto soportado por el constante decremento de la temperatura en el termotanque, donde, si bien la temperatura es alta, es por consecuencia de que un día anterior fue un día con buena radiación solar, ya que se observa que la temperatura inicial fue cerca de los 70°C (ver Figura 47).



**Figura 47. Comportamiento del sistema de tubos de vacío en día nublado**

En este sistema también se incorporó un protocolo de descargas controladas a las 6.30 a.m. y 8 p.m. —20 litros en cada sesión— observado en todas las curvas. Es observable como en este sistema las temperaturas de la parte superior e inferior generan un diferencial menos importante que su contraparte de tubos y placa. Esto principalmente, por contar con un tanque horizontal, reduciendo la distancia entre la superficie y el fondo.

Es importante resaltar que no siempre es deseable tener temperaturas tan elevadas, como es el caso de un día soleado particularmente del calentador solar de tubos al vacío (Figura 45), donde se puede apreciar que durante la tarde de ese día, la temperatura del agua rebasó los 90°C (en la superficie y medio fondo), temperatura considerada no apta para un calentador de agua residencial, por el peligro que esto implica, debido al riesgo que conlleva la posibilidad de quemaduras importantes si se pone en contacto con la piel durante una ducha. También es importante mencionar que según la norma UNE 100.030, se establece que “el agua se debe almacenar a una temperatura igual o mayor a 60°C y distribuir a una temperatura tal que en el retorno al sistema de acumulación el agua esté a 50°C”; algo similar menciona la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 en el Anexo III,

menciona la temperatura promedio de operación, en donde en el caso de colectores domésticos, esta debe de ser de 50°C. Este comportamiento mostrado por el sistema en un día soleado en una región cálida de alta radiación, demuestra que este tipo de sistemas no son aptos para usarse en regiones como Yucatán. Por otro lado, la consecuencia de usar temperaturas tan elevadas conlleva a otras problemáticas; deterioro de partes como sellos plásticos, mayor precipitación e incrustación de minerales (sarro).

La tecnología de tubos conectados individualmente al termotanque, como es el caso de los de tubos al vacío, permite maximizar el aprovechamiento de la energía solar electromagnética, ofreciendo menor resistencia al termosifón de baja energía, como lo observado en el caso de un día nublado en la Figura 47, manteniendo la temperatura en cada caso arriba del confort de ducha (por encima de los 40°C).

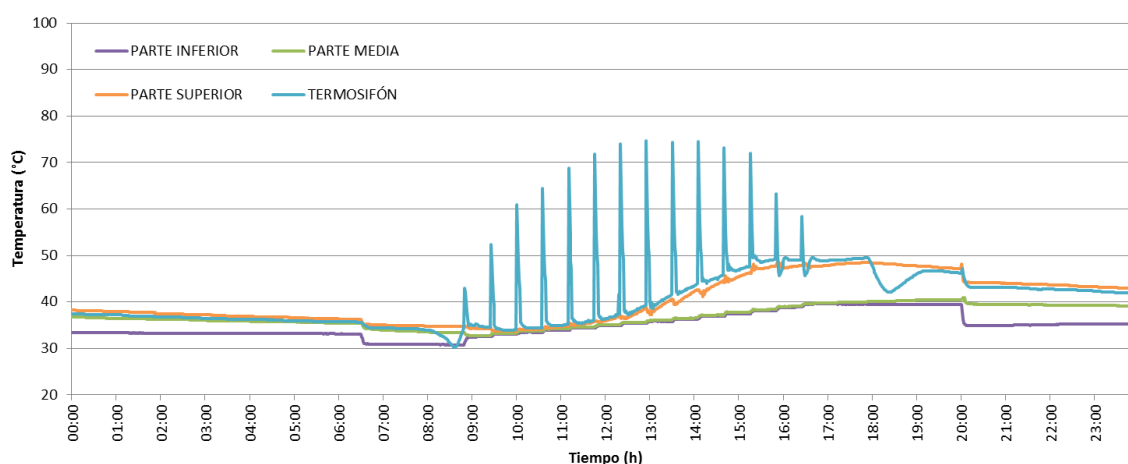
Se puede apreciar para el sistema de tubo al vacío, que en un día nublado (Figura 47), no hubo una energía suficiente para generar incremento de temperatura, donde se aprecia el constante descenso de la temperatura en el agua del termotanque a lo largo del día, caso similar al de tubo y placa para el mismo día evaluado.

### **3.3. Modo de circulación forzada**

Para esta parte del proyecto se presentarán las ventajas que trajo el uso de bomba miniatura sumergible que ayude al aprovechamiento del agua caliente que el termosifón desaprovecha por generar un flujo de baja velocidad.

