

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE
CALENTAMIENTO DE AGUA, CON UN ARREGLO EN SERIE DE
COLECTORES DE PLACA PLANA, UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR.**

Autores:

LUIS ADALBERTO SOLANO DÍAZ

HEIZER AMAYA DURÁN

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA

BUCARAMANGA

2014

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE
CALENTAMIENTO DE AGUA, CON UN ARREGLO EN SERIE DE
COLECTORES DE PLACA PLANA, UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR.**

LUIS ADALBERTO SOLANO DIAZ

HEIZER AMAYA DURAN

**Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA
BUCARAMANGA**

2014

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 07 de Abril de 2014

DEDICATORIA

Quiero dedicarle este trabajo a Dios por permitirme alcanzar mis metas, por todo ese sentimiento de alegría y tranquilidad en cada etapa de mi vida.

A mis padres, Nereida Durán García y Reinel Amaya Arciniegas. Que jamás se rindieron ante el esfuerzo por brindarme la oportunidad de tener una mejor educación, ellos son mi ejemplo a seguir, mi luz en la oscuridad, ellos son los mejores papas del mundo. A mis hermanos Hassel y Heiler Amaya Durán, y a mi novia quien representa mi presente, que de alguna forma me apoyaron para alcanzar este maravilloso logro.

(Amaya, Heizer)

DEDICATORIA

Quisiera aprovechar este corto espacio para dedicarle este trabajo, primero a Dios por todas las bendiciones dadas.

Dedicárselos a mis padres, Omar E. Solano Carrillo y Yanith R. Díaz Solano por todo el apoyo, consejos y las innumerables cosas que me han servido para que en el día de hoy sea una persona de bien llena de valores y virtudes. A mis hermanos Yosdi T. y Rosa A. Los cuales siempre han estado disponibles, brindándome su compañía y apoyo en los momentos que más los he necesitado. También quisiera dedicarlo a mis familiares paternos y maternos, por toda la confianza puesta en mí.

(Solano, Luis)

AGRADECIMIENTOS

Se le agradece a la Universidad Pontificia Bolivariana por su apoyo y colaboración incondicional en la asistencia económica del presente proyecto.

Agradecemos al ingeniero Emil Hernández Arroyo, profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por su confianza, colaboración y apoyo en el proceso de realización de este proyecto. Así mismo al profesor Edwin Córdoba Tuta quien nos facilitó el sistema de adquisición de datos para obtener los resultados durante la realización de las pruebas, y al técnico Ludwing Casas Mena quien nos transmitió todos los conocimientos en la construcción del proyecto y disposición en el desarrollo de sí mismo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. MARCO TEORICO	14
2.1. Colectores de placa plana con cubierta	14
2.2. Colectores de placa plana sin cubierta	16
2.3. Colectores concentradores parabólicos (estacionarios)	17
2.4. Colectores de tubo vacío	18
2.4.1. Tubos de vacío de flujo directo	19
2.4.2. Tubos de vacío de heat pipe	20
2.5. Inclinação de los colectores solares	21
2.6. Radiación solar en Colombia	22
2.7. Tipos de radiación	24
2.8. Energía solar térmica en Colombia	25
2.9. Transferencia de calor	28
2.9.1. Conducción	29
2.9.2. Convección	31
2.9.3. Radiación	32
2.10. Balance térmico	34
3. METODOLOGIA Y PROCESO DE DISEÑO	37
3.1. Diseño conceptual	37
3.1.1. Estructura de soporte de los colectores	37
3.1.2. Estructura de soporte del tanque de almacenamiento	38
3.1.3. Placa absorbedora	38
3.1.4. Cubierta	38
3.1.5. Tanque de almacenamiento	38
3.1.6. Termocuplas	39
3.1.7. Serpentin	39
3.1.8. Aislante térmico	39
3.2. Diseño en detalle	40
3.2.1. Dimensionamiento	40
3.3. Fabricación	43
3.3.1. Tanque de almacenamiento	44
3.3.2. Aislamiento del tanque de almacenamiento	44

3.3.3. Placa absorbedora	45
3.3.4. Carcasa del colector	46
3.3.5. Serpentín	47
3.3.6. Cubierta	48
3.3.7. Estructura de los colectores	49
3.3.8. Estructura de soporte del tanque de almacenamiento	50
4. CALCULOS Y RESULTADOS	52
4.1. Cálculos previos	52
4.2. Cálculos base	53
4.3. Resultados	58
4.3.1. Conexión colector 1	60
4.3.2. Conexión colector 2	61
4.3.3. Conexión de colectores en serie	61
4.3.4. Conexión de colectores en paralelo	62
5. CONCLUSIONES	65
6. RECOMENDACIONES	66
A. ANEXO: TABLAS DE DATOS Y RESULTADOS	67
A1. Tabla de datos del colector 1	67
A1.1. Tablas de cálculos del colector 1	68
A2. Tabla de datos del colector 2	69
A2.1. Tabla de cálculos del colector 2	71
A3. Tabla de datos de los colectores en serie	72
A3.1. Tabla de cálculos de los colectores en serie	73
A4. Tabla de datos de los colectores conectados en paralelo	75
A4.1. Tabla de cálculos de los colectores conectados en paralelo	76
B. ANEXO: PLANOS DEL SISTEMA DEL CALENTAMIENTO	78
B1. Planos del tanque de almacenamiento	78
B2. Planos de la estructura de soporte del tanque	79
B3. Planos de la estructura de los colectores	80
B4. Planos de los colectores	81
BIBLIOGRAFÍA	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Colector de placa plana	15
Figura 2. Colector de placa plana sin cubierta	16
Figura 3. Colector Concentrador Parabólico	17
Figura 4. Colector de Tubos de Vacío	19
Figura 5. Colector de Tubos de Vacío de Flujo Directo	20
Figura 6. Colector de Tubos de Vacío Head Pipe	21
Figura 7. Vista parcial de los 1 250 calentadores solares instalados por el Centro Las Gaviotas a mediados de los ochenta.	27
Figura 8. Calentador de la cafetería de la antigua Empresa de Energía de Bogotá (EEB)	27
Figura 9. Colectores solares del Hospital Pablo Tobón Uribe, Medellín, en operación desde mediados de los ochenta (240 m ² de colectores, tanque de 20 m ³ , no visible).	28
Figura 10. Modos de transferencia de calor	29
Figura 11. Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debida a la actividad molecular	30
Figura 12. Intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre una Superficie y sus alrededores.	33
Figura 13. Temperaturas en el colector de placa plana	35
Figura 14. Prototipo del sistema de calentamiento	37
Figura 15. Plano de la placa absorbedora	42
Figura 16. Plano de la carcasa del colector solar	43
Figura 17. Tanque interno hecho en acero inoxidable	44
Figura 18. Tanque externo hecho en lámina de aluminio	45
Figura 19. Aplicación del aislante térmico, fuente	45
Figura 20. Placa absorbedora	46
Figura 21. Carcasa del colector	46
Figura 22. Accesorios del serpentín	47
Figura 23. Serpentín de ambos colectores	48
Figura 24. Colector solar totalmente acoplado	49
Figura 25. Estructura de soporte de colectores,	50
Figura 26. Estructura de soporte del tanque de almacenamiento	51
Figura 27. Conexión del sistema de calentamiento	59
Figura 28. Curva de eficiencia vs tiempo del colector 1	60
Figura 29. Curva de eficiencia vs tiempo del colector 2	61
Figura 30. Curva de eficiencia vs tiempo del colector 1 y 2 en serie	62
Figura 31. Curva de eficiencia vs tiempo del colector 1 y 2 en paralelo	63
Figura 32. Comparación de las eficiencias de las diferentes conexiones	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. INCLINACION DE LOS COLECTORES DE ACUERDO AL PERIODO DE INSTALACION.....	22
TABLA 2. RANGO ANUAL DE DISPONIBILIDAD DE ENERGIA SOLAR POR REGIONES.....	23
TABLA 3. RADIACION SOLAR Y TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL EN BUCARAMANGA.....	24
TABLA 4. TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA DEL COLECTOR 1	54
TABLA 5. RESULTADO DE LOS CÁLCULOS DEL PORCENTAJE DE ERROR.....	58
TABLA 6. EFICIENCIAS MÁXIMAS.....	63
TABLA 7. EFICIENCIAS MÍNIMAS.....	63

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑAR, CONSTRUIR Y EVALUAR UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON UN ARREGLO EN SERIE DE COLECTORES DE PLACA PLANA, UTILIZANDO LA ENERGÍA SOLAR.

AUTORES: Heizer Amaya Durán

Luis Adalberto Solano Díaz

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Emil Hernández Arroyo

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto fue diseñar, construir y evaluar un sistema de calentamiento de agua con un arreglo en serie de colectores de placa plana, utilizando la energía solar. Los parámetros de diseño que se tuvieron en cuenta fueron: Capacidad de almacenamiento de 150 L/m² (volumen por unidad de área del colector), Temperatura de consumo de 70°C. El sistema consta de dos colectores solares que pueden ser conectados en serie o paralelo. El agua caliente se pretende utilizar en una de las cafeterías que se encuentra dentro del campus universitario. Las dimensiones del sistema de calentamiento se realizaron según las necesidades que demanda la cafetería. Los componentes del sistema de calentamiento son: la placa de absorción, la cubierta, el tanque de almacenamiento, los conductos de circulación de agua, aislantes, soportes y selladores. El máximo desempeño térmico obtenido fue de 64 % ± 0.6 % para el sistema conectado en serie funcionando a las 11.30 am, con una temperatura de entrada de 32.28°C ± 0.135°C y una de salida de 33.54°C ± 0.276°C. La eficiencia obtenida es un dato de muy buena aceptación debido a que las eficiencias de colectores de placa plana son de aproximadamente de 69%, obtenida en laboratorios con condiciones controladas

Palabras claves: colector solar, colector de placa plana, energía solar.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN, BUILD AND EVALUATE A WATER HEATING SYSTEM WITH AN ARRANGEMENT IN SERIES OF FLAT PLATE COLLECTORS, USING SOLAR ENERGY.

AUTHOR: Heizer Amaya Durán
Luis Adalberto Solano Díaz

FACULTY: Faculty of Mechanical Engineering

DIRECTOR: Emil Hernández Arroyo

ABSTRACT

The main objective of this project is to design, build and evaluate a system for heating water with a series arrangement of flat plate collectors, using solar energy. The design parameters that were taken into account were: Storage Capacity 150 L/m² (volume per unit of collector area), temperature 70 ° C. consumption the system consists of two solar collectors can be connected in series or parallel. The hot water is to be used in one of the cafeteria located within the university campus. The dimensions of the heating system were performed according to the requirements demanded by the cafeteria. The heating system components are: the absorber plate, the cover, the storage tank, the water circulation conduits, insulation, and sealing substrates. The maximum thermal performance obtained was 64 % ± 0.6 % for the system connected in series running at 11: 30 am, with an inlet temperature of 32.28 °C ± 0.135 °C and an output of 33.54 °C ± 0.276 °C. The efficiency obtained is a well accepted fact because efficiencies flat plate collectors are approximately 69 %, obtained in controlled laboratory conditions with

Keywords: solar collector, flat plate collector, solar energy.

INTRODUCCIÓN

A través de los años, el ser humano ha utilizado diversas formas de energía que dieron origen, gracias al sol. De esta forma la energía solar es un recurso inagotable que está garantizado por muchos millones de años, y al mismo tiempo se ha aprovechado para satisfacer todas las necesidades. Los colectores solares son dispositivos que son utilizados para calentar agua, para sistemas de calefacción y piscinas, además pueden ser aprovechados tanto al nivel doméstico como industrial. Debido a que son equipos de fácil adquisición gracias a su relación técnica – económica.

El sistema de calentamiento está compuesto por una placa absorbente de la radiación solar que se encarga de transferir la energía térmica al fluido que circula a través de un serpentín, una cubierta transparente y una caja metálica aislada en los laterales y en el fondo, en donde estarán contenidos los elementos anteriormente descritos.

El funcionamiento térmico de los colectores solares ofrece una alternativa de ahorro de gas, así mismo genera una disminución en el gasto mensual del consumo eléctrico de dispositivos que son utilizados para calentar agua. De esta manera se obtienen diversos beneficios tanto para la sociedad como el medio ambiente disminuyendo la contaminación que anteriormente se producía por la quema del gas.

En el siguiente trabajo se emplea un sistema de colectores de placa plana, con el propósito de encontrar las curvas de radiación vs eficiencia, de acuerdo a los rayos solares que inciden sobre la superficie del colector, los parámetros obtenidos fueron comparados con estudios similares realizados por la empresa CENSOLAR (centro de estudios de la energía solar).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar un sistema de calentamiento de agua, con un arreglo en serie de colectores de placa plana, utilizando energía solar, para asistir el proyecto, código **No. 021-0613-2600**, matriculado en el Departamento General de Investigaciones (DGI), a cargo del Ingeniero Emil Hernández Arroyo, profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar los planos del sistema de calentamiento de agua. A partir de los requerimientos de la cafetería del edificio K. **Resultado:** Planos dimensionados de acuerdo al consumo de agua caliente. **Indicador:** se utilizaran planos de sistemas de calentamiento diseñados por CENSOLAR para obtener el diseño adecuado del sistema.
- Construcción de los colectores solares para la dosificación de agua caliente a la cafetería del edificio k. **Resultado:** Sistema de calentamiento solar. **Indicador:** se utilizaran los planos del sistema propuestos.
- Evaluar el comportamiento térmico del agua, para determinar las curvas de Radiación vs Eficiencia, de acuerdo a los rayos incidentes sobre la superficie del colector. **Resultado:** Informe de los cálculos obtenidos de la eficiencia del sistema solar. **Indicador:** Se utilizara un medidor de temperatura (termocupla) para obtener las diferentes temperaturas del sistema y los resultados se compararan con los datos teóricos de la empresa CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energía Solar).