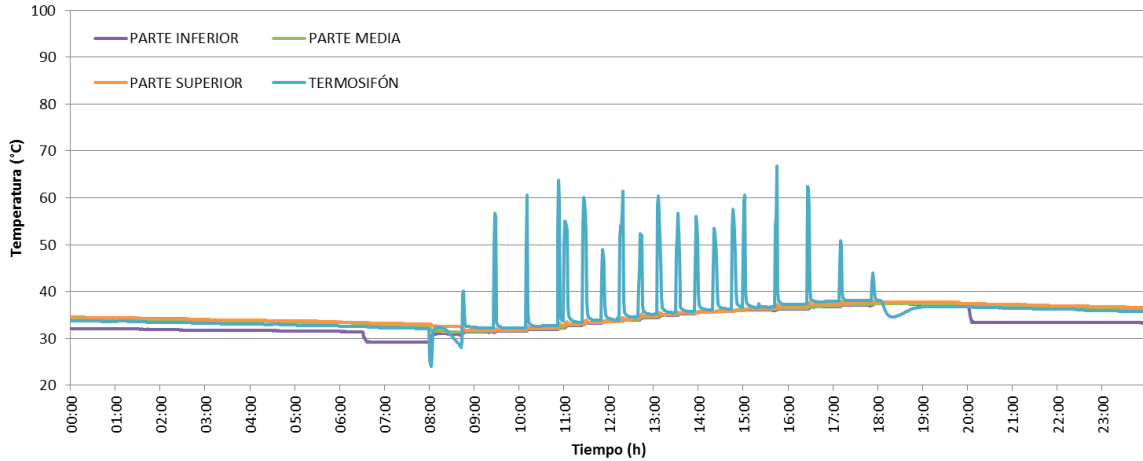
Para un día soleado, se tomó como día característico el 04 de septiembre del 2011, con una irradiación de 7.12 kWh/m<sup>2</sup>. En este día, el sistema registró el comportamiento mostrado en la Figura 48, donde se aprecia las activaciones de la bomba como picos repentinos en la gráfica. A pesar de que se obtiene la misma temperatura máxima que con termosifón, se puede apreciar como las temperaturas de la mitad y del fondo del termotanque se llegan a homogeneizar a 40°C, contando así en forma global, con mayor energía acumulada, donde en teoría, se pudiera aprovechar todo el volumen de agua en el termotanque.

Este formato implementado tiene espacio de mejorar su eficiencia, donde esto se logra con la incorporación de un termostato, el cual dará la orden puntual para el arranque y paro de la bomba con ayuda de un sensor inmerso en el colector solar. Debido a que este primer acercamiento mostró el potencial de energía que no es aprovechado por el termosifón, reflejado en picos que llegan a los 75°C, se piensa que con la implementación de un termostato, se optimizaría los tiempo de encendido y apagado de bomba y el traslado de la energía calorífica acumulada en el colector, al termotanque.



**Figura 48. Circulación forzada en un día típico soleado**

Para un día mixto, como día característico se tomó el 21 de octubre del 2011, con una irradiación de 4.56 kWh/m<sup>2</sup>. Al igual que en la figura anterior, aquí se puede observar que las temperaturas del termotanque tienden a homogeneizarse, permitiendo la rápida estabilización de la temperatura, manteniendo una temperatura cercana a los 40°C a pesar de realizar la descarga programada de las 20:00 horas (ver Figura 49).