2. MARCO TEORICO

El agua caliente se ha convertido en un recurso vital para muchos hogares alrededor del mundo, debido a su amplia utilización en la higiene personal, en la limpieza, y en los deberes de la cocina. Seguido de otros recursos importantes como lo son la calefacción y refrigeración. En la actualidad obtener agua caliente tiene un costo, que es generado ya sea por el consumo de gas natural o electricidad. De esta forma, se han implementado nuevas herramientas que involucran a la energía solar como fuente principal, además de que es un recurso ecológico, es una nueva alternativa que puede sustituir o trabajar junto a la electricidad para la obtención del recurso, con el fin de disminuir costos altos de consumo y contribuir con la mejora del medio ambiente.

El sistema energético actual se basa en el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) que son recursos agotables. A medida que transcurre el tiempo, la humanidad va creciendo y el consumo de estos recursos va aumentando, hasta que se agote lo que nuestro planeta tardo cientos de millones de años para producirlo.¹

Los colectores son dispositivos utilizados para almacenar, absorber y transferir energía solar a un fluido, que puede ser agua o aire. La energía solar, puede ser utilizada para calentar agua, para sistemas de calefacción o para climatización de piscinas. Normalmente están constituidos no solo por una superficie absorbedora sino también por elementos de protección térmica y mecánica de la misma. Existen diversos tipos de captadores solares térmicos, que se diferencian entre sí por el aislamiento térmico que utilizan y por la utilización de concentradores, adaptándose a diferentes temperaturas de utilización:

2.1. COLECTORES DE PLACA PLANA CON CUBIERTA

Son los más utilizados por tener la relación de costo – producción de calor más favorable. Un colector de placa plana se compone de una caja metálica con aislamiento, que posee una cubierta de vidrio o de plástico, y una placa absorbedora de calor. La radiación es absorbida por la placa que está construida con un material que transfiere rápidamente el calor a un fluido que pasara a través de los tubos dentro de la caja metálica (Figura 1).

¹ ROLDAN VILORIA, José (2012). NECESIDADES ENERGETICAS Y PROPUESTAS DE INSTALACIONES SOLARES. Editorial Paraninfo. ISBN 8428332975. [Consultado 12 de septiembre de 2013]

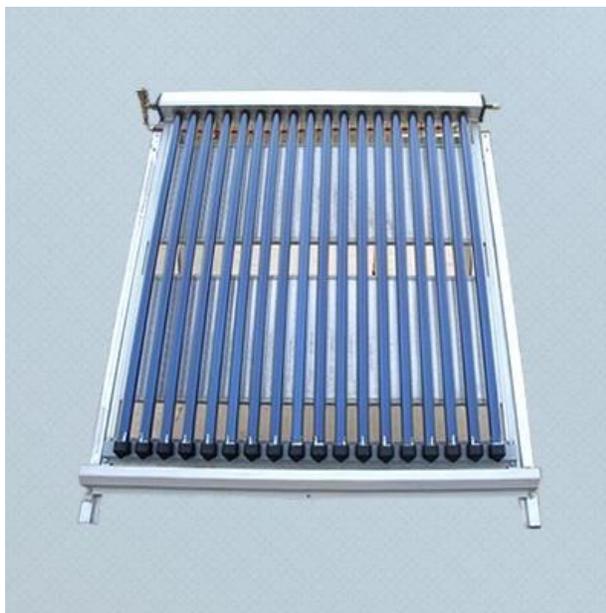


Figura 7. Colector de placa plana².

Este dispositivo funciona de forma que la radiación solar es absorbida por la placa, así mismo está se encarga de transferirle rápidamente el calor al fluido que circula a través de los tubos. Con este tipo de colector se pueden lograr temperaturas hasta 90 °C, con una eficiencia entre 30 y 45 %.³

Un colector de placa plana consiste en un absorbedor, una cubierta transparente, serpentín y un marco aislado respectivamente. Además son en la actualidad los más extendidos comercialmente. Su temperatura de trabajo está entre los 50 y 70 °C, por lo que están indicados para producir diversas aplicaciones. La cubierta transparente transmite una gran cantidad de la luz solar y al mismo tiempo deja pasar una cantidad mínima del calor emitido por el absorbedor. Su principal función es producir el efecto invernadero, reducir las pérdidas por convección, y proporcionar estanqueidad al colector.

La absorción del calor emitido por los rayos del sol, se produce por medio de una placa metálica de color negro, que favorece una mayor absorción de la radiación solar y sobre ella se encuentra soldada una tubería de cobre formando un serpentín, con el fin de producir el intercambio de calor entre la placa absorbidora

² Figura tomada del sitio web: <http://www.hormigasolar.com/colectores-solares-de-placa-plana/>

³ Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. (2007). [Consultado:12 de septiembre de 2013] Disponible en internet:

http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random49ae9a23d0d51/1236188976_Guia_didactica_colectores_solares_termicos.pdf

y el fluido circulante. Además, la aislación en la parte posterior y en las paredes laterales del colector minimiza las pérdidas térmicas, a través de la carcasa que típicamente está fabricada en aluminio y acero con tratamientos térmicos, por lo general el material utilizado puede ser lana de vidrio, poliuretano, etc.⁴

2.2. COLECTORES DE PLACA PLANA SIN CUBIERTA

Este tipo de colectores consisten en placas planas absorbentes sin cubierta conformada por un arreglo de tubos por donde circula un fluido de trabajo. Se utiliza en el calentamiento de agua para aplicaciones de bajas temperaturas, tales como: la calefacción de piscinas al aire libre, para lavar coches, y aplicaciones en la piscicultura. Generalmente estos colectores usan los absorbedores solares de plástico negro para poder resistir la luz ultravioleta o tubos de metal pintados de negro por donde circula el agua (Figura 2).



Figura 8. Colector de placa plana sin cubierta⁵.

Los componentes principales de este sistema son las placas de energía que generalmente de color negro, y los tubos (pvc), debido a que estos colectores no

⁴ ZABALZA BRIBIÁN, Ignacio. (2007) EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL NUEVO CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. FC Editorial, 2007. ISBN 8496743306. [Consultado:12 de septiembre de 2013]

⁵ Figura tomada del sitio web: http://cer.gob.cl/tecnologias/solar/energia-solar-termica-agua_caliente-sanitaria-ac/collectores-sin-cubierta/

tienen cubierta, una gran parte de la energía solar absorbida se pierde por convección.⁶

2.3. COLECTORES CONCENTRADORES PARABOLICOS (ESTACIONARIOS).

Este tipo de colectores es utilizado para alcanzar temperaturas más elevadas, disminuyendo las pérdidas térmicas del receptor, que son proporcionales a la superficie del mismo. La concentración es la relación entre el área de captación (el área del vidrio en la superficie de la caja) y el área de recepción, por lo tanto el colector siempre debe mantenerse perpendicular a los rayos solares. Este sistema cuenta con un arreglo de espejos en forma de cilindro parabólico, en el foco se coloca un pequeño conducto en donde pasa un fluido como aceite o salmuera que puede calentarse por encima del punto de ebullición del agua, luego este fluido va a una caldera donde calienta agua y la convierte en vapor. Donde el vapor se hace pasar a través de una turbina que haga girar un generador para generar electricidad (Figura 3).



Figura 9. Colector Concentrador Parabólico⁷.

⁶ CENTRO DE ENERGIAS RENOVABLES. Colectores sin cubierta. Disponible en internet: <cer.gob.cl/tecnologías/solar/energías-solar-termicas-agua-caliente-sanitaria-ac/collectores-sin-cubierta/> [citado el 25 de septiembre de 2013]

⁷ Figura tomada del sitio web: http://es.wikipedia.org/wiki/Concentrador_solar

Por otra parte estos colectores reúnen las propiedades de los colectores planos, debido a que pueden ser instalados en estructuras fijas y tienen un ángulo grande de visión, permitiendo la captación de la radiación difusa, alcanzando una temperatura superior a los 70° C. La diferencia de este colector respecto a los demás, es que posee una parrilla de aletas en forma de “v” invertida, ubicadas por encima de la superficie reflectora.

La captación solar se realiza en las dos caras de las aletas ya que los rayos solares inciden directamente en la parte superior de las aletas y los rayos que son reflejados inciden en la parte inferior de los mismos, de esta forma aumenta más la temperatura del fluido y disminuye las pérdidas térmicas.⁸

2.4. COLECTORES DE TUBO VACIO.

Poseen un mejor rendimiento y proporcionan mayores temperaturas que los colectores de placa plana, pueden alcanzar temperaturas mayores a los 100° C. su aplicación se ve reflejada en el calentamiento de agua para su aprovechamiento en procesos industriales, en calefactores por radiadores convencionales, y en instalaciones de refrigeración por medio de máquinas de absorción. Estos colectores son demasiados costosos, se requiere de mucho cuidado en la instalación.

Está compuesto generalmente por dos tubos concéntricos de vidrio transparentes cuyo interior contiene tubos metálicos absorbedores de calor. Dentro de estos tubos no hay corrientes de aire, por lo que no existen pérdidas por convección, de esta forma el rendimiento a altas temperaturas es demasiado alto, debido a menores coeficientes de pérdidas en estos colectores.⁹

El tubo de calor consiste en un tubo de cobre hueco cerrado por los dos extremos sometido a vacío y con un fluido vaporizante en su interior. Cuando se calienta la parte del tubo donde se encuentra el fluido, este se evapora y absorbe el calor

⁸ PORTAL DE LAS ENERGIAS RENOVABLES. Colectores solares térmicos. [Citado el 25 de septiembre de 2013]. Disponible en:

<http://esp.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=41&ID_area=8&ID_sub_area=26>

⁹ SITIOSOLAR. Los colectores de tubos de vacío. [Citado el 26 de septiembre de 2013]. Disponible en internet: <<http://www.sitiosolar.com>>

latente de vaporización, desplazándose hacia la parte de menor temperatura hasta alcanzar la condensación (Figura 4).

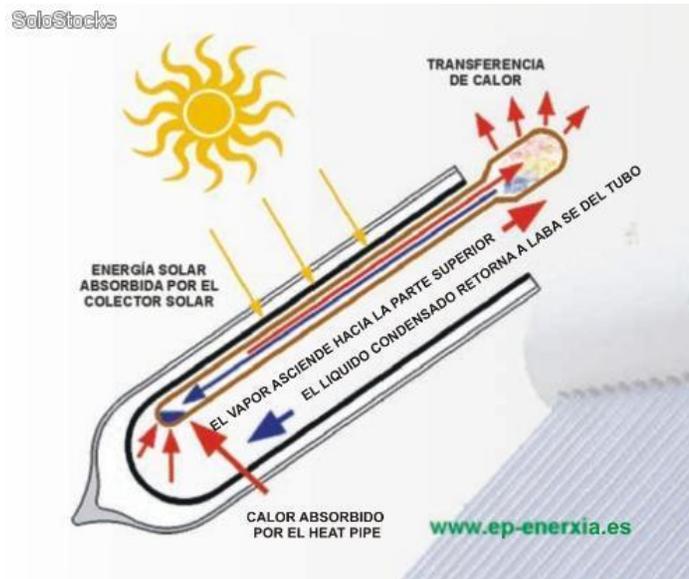


Figura 10. Colector de Tubos de Vacío¹⁰.

Estos tipos de colectores se clasifican en:

2.4.1. TUBOS DE VACIO DE FLUJO DIRECTO

Esta tecnología se emplea tanto para colectores como para calentadores solares compactos. Estos tipos se encargan de colocar en el interior del tubo evacuado una plancha de material absorbente adecuado que hace las veces de absorbedor Transformando la radiación solar en calor. Dentro de cada tubo hay una aleta de aluminio absorbidora de radiación solar e impide la pérdida de calor, que va conectada a otro tubo, el fluido utilizado es el agua y transita por la tubería tanto en la entrada como en la salida (Figura 5). Por otro lado tienen la ventaja de poder adoptar una posición tanto horizontal como vertical sin que pueda variar su rendimiento, debido a que el tubo puede rotar sobre su eje inclinándose el absorbedor de la manera más adecuada. Además es utilizable en áreas frías ya

¹⁰ Figura tomada del sitio web: <http://www.solostocks.com/venta-productos/energia-solar/sistemas-energia-solar/colector-solar-de-tubo-de-vacio-jph-7402259>

que permite diversas estrategias contra la congelación de uso general en la energía solar térmica.

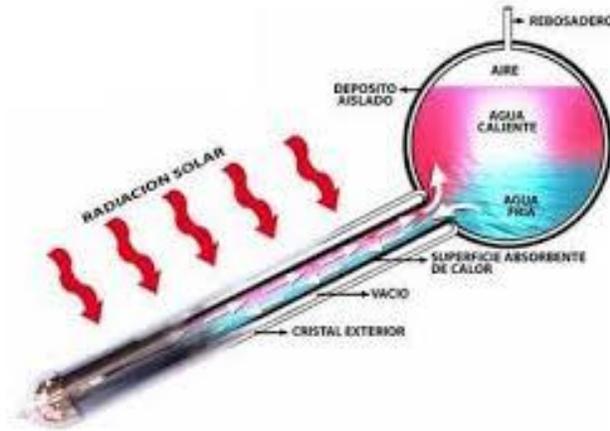


Figura 11. Colector de Tubos de Vacío de Flujo Directo¹¹.

2.4.2. TUBOS DE VACIO DE HEAT PIPE.

Esta tecnología emplea un mecanismo denominado (tubo de calor), que consiste en un tubo cerrado en el cual se introduce un fluido de propiedades específicas. Cuando los rayos del sol inciden sobre la superficie del absorbente del tubo, el fluido se evapora y absorbe el calor latente, ese gas generado asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo donde se condensa y cede su calor latente al fluido que nos interesa calentar, este mismo proceso se repite mientras los rayos del sol incidan en el colector hasta poder alcanzar una temperatura muy alta de 130°C.

Por otra parte, los tubos de vacío tienen diversas aplicaciones en donde se requiera agua caliente de entre unos 40 y 130 °C. Y al mismo tiempo son apropiados para climas muy fríos y parcialmente nublosos.¹²

¹¹ Figura tomada del sitio web: http://iipsolares.mex.tl/frameset.php?url=/73571_COMO-FUNCIONAN-LOS-CALENTADORES-.html

¹² Eca, Instituto de Tecnología y Formación. Energía Solar Térmica. FC Editorial, 2008. ISBN 8496743314, 9788496743311. [Citado el 26 de septiembre de 2013].