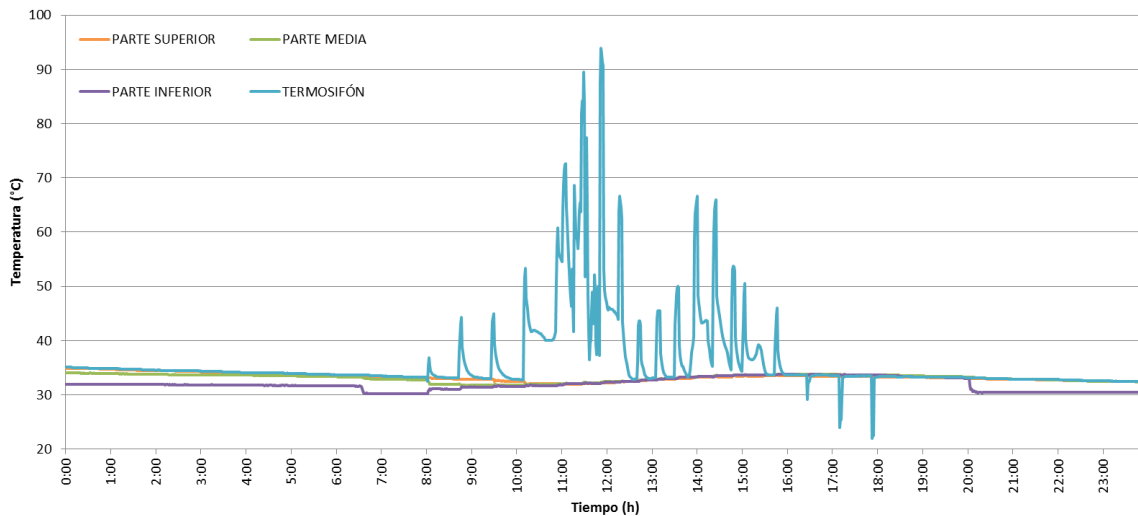


**Figura 49. Circulación forzada en un día mixto**

En un día típico nublado se puede observar el beneficio en el sistema de tubo y placa, donde la principal función de la bomba es ayudar al agua caliente del colector, y poder ser transferida al termotanque. Para este día, 27 de noviembre del 2011 se obtuvo una irradiación total de 2.86 KWh/m<sup>2</sup> con una temperatura máxima no mayor a los 30°C.

El comportamiento del sistema es notorio, ya que a pesar de ser un día en el cuál la irradiación fue relativamente baja, se logró aprovechar la energía de tal forma que se obtuvo dentro del termotanque una temperatura alrededor de los 35°C (ver Figura 50).

Cabe mencionar que el flujo en el sistema pasa de ser un flujo laminar a un flujo turbulento, combinando el agua del termotanque, por ello se puede apreciar que alrededor de las 16:00 horas cuando se dejó de usar la bomba, las temperaturas estaban prácticamente unificadas.



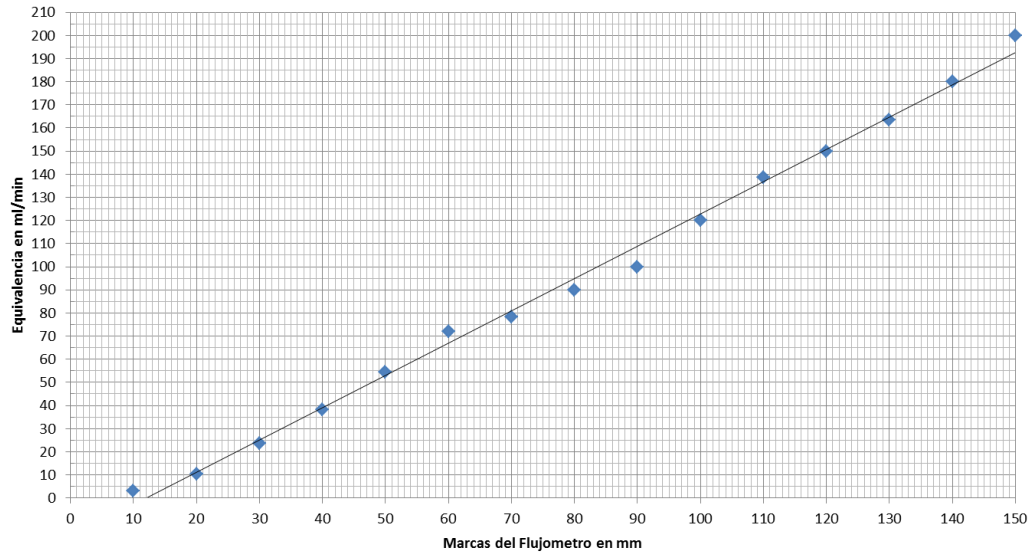
**Figura 50. Circulación forzada en un día nublado**

Es importante resaltar que el potencial del colector de tubo y placa, presenta acumulación de altas temperaturas, alrededor de los 70°C, con picos de 90°C entre las 11:00 y las 12:00 horas, sin embargo no se observó una mejora significativa en la temperatura global del agua del termotanque, esto pudiendo ser por la cantidad de flujo con que la bomba contribuyó, la cual no logró desplazar cantidades significativas, y a los tiempos de activación de la bomba.

### 3.4. Pruebas con Flujometro

Como parte complementaria del proyecto, se necesitaba saber el flujo generado en el sistema, en condiciones específicas para determinar la activación del flujo termosifónico en base a la radiación disponible en el sistema particular de tubo y placa estudiado aquí. Por lo que se instaló un flujometro de flotador de vidrio con marcas de escalas de 0 a 150 mm, sin válvula variable.