Este mecanismo consiste en un tubo cerrado en el cual se introduce un fluido, cuando el absorbedor de calor adosado al tubo, el fluido se evapora y absorbe el calor latente, luego el vapor sube hacia la parte más fría que está situada en lo más alto del tubo, donde se condensa y cede su calor (Figura 6).

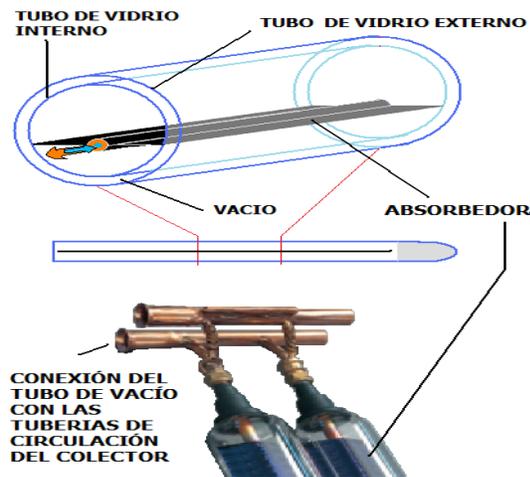


Figura 12. Colector de Tubos de Vacío Head Pipe¹³.

2.5. INCLINACION DE LOS COLECTORES SOLARES

La radiación solar que incide en la superficie del colector está integrada por dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa. Existen dispositivos de medida que proporcionan cada una de estas dos magnitudes que están relacionadas con las estaciones meteorológicas que disponen solo de la radiación global diaria sobre el plano horizontal. Es importante tener en cuenta que el ángulo de inclinación sobre este tipo de plano se determina en función de la latitud geográfica (β°) y del periodo de utilización de la instalación, de acuerdo con los valores de la siguiente tabla:

¹³ Figura tomada del sitio web: <http://www.sitiosolar.com/los-colectores-solares-de-tubo-de-vacio/>

Tabla 1. Inclinación de los colectores de acuerdo al periodo de instalación.

PERIODO DE UTILIZACION	INCLINACION
Anual, con consumo constante	β°
Preferentemente en invierno	$(\beta + 10)^\circ$
Preferentemente en verano	$(\beta - 10)^\circ$

Para los tres casos se utiliza una desviación máxima de ± 10 grados, que no afectan el rendimiento y la energía térmica producida por el colector.¹⁴

2.6. RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA

La evaluación del potencial solar de Colombia se ha realizado empleando principalmente información de estaciones meteorológicas del IDEAM (Instituto de Estudios Ambientales), procesada para ser transformada de información meteorológica en información energética. La energía solar se ha evaluado para varias regiones como la Costa Atlántica, la Sabana de Bogotá y para el país. Posteriormente, se publicaron varios estudios que complementaron la información sobre radiación solar en el país. El más reciente es el Atlas de Radiación Solar de Colombia.¹⁵

El país está caracterizado por las regiones: Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia.

La intensidad de la radiación solar en la región Andina colombiana muestra que las zonas de los valles del Cauca y Magdalena poseen el mayor potencial de esta región, y a medida que se asciende hacia las cimas de las cordilleras ese potencial va disminuyendo gradualmente, con excepción de algunos núcleos localizados en zonas llamadas altiplanos, donde se observa un potencial solar mayor comparado con el de las laderas.

En las regiones costeras: atlántica y pacífica, los resultados de la evaluación del recurso solar del país muestran en la región noreste de la costa atlántica (La Guajira) un potencial solar promedio diario entre 5,0 y 6,0 kWh/m², el mayor del país. Este valor va disminuyendo gradualmente en dirección suroeste hacia la costa pacífica, donde se presenta el menor potencial solar del país, con valores menores de 3,5 kWh/m², aunque posee una gran zona con valores entre 4,0 y 4,5.

¹⁴ CLEANERGY solar. Angulo de inclinación de los colectores solares. [Citado el 04 de diciembre de 2013]. Disponible en internet: <<http://www.cleanergysolar.com/2011/11/03/angulo-de-inclinacion-de-los-colectores-solares/>>

¹⁵ RODRIGUEZ MURCIA, H. (2009): DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA Y SUS PERSPECTIVAS. revista de Ingeniería, n° 28, noviembre, pp. 87. [Citado el 04 de diciembre de 2013].

Las regiones de la Orinoquia y Amazonia, que comprenden las planicies de los Llanos Orientales y zonas de las selvas colombianas, presentan una variación ascendente de la radiación solar en sentido suroeste noreste, verificándose valores asimilables a los de La Guajira en el noreste (Puerto Carreño).¹⁶

En la Tabla 2 se ilustra los rangos de disponibilidad de energía solar promedio multianual por regiones.

Tabla 2. Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones.

Región	Radiación solar (kWh/m ² /año)
La guajira	1980 - 2340
Costa atlántica	1260 - 2340
Orinoquia	1440 - 2160
Amazonia	1440 - 1800
Región andina	1080 - 1620
Costa pacífica	1080 - 1440

Dado que el prototipo será instalado en la zona rural de Bucaramanga. En las instalaciones de la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga, el historial de radiación solar, brillo solar y temperatura en esta región se puede ver en la tabla 3 donde comparado con otros sectores de Colombia se encuentra en un nivel intermedio.

¹⁶ COLOMBIA. Ministerio de Minas y Energía -Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá: UPME - IDEAM.2005. [Citado el 04 de diciembre de 2013].

Tabla 3. Radiación solar, brillo solar y temperatura promedio mensual en Bucaramanga.

	Radiación solar [kWh/m ²]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Brillo solar [h]	Radiación solar [W/m ²]
Enero	4.0 – 4.5	30.0	19.0	6	666.66-750
Febrero	4.0 – 4.5	29.0	19.6	5	800-900
Marzo	3.5 – 4.0	28.0	18.4	4	875-1000
Abril	3.5 – 4.0	27.5	17.6	5	700-800
Mayo	3.5 – 4.0	27.1	16.0	4	875-1000
Junio	3.5 – 4.0	25.0	15.4	4	875-1000
Julio	4.0 – 4.5	26.1	16.0	5	800-900
Agosto	3.5 – 4.0	27.4	18.1	5	700-800
Septiembre	3.5 – 4.0	28.3	17.1	4	875-1000
Octubre	3.5 – 4.0	26.6	18.9	4	875-1000
Noviembre	3.5 – 4.0	27.2	19.0	5	700-800
Diciembre	3.5 – 4.0	28.5	18.5	6	583.33-666.66
Promedio anual	3.5 – 4.0	27.1	17.5	5	700-800

Observaciones:

**Datos de radiación tomados de los mapas del libro atlas de radiación solar en Colombia.*

**Datos de temperatura tomados del Instituto de Hidrología, Meteorología e Investigaciones Ambientales (IDEAM). 29 enero 2010.¹⁷*

2.7. TIPOS DE RADIACIÓN

La radiación emitida por el sol (radiación solar) constituye la principal fuente de energía para la tierra, sin el sol, la vida en la tierra no sería posible, ya que gracias a la radiación solar la temperatura en la superficie terrestre es de 250 más alta de los que sería si tuviese que depender solamente del calor interno. Se considera que el sol radia con una potencia de $3,8 \times 10^{23}$ kW de los cuales la tierra intercepta $1,7 \times 10^{14}$ kW. La mayor parte de esta potencia de origen solar llega a la tierra por radiación con longitudes de onda en un rango de 0.276 – 4.96 μm . Al valor de la potencia radiante recibida en el exterior de la atmosfera terrestre por unidad de superficie perpendicular a la radiación enviada por el sol cuando la tierra se encuentra a su distancia media del sol, se le denomina constante solar que varía dependiendo de los ciclos solares que tienen una duración de 11 años y suele tomar un valor de 1367 W/m².