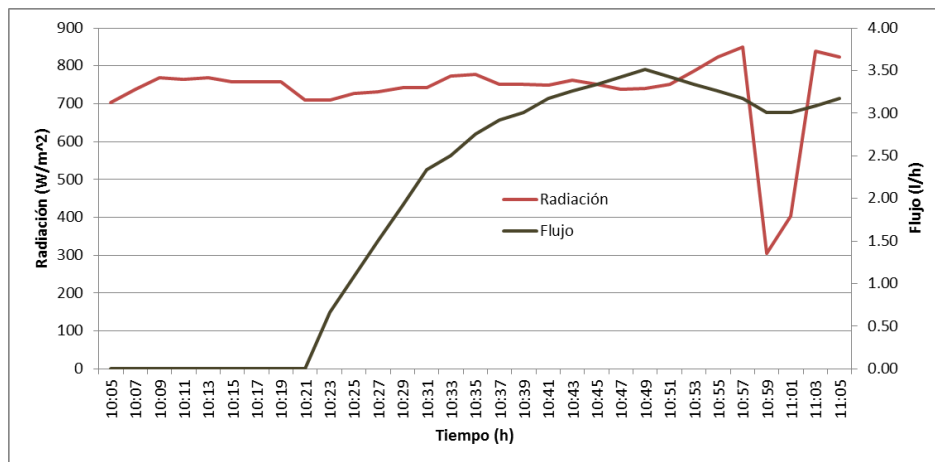
Se realizaron pruebas con este dispositivo, para obtener su tabla de calibración, arrojando los datos presentados en la Figura 51.



**Figura 51. Tabla de Calibración del flujómetro**

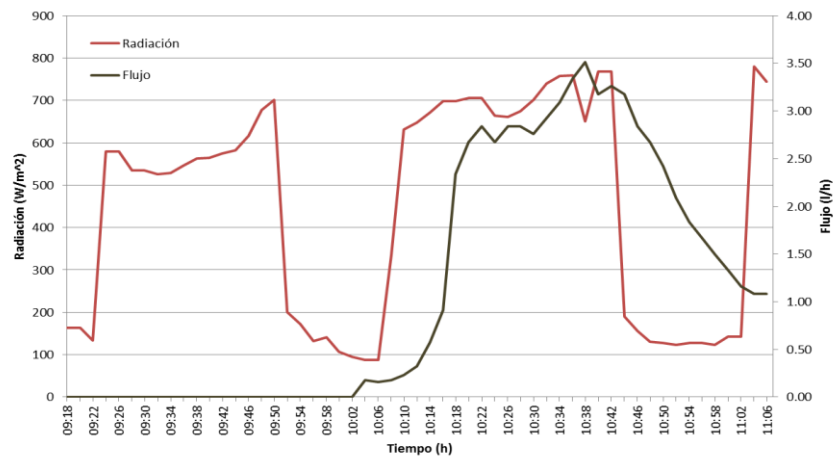
Para estas pruebas se realizaron registros de datos durante horas específicas, en las cuales se considera que existe mayor radiación solar que incida sobre el colector. Ya teniendo las gráficas se procedió a clasificarlas y poder así obtener los comportamientos del flujo del colector a diferentes condiciones.

En un día soleado, se obtuvo lo mostrado en la Figura 52, en donde se observa que el flujo máximo alcanzado fue de 3.5 litros por hora, lo que nos da un comportamiento aproximado de la potencia con la que el efecto termosifón empuja el agua, también es importante ver la relación que existe con la radiación solar.



**Figura 52. Comportamiento del Flujo en un día soleado**

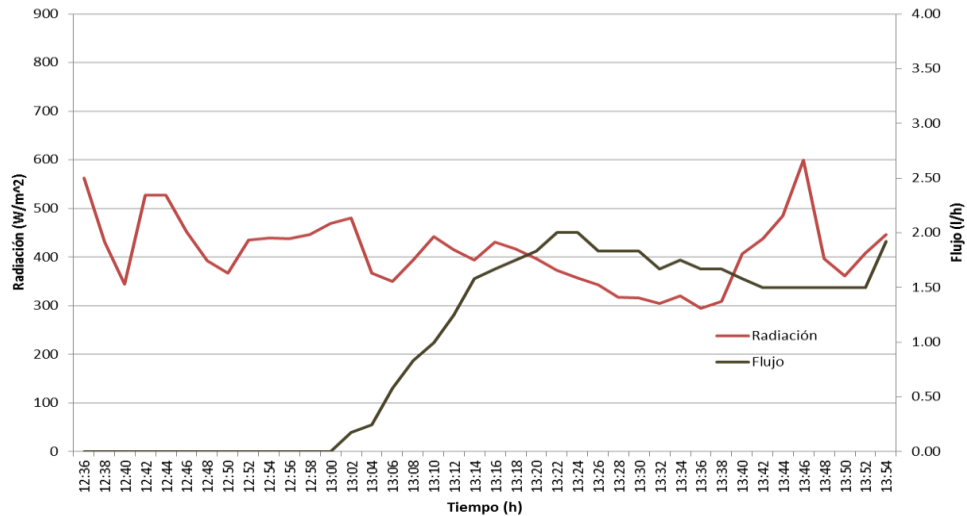
Para un día mixto, el flujometro arrojó los valores mostrados en la Figura 53 en la cual se observa como se llega a registrar un flujo similar al de un día soleado, sin embargo el tiempo de inicio del efecto de termosifón presenta un retardo, no ser hasta 22 minutos después donde empieza a existir flujo, además de que no llega a estabilizarse como en lo observado en la Figura 52, en este caso si llega a afectar la presencia de nubes, ya que el colector no alcanza a absorber la suficiente radiación solar, lo que provoca que el flujo disminuya hasta a 1 litro por hora.