¹⁷ Alcaldía de Bucaramanga. Indicadores. Información meteorológica. [Citado el 06 de diciembre de 2013] disponible en internet. <<http://www.bucaramanga.gov.co/Contenido.aspx?param=277>>

La radiación que proviene del sol y atraviesa la atmosfera interacciona con las partículas de las diferentes substancias que encuentra en ella (aerosoles, partículas de polvo etc.) esta interacción da como resultado la existencia de dos tipos de radiación solar a nivel de la superficie terrestre, la radiación solar directa y la radiación solar difusa.

La radiación solar directa es aquella fracción de la radiación solar extraterrestre que llega a la superficie de la tierra con una trayectoria bien definida, que es la que une al sol con ese punto de la superficie terrestre. Por otra parte la radiación difusa es aquella fracción de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra sin una trayectoria definida, ya que surge como resultado de la interacción de la radiación solar directa con las partículas y substancias que existen en la atmosfera. La suma de la radiación solar directa y difusa es lo que se conoce con el nombre de radiación solar global.

Al momento de hablar de la radiación solar es conveniente tener claro la diferencia existente entre dos conceptos básicos: irradiación solar y exposición. Por irradiación solar se denomina al flujo de energía por unidad de superficie asociado a la radiación solar, siendo el $[W/m^2]$ la unidad más usada para cuantificarla. Y por exposición se denomina a la integral de la irradiación solar a lo largo de un determinado espacio de tiempo, siendo el $[J/m^2]$ o el $[kWh/m^2]$ la unidad básica más utilizada.¹⁸

2.8. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN COLOMBIA

Las aplicaciones térmicas en Colombia datan de mediados del siglo pasado, cuando en Santa Marta fueron instalados calentadores solares en las casas de los empleados de las bananeras, calentadores que aún existen aunque no operan. Más tarde, hacia los años sesenta, en la Universidad Industrial de Santander se instalaron calentadores solares domésticos de origen Israelí para estudiar su comportamiento. Posteriormente, hacia finales de los setenta y estimulados por la crisis del petróleo de 1973, instituciones universitarias (la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional en Bogotá, la Universidad del Valle, entre otras) y fundaciones (como el Centro Las Gaviotas) sentaron las bases para instalar calentadores solares domésticos y grandes sistemas de calentamiento de agua para uso en centros de servicios comunitarios (como hospitales y cafeterías).

¹⁸ CELEMIN, María del rosario. FUENTES DE ENERGÍAS PARA EL FUTURO. Ministerio de educación, 2008. P 144 -145. ISBN 8436946758. [Citado el 06 de diciembre de 2013]

Algunos desarrollos resultaron bastante innovadores. Sin embargo, se adoptó finalmente el sistema convencional que consta de uno o varios colectores solares y de su respectivo tanque de almacenamiento. El colector empleaba una parrilla de tubería de cobre y, como absorbedor, láminas de cobre o de aluminio. Como película absorbidora se empleaba pintura corriente o con aditivos, y otros absorbedores selectivos. La cubierta exterior era vidrio corriente o templado y el aislamiento fibra de vidrio, icopor o poliuretano. El tanque generalmente era metálico en sistemas presurizados o de asbesto cemento en sistemas abiertos.

Estos desarrollos tuvieron su máxima expresión a mediados de los ochenta en la aplicación masiva de calentadores en urbanizaciones en Medellín (Villa Valle de Aburra) y Bogotá (Ciudad Tunal, Ciudad Salitre) en donde fueron instalados miles de calentadores, desarrollados y fabricados por el Centro Las Gaviotas (Figura 7); el Palacio de Nariño, en Bogotá, también tuvo uno de estos grandes calentadores. A mediados de los ochenta surgieron varias compañías nacionales en Bogotá, Manizales y Medellín que fabricaron e instalaron miles de calentadores solares de diversas capacidades en esas ciudades. Muchas instituciones religiosas montaron calentadores solares en sus conventos y también alguna cadena hotelera (Hoteles Dann) (Figura 8 y 9).¹⁹

Hacia finales de los 80, el programa PESENCA (Programa Especial de Energía de la Costa Atlántica), un proyecto realizado por CORELCA (Corporación de Energía Eléctrica de la Costa Atlántica), el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) y la GTZ (Sociedad Alemana de Cooperación Técnica), introdujo calentadores solares en la Costa Atlántica y desarrolló un campo experimental en Turipaná, Córdoba, en donde se realizaron pruebas y ensayos para determinar la eficiencia de estos sistemas. Este momento puede considerarse el origen de las normas sobre calentadores solares, iniciativa que siguió su desarrollo por parte del ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas) y que ha dado origen a las normas existentes en el país sobre tales dispositivos.

Si bien los calentadores solares para una pequeña familia costaban ya a mediados de los ochenta y noventa el equivalente a US\$1000 por sistema (tanque de 120 litros, $2m^2$ de colectores solares) y representaban una inversión inicial medianamente alta, instituciones como el antiguo Banco Central Hipotecario, al hacer un análisis valor presente neto, comprendieron que era más económico emplear calentadores solares que emplear electricidad para calentar agua y obvió

¹⁹ RODRIGUEZ MURCIA, H. (2009): “desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas”, revista de Ingeniería, no. 28, noviembre, pp. 84.

la inversión que harían los usuarios dotando a varias de sus urbanizaciones con estos equipos. Pero fue posteriormente la introducción de un energético más barato, el gas natural, la que desplazó del mercado esta naciente industria desde mediados de los noventa hasta la actualidad.



Figura 7. Vista parcial de los 1250 calentadores solares instalados por el Centro Las Gaviotas a mediados de los ochenta en Ciudad Salitre, Bogotá, urbanización del Banco Central Hipotecario.²⁰



Figura 8. Calentador de la cafetería de la antigua Empresa de Energía de Bogotá (EEB). Construido en 1983 por el Centro Las Gaviotas (140 m² de colectores, tanque de 12000 litros) y desde entonces en operación. Estudios previos para la EEB por la Universidad Nacional de Colombia.²¹

²⁰ Ibid, pp. 85.

²¹ Ibid., pp. 85.