**Figura 53. Flujo en un día mixto**

Para el caso de un día nublado, Figura 54, podemos observar, además de la tardía respuesta en el flujo del termosifón, se puede observar que la velocidad también disminuye, arrojando una máxima de 2 litros por hora, por lo que se necesitaría tener un lapso de 10 horas de radiación solar para tener un volumen de 20 litros de agua caliente en el termotanque, lo que para 150 litros de agua que almacena el termotanque, resulta insignificante y nos arrojaría un resultado como el observado en la Figura 44.





**Figura 54. Comportamiento del flujo en un sistema de tubo y placa en un día nublado**

Es importante también observar como es que la radiación solar percibida es directamente proporcional al flujo de agua caliente en el sistema; es decir, que la inercia térmica se presenta pero no es prolongado, ya que el tiempo de respuesta del flujo es rápido, también que los retardos observados en el flujómetro es consecuencia del aislamiento que el colector tiene, ya que funciona como un acumulador de energía mientras la va disipando por diferentes medios, entre ellos, el termosifón.

Para una modalidad de circulación forzada, se midió un flujo de alrededor de 11.56 litros por hora, situación que aplicando bien la activación de la bomba y una radiación solar ideal de  $1000 \text{ W/m}^2$  se puede acumular agua caliente en aproximadamente 2 horas y en 8 horas con esta radiación solar tendríamos cerca de los 92.48 litros de agua caliente a una temperatura de aproximadamente  $60^\circ\text{C}$ , suponiendo que sea un día ideal y de alta radiación solar.

Como trabajo a futuro, se planea implementar un controlador de temperatura mecánico, termostato. Este podrá controlar de manera eficiente la acumulación de calor en el contenedor y activar la bomba en el momento requerido para su remoción, a diferencia del estudio actual, donde indiferentemente si hay o no nublado, un timer activa la bomba en las horas del día donde se supone pudiera aprovecharse la radiación.

### 3.5. Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica del sistema de calentador solar de tubo y placa se define como la cantidad de calor útil obtenida, dividida por la cantidad de calor incidente en él. La diferencia entre ambas es, obviamente, las pérdidas de energía hacia el ambiente circundante [51]. Y se expresa de la siguiente manera [56]:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{I \cdot A_c}$$

$$Q_{util} = m \cdot C_p (T_{salida} - T_{entrada})$$

Donde:  $m =$  gasto másico o flujo (Kg/s)

$C_p =$  calor específico a presión constante (J/(°C · Kg))

$I =$  Irradiancia (W/m<sup>2</sup>)

$A_c =$  Área del colector (m<sup>2</sup>)

$T_{entrada} =$  Temperatura del agua que entra al colector (°C)

$T_{salida} =$  Temperatura del agua que sale del colector (°C)

A continuación se presenta un resumen (Tabla 7) de los resultados representativos a las 12:00 horas, hora en la cual se considera que el Sol incide con mayor intensidad sobre el colector, de entre los días del 18, 19 de Noviembre, 3 y 8 de Diciembre del 2011.