Figura 9. Colectores solares del Hospital Pablo Tobón Uribe, Medellín, en operación desde mediados de los ochenta (240 m² de colectores, tanque de 20 m³, no visible).²²

El desarrollo alcanzado hasta 1996 indicaba que se habían instalado 48 901 m² de calentadores solares, principalmente en Medellín y Bogotá, y en barrios con financiación del Banco Central Hipotecario. La mayoría de los sistemas funcionaban bien pero algunos usuarios esperaban más de los sistemas, lo cual se ha entendido como que la demanda era superior a la capacidad de los mismos. No se han realizado nuevos estudios o evaluaciones sobre cómo se han comportado los sistemas instalados aunque se sabe, por ejemplo, que el calentador de la antigua sede de la Empresa de Energía de Bogotá lleva más de 25 años suministrando agua caliente. Actualmente, la industria de calentadores solares en el país sigue deprimida a la espera de una nueva crisis de energía.²³

2.9. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor puede ser definida como la ciencia que estudia el movimiento de energía producida por una diferencia de temperaturas. Todos los procesos de transferencia de calor comprenden el intercambio y la conversión de energía. Sin embargo es importante tener en cuenta las dos primeras leyes de la termodinámica.²⁴

²² Ibid, pp. 85.

²³ Ibid, pp. 85-86.

²⁴ DE JUANA SARDON, José maría. ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL DESARROLLO. Editorial paraninfo, 2003. ISBN 842832864. [Citado el 06 de diciembre de 2013].

Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Como se muestra en la (Figura 10), nos referimos a los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor como *modos*. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un fluido. Utilizamos el término **conducción** Para referirnos a la transferencia de calor que se produciría a través del medio. En cambio, el termino **convección** se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperatura. El tercer modo de transferencia de calor se denomina **radiación térmica**. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas.²⁵

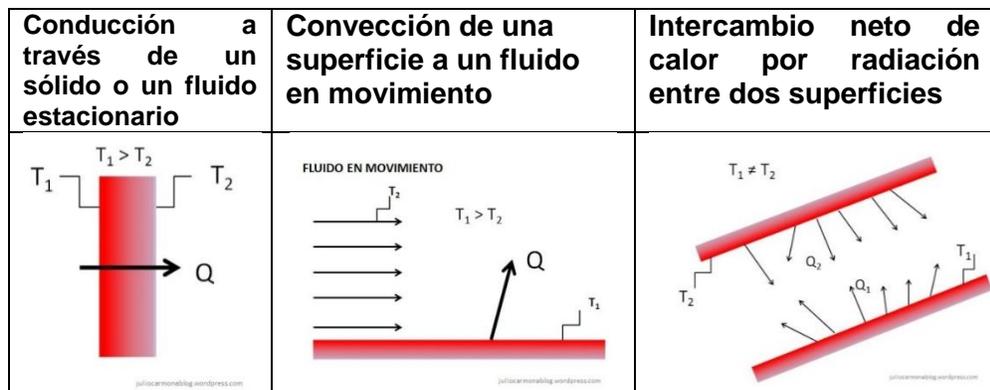


Figura 10. Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación²⁶.

2.9.1. CONDUCCIÓN.

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

El mecanismo físico de conducción se explica más fácilmente considerando un gas y usando ideas que le sean familiares, propias de su experiencia en

²⁵ INCROPERA, Frank. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. Cuarta edición. México: Prentice hall, 1999. Pág. 2. [Citado el 06 de diciembre de 2013]

²⁶

termodinámica. Piense en un gas en el que existe un gradiente de temperatura y suponga que no hay movimiento global. El gas puede ocupar el espacio entre dos superficies que se mantienen a diferentes temperaturas, como se muestra en la (Figura 11). Asociamos la temperatura en cualquier punto con la energía de las moléculas de gas en la proximidad del punto. Esta energía está relacionada con el movimiento traslacional aleatorio, así como con los movimientos internos de rotación y vibración de las moléculas.

Las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y, cuando las moléculas vecinas chocan, como lo hacen constantemente, debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente. Esta transferencia es evidente en la (Figura 15). Las moléculas procedentes de arriba y de abajo, cruzan constantemente el plano hipotético en x_0 gracias a su movimiento aleatorio. Sin embargo, las moléculas de arriba están asociadas con una temperatura mayor que la que tienen las de abajo, en cuyo caso debe haber una transferencia neta de energía en la dirección positiva de x . Se habla de la transferencia neta de energía debida al movimiento molecular aleatorio con una difusión de energía.

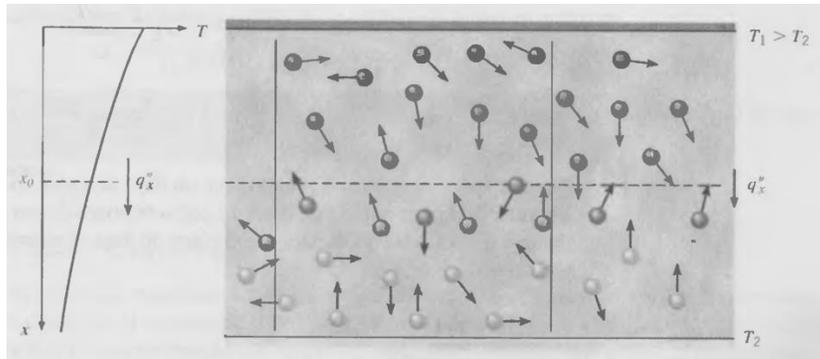


Figura 11. Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debida a la actividad molecular.²⁷

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como ley de Fourier. Para

²⁷ Ibid, pp. 3.

una pared plana unidimensional, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [3.1]$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área q_x'' (W/m^2) es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad, k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($W/m \cdot K$) y es una característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente. En las condiciones de estado estable, donde la distribución de temperatura es lineal.²⁸

2.9.2. CONVECCIÓN.

Utilizamos el término convección para describir la transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre esta. Aunque el mecanismo de difusión (movimiento aleatorio de las moléculas del fluido) contribuye a la transferencia, generalmente la aportación dominante es la del movimiento global o total dependiendo el fluido.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Hablamos de convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. En cambio, en la convección libre (o natural) el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es de la forma

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad [3.2]$$

Donde q'' , el flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta

²⁸ Ibid, pp. 3-4.

expresión se conoce como ley de enfriamiento de Newton, y la constante de proporcionalidad h ($W/m^2 * K$) se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección. Este depende de las condiciones de la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.²⁹

2.9.3. RADIACIÓN

Reconocemos que la transferencia de calor por conducción y convección requiere la presencia de un gradiente de temperatura en alguna forma de materia. Por el contrario, la transferencia de calor mediante radiación térmica no requiere materia. Es un proceso en extremo importante, y en el sentido físico es quizás el más interesante de los modos de transferencia de calor. Es relevante para muchos procesos industriales de calentamiento, enfriamiento y de secado, así como también para métodos de conversión que incluyen la utilización de combustibles fósiles y radiación solar.

Considere los procesos de transferencia de radiación para la superficie de la figura 16 a. La radiación que la superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) se denomina la potencia emisiva superficial E . Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por la ley de Stefan Boltzmann

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad [3.3]$$

Donde T_s es la temperatura absoluta (K) de la superficie y σ es la constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5.67 * 10^{-8} W/m^2 * K^4$). Dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro.

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad [3.4]$$

²⁹ Ibid, pp. 6-8-284. [Citado el 06 de diciembre de 2013]

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Esto depende marcadamente del material de la superficie y del acabado.