**Tabla 7. Resumen de la eficiencia térmicas en los días de pruebas de flujómetro**

Fecha	Irradiancia puntual en la hora de estudio (W/m <sup>2</sup> )	Irradiación del día (kWh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Salida (°C)	Diferencial de temperatura (°C)	Gasto (kg/s)	Calor específico (J/ Kg °C)	Área del colector (m <sup>2</sup> )	Eficiencia Térmica (%)
18/11/2011	517	2.88	27.5	29.6	2.1	0.00016667	4184	1	0.28
19/11/2011	234	4.29	26.7	38.5	11.8	0.00066667	4184	1	14.07
03/12/2011	828	4.14	27.4	78.7	51.3	0.001	4184	1	25.92
08/12/2011	680	4.39	25.1	72.8	47.7	0.00085	4184	1	24.95

Aquí se puede apreciar como a diferentes irradiancias la eficiencia varia, debido a la relación que tiene el flujo con la irradiancia aprovechada por el colector, tal como se observó en el tema anterior, por lo que queda establecido que la eficiencia es

directamente proporcional a la irradiación disponible. El promedio de agua fría de estos días fue de 26.67°C, por lo que en relación con la temperatura alcanzada en el sistema, obtenemos incrementos igual o mayores de 50%.

Con referente a la eficiencia, se considera que está dentro de los rangos permisibles, ya que para los días en los que se realizaron estas pruebas, fueron días en los que la irradiación es baja, retomando de los temas anteriores, fueron días entre semi-soleados y nublados.

## CONCLUSIONES

Con este proyecto se comprueba una vez más que las energías renovables son capaces de competir con las fuentes de energía convencionales, en este caso en particular aprovechando la energía solar. El proceso realizado en este trabajo ayudó para evaluar el funcionamiento de un sistema de tubo y placa elaborado en laboratorio, obtener su eficiencia y compararla con un sistema de tubos de vacío comercial. Se pudo determinar las temperaturas máximas, mínimas y promedio del sistema experimental, lo cual permitirá realizar los ajustes pertinentes para maximizar su aprovechamiento. Entre una de las ventajas que el sistema de tubo y placa presentó fue el bajo costo de elaboración y por consiguiente al tratarse de materiales locales, ante cualquier desgaste o desperfecto, se puede cambiar la pieza dañada. Otra ventaja es que su colector se encuentra cubierto, lo que impide que los tubos estén expuestos directamente al ambiente y el calor no se disipe con tanta rapidez, validando el hecho de que un solo vidrio es suficiente para su buen funcionamiento.

Con respecto a las pruebas realizadas a estos sistemas, se puede ver claramente que el sistema de tubo de vacío es superior al sistema de tubo y placa, sin embargo para la zona de la península de Yucatán, las temperaturas máximas alcanzadas por este sistema de tubos de vacío, además de superar las permitidas por la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 aplicada para la evaluación de los calentadores solares residenciales, vuelven a este equipo inadecuado para zonas cálidas, ya que alcanza temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua; a diferencia del sistema de tubo y placa que alcanza temperaturas que se encuentran dentro de lo establecido en la norma para ser empleada en la ducha diaria en una casa-habitación.

Para el modo de circulación forzada, se observó una mejoría en las temperaturas del termotanque, se logró reducir el diferencial de temperatura entre el fondo y la superficie de la columna de agua del termotanque, llegando a homogenizarla en poco tiempo, contando con mayor energía disponible. Recordando que las temperaturas máximas registradas por el termopar instalado en la entrada de agua del colector al termotanque, al momento de activarse la bomba, alcanzaba entre los 70 y 75°C, se requiere optimizar el funcionamiento de ésta, mediante un sistema automatizado por termostato, lo que

además de evitar el encendido innecesario de la bomba en días nublados; en días soleados y mixtos se activará cuando la temperatura del agua en el colector se encuentre a la temperatura deseada hasta que se absorba la mayor cantidad de energía disponible.

El uso del calentador solar de tubo y placa elaborado en el CICY para una zona cálida sub-húmeda, es capaz de remplazar a los calentadores de agua convencionales de gas o eléctricos, ya que como se observó en los resultados obtenidos, alcanza una temperatura de 50°C, incluso se podría emplear como un sistema ahorrador reduciendo costos de consumo de energía, esto al ser colocado en conjunto a un sistema convencional, disminuyendo la activación del termostato de este último, ya que el agua proveniente del calentador solar ya estaría precalentada y solo se consumiría gas o electricidad cuando el agua no este a las temperaturas deseadas entre los 40 y 50°C, ó en los casos, como se observó en este trabajo, de días de completo nublado, donde ningún calentador solar funciona.

Con respecto a la eficiencia térmica obtenida en el sistema de tubo y placa, es de fácil apreciación que el sistema de tubos de vacío es superior, sin embargo el sistema de tubo y placa esta dentro de los estándares permitidos según la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005.

También queda evidente que el calentamiento del agua depende de la irradiación percibida por el colector y la temperatura del agua tiene afectaciones mínimas provocadas por las condiciones ambientales como el viento o la temperatura ambiente, lo que facilita la predicción de cuál será el comportamiento de este sistema en irradiaciones solares similares.

Dentro de lo que este proyecto puede aportar para estudios futuros, se encuentran las bases informáticas para poder implementar simulaciones, fáciles, rápidas y económicas, por elemento finito que ayuden a establecer las modificaciones viables del sistema, así también encontrar materiales alternos que ayuden a determinar las relaciones de cada variable con que cuenta el sistema y su entorno climático, así también que ayuden a la mejora de la eficiencia térmica de éste.

## REFERENCIAS

1. "Nuevas Energías Renovables: Una Alternativa Energética Sustentable para México". Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República y el Centro de Investigación en Energía de la UNAM. México. 2004.
2. O. de Buen R. "¿Porqué en México los calentadores solares no son tan comunes como deberían?". 2008.
3. "¿Porqué le conviene instalar un calentador solar de agua en su casa?". Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE). México. 2011.
4. L. Jutglar. Energía Solar: [Consulta: <[http://books.google.com/books?id=l0qPPTGMRUYC&printsec=frontcover&dq=Energ%C3%ADa+Solar&hl=es&ei=zJt\\_TbS8O4m8sQPSmpj1BQ&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=1&ved=0CEQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com/books?id=l0qPPTGMRUYC&printsec=frontcover&dq=Energ%C3%ADa+Solar&hl=es&ei=zJt_TbS8O4m8sQPSmpj1BQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CEQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false)>
5. "Gases de Efecto Invernadero" 2005. Observatorio de Salud y Cambio Climático <[http://www.oscc.gob.es/es/general/salud\\_cambio\\_climatico/cambio\\_climatico\\_es.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/cambio_climatico_es.htm)>
6. Z. Sen, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, In: Springer, editor.: Springer; 2008.
7. E. Mazria. *Energía Solar Pasiva*. Gustavo Gili.1985.
- 8.P. Rekeciewicz. "Efecto Invernadero" 2005. PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) <[http://www.oscc.gob.es/es/general/salud\\_cambio\\_climatico/cambio\\_climatico\\_es.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/cambio_climatico_es.htm)>
9. A. K. Soteris. *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. 1ra. ed. ed.: Academic Press.2009.
10. R. Foster; M. Ghassemi; A. Cota, Solar Energy: Renewable Energy and the Environment, In: A. Ghassemi, editor.: Taylor & Francis; 2009.
11. FOCER. *Manual de Energías Renvobles: Solar Térmica*. 2002.
12. "Radiación Solar" 2008. [Consulta: <[http://www.solarpedia.es/index.php/Radiaci%C3%B3n\\_solar](http://www.solarpedia.es/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar)>
13. "Espectro electromagnético de la luz" 2010. <<http://labquimica.wordpress.com/category/espectro/>>
14. "Astronomical Unit" 2011. [Consulta: <<http://neo.jpl.nasa.gov/glossary/au.html>>
15. "Relación Sol-Tierra" 2011. <<http://www.monografias.com>>

16. A. Aguilar Fraga. Caracterización de la Energía Eléctrica Fotovoltaica en las condiciones ambientales del norte de la ciudad de Mérida, Yucatán Investigación. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Unidad de Energía Renovable, 2011.
17. "Movimientos de la Tierra" 2011. <<http://davidpomahuanca.blogspot.mx/2011/08/los-movimientos-de-la-tierra.html>>
18. M. M. Javier; C. G. Rafael. "Energía Solar Térmica". Vol.: p.2004.
19. "Distribución de la Radiación Solar" 2011. <<http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/dosimetro-de-radiacion-macsolar.htm>>
20. J. D. García Solís. Optimización de un Calentador Solar de Agua para uso Residencial. Instituto Tecnológico Superior de Progreso, 2010.
21. "Vivienda Biclimática" 2011. <<http://www.e-tecmalearning.es/wordpress/?paged=3>>
22. "Ecoefecto. Tu energía Solar" 2012. [Consulta: <<http://www.ecoefecto.com/FV%20intro.htm>>
23. A. C. Asociación Nacional de Energía Solar. "Calentadores Solares" 2009. [Consulta: Noviembre/2010]. <<http://www.anes.org>>
24. "Aplicación de la Energía Solar" 2011. [Consulta: <<http://educasitios2008.educ.ar/aula156/solar/>>
25. "Instalación de Energía Solar" 2006. [Consulta: <<http://www.instalacionenergiasolar.com/>>
26. "Destiladores Solares" 2010. [Consulta: 15/Abril/2011]. <<http://www.sitiosolar.com/los%20destiladores%20solares.htm>>
27. S. Dan; F. Eli; A. Elad. "Potential of solar desalination in Israel and in its close vicinity". *Desalination*; Vol. 139: p. 21-33.2001.
28. *Calentadores Solares: Energía Renovable en tu Hogar*. GreenPeaces, Mexico. 1998.
29. K. G. Contreras López; S. Jacobo Terrazas. *Calentador Solar para Agua*.2010.
30. "Esquema de un calentador Solar" 2011. <<http://viven.wordpress.com/calentador-solar/>>
31. "Efecto de Termosifón" 2011. <<http://acuasol.net/how.php>>
32. "Calentadores Solares" 2012. S. D. C. Directa. <<http://www.ahorrosolar.com/home/calentadores-solares>>
33. "Sistema de Ciculación indirecta" 2012. <[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ8OomZH0k\\_q6ztR8dZzlrQToMUfQYrx-QEP-7guPotP2b-Znk6](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ8OomZH0k_q6ztR8dZzlrQToMUfQYrx-QEP-7guPotP2b-Znk6)>

34. F. Kreith; R. M. Manglik; M. S. Bohn. *Principles of Heat Transfer*. 7th ed.: Cengage Learning.2010.
35. F. P. Incropera; D. P. DeWitt. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall.1999.
36. A. J. Chapman; O. C. ZABARA; E. M. TOMÁS. *Transmisión de calor*. Bellisco.1990.
37. "Transferencia de calor por conducción" *Tcal1.Jpg*. Monica González <<http://fisica.laguia2000.com/termodinamica/transferencias-de-calor-conduccion>>
38. D. Q. Kern. *Procesos de transferencia de calor*. Compañía Editorial Continental.1997.
39. M. R. Riazi; J. Razavi; A. Sadeghi, et al. "An Experimental Evaluation of Copper, Steel and Polypropylene Tubes in Solar WH". *Applied Solar Energy*; Vol. 45: p. 65-69.2009.
40. N. Madhukeshwara; E. S. Prakash. "An investigation on the performance characteristics of solar flat plate collector with different selective surface coatings". *International Journal of Energy and Environment*; Vol. 3(1): p. 99 - 108.2012.
41. M. Khoukhi; S. Maruyama; A. Komiya, et al. "Flat-Plate Solar Collector Performance with Coated and Uncoated Glass Cover". *Heat Transfer Engineering*; Vol. 27(1): p. 46-53.2006.
42. R. Siyoul; S. Taebeom. "Estimation of Heat Losses from the Receivers for Solar Energy Collecting System of Korea Institute of Energy Research". *KSME International Journal*; Vol. 14(12): p. 1403-1411.2000.
43. D. Gudiño Ayala. *Notas Sobre el Curso de Energía Solar*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Tlaquepaque, Jalisco. 1995.
44. "Sistema de Autocontenido" 2011. <<http://sea-soluciones.com/calentadores-domesticos-solares-en-tijuana.php>>
45. E. Thermosol. "Calentadores Solares" 2010. [Consulta: <<http://www.thermosol.com.mx/comoFuncionan.html>>
46. "Thermal Solar Tube" 2009. <<http://www.ecoyeco.com/thermal-solar-tube/>>
47. D.A.Siqueira; L.G.M.Vieira; J.J.R.Damasceno. "Analysis and performance of a low-cost solar heater". *Renewable Energy*; Vol. 36: p. 2538-2546.2011.
48. M. Issa; M. Al Nimr. "Temperature distribution inside hot-water storage tanks of solar collectors". *Wärme- und Stoffübertragung*; Vol. (23): p. 297-305.1988.
49. 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [Consulta: 2011/03/21]. <<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=31>>



50. J. M. Hernández Reyes. Estudio Mecánico y Termohidráulico de un calentador solar para uso residencial. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2011.
51. I. R. Martín Dominguez. *Distribución de Flujos en Sistemas de Colectores Solares Planos Interconectados*. Energética. México, D.F. 2008.
52. M. J. Peg Puig. "Energía Solar Térmica". *Energías Renovables*; Vol.: p. 12-13.2011.
53. *Planing and Installing: Solar Thermal Systems*. 2 ed. ed. United King: Earthscan.2010.
54. "Sun Earth Tools" 2009. [Consulta: 15/Noviembre/2012].  
<[http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=es](http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es)>
55. *Manual IV. Ingeniería Solar*. Fundación Suiza de Cooperación al Desarrollo Técnico SWISSCONTACT. 2009.
56. W. Soto Gómez ; R. Puente Hernández; V. G. Martínez. "Eficiencia termica de un calentador solar de agua con tubos de calor al vacío". *ANES*; Vol.: p.2009.