La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. La radiación se origina desde una fuente especial, como el sol, o de otras superficies a las que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente, designamos la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la irradiación G (figura 12 a).

Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea absorbida por la superficie, y así se incrementaría la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área superficial unitaria se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad α . Es decir,

$$G_{abs} = \alpha G \quad [3.5]$$

Donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\alpha < 1$ y la superficie es opaca, partes de la irradiación se reflejan. Si la superficie es semitransparente, partes de la irradiación también se transmiten.

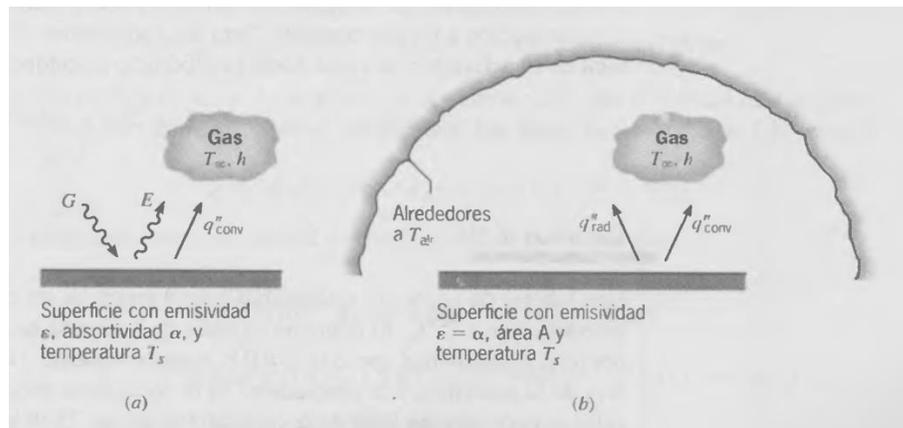


Figura 12. Intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre una superficie y sus alrededores.³⁰

Sin embargo, mientras la radiación absorbida y emitida aumenta y disminuye, respectivamente, la energía térmica de la materia, la radiación reflejada y

³⁰ Ibid, pp. 9.

transmitida no tiene ningún efecto sobre esta energía. Advierta que el valor de α depende de la naturaleza de la irradiación así como de la superficie misma.³¹

2.10. BALANCE TÉRMICO

El balance energético de un colector plano es:

$$Q_1 = Q + Q_2 \quad [3.6]$$

Dónde:

Q_1 es la energía incidente (directa+difusa+albedo) en la unidad de tiempo.

Q es la energía útil, es decir, la recogida por el fluido caloportador.

Q_2 es la energía perdida por disipación al exterior.

Dada la definición de intensidad de energía radiante, Q_1 será simplemente el producto de la intensidad por la superficie. No toda la energía Q_1 incidente será absorbida en el absorbedor. En primer lugar, en caso de existir cubierta, hay que contar con la transmitancia de la misma, que dejará pasar solamente una parte de dicha energía (TSI). Por otro lado, el coeficiente de absorción o absorptancia α de la placa absorbidora nunca llega a ser igual a la unidad, de forma que la fracción de energía realmente absorbida es:

$$Q_1 = T \alpha SI \quad [3.7]$$

En cuanto a la energía Q_2 que se pierde, su cálculo en detalle es muy complejo debido a que, como se sabe, se debe tener en cuenta simultáneamente y en diferente proporción las pérdidas por radiación, convección y conducción. Sin embargo, y con objeto de poder utilizar una formulación simple, se ha convenido en englobar estas influencias en el denominado coeficiente global de pérdidas U , el cual se mide experimentalmente y es un dato suministrado por el fabricante. La experiencia ha demostrado que el suponer las pérdidas por unidad de superficie proporcionales a la diferencia entre la temperatura media t_c de la placa absorbidora y la del ambiente t_a , siendo el factor de proporcionalidad precisamente dicho coeficiente U , constituye una aproximación bastante buena. Así pues:

$$Q_2 = SU(t_c - t_a) \quad [3.8]$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1) se obtiene:

³¹ Ibid, pp. 9-10-634.

$$Q = S[I(\tau\alpha) - U(t_c - t_a)] \quad [3.9]$$

Donde,

S=superficie del colector.

I= radiación incidente total sobre el colector por unidad de superficie (W/m^2), es decir, intensidad radiante.

τ = transmitancia de la cubierta transparente.

α = absorptancia de la placa absorbidora.

U = coeficiente global de pérdidas [$W/ (m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$].

t_c = temperatura media de la placa absorbidora ($^\circ\text{C}$).

t_a = temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$).

La temperatura media de la placa absorbidora no puede calcularse de forma simple. Para obtenerla se debe medir directamente mediante sensores térmicos convenientemente distribuidos. Por el contrario, si puede conocerse con suficiente exactitud la temperatura media t_m del fluido caloportador en el instante en que este circula por el colector. Una forma sencilla de calcular esta temperatura es hallar la media entre la temperatura de dicho fluido a la entrada, t_e , y a la salida, t_s , del colector según se muestra en la (Figura 13).

$$t_m = \frac{t_e + t_s}{2} \quad [3.10]$$

Si se quiere sustituir la temperatura de la placa absorbidora t_c , por la temperatura del fluido t_m , se debe introducir un factor correctivo, F_R , llamado factor de eficacia o coeficiente de transporte de calor, que es siempre menor que la unidad y que, por tanto, hace disminuir el valor de Q .

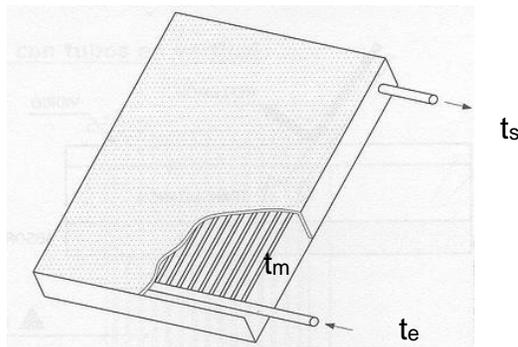


Figura 13. Temperaturas en el colector de placa plana.

La ecuación (4) se transforma en:

$$Q = F_R S [I(\tau\alpha) - U(t_m - t_a)] \quad [3.11]$$

Conocida como ecuación de Bliss.

El índice de eficiencia del colector, η , está definida por la relación entre la energía captada y la recibida en un instante dado.³²

$$\eta = \frac{Q}{SI} \quad [3.12]$$

Sustituyendo (6) en (7) se obtiene:

$$\eta = F_R [(\tau\alpha) - U(t_m - t_a) / I] \quad [3.13]$$

³² Instalaciones de energía solar, Centro de estudios de energía solar, Progensa, Tomo 3, 3a Edición, España 1992.

3. METODOLOGIA Y PROCESO DE DISEÑO

Teniendo en cuenta la necesidad requerida por la cafetería, de un proceso para el calentamiento de agua que evite el consumo de energía eléctrica y la quema de gas natural. Se realizó el DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA, CON UN ARREGLO EN SERIE DE COLECTORES DE PLACA PLANA, UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR. El sistema funciona por efecto termosifón, es decir, el agua que se calienta al pasar por el serpentín disminuye su densidad y peso, de esta forma tiende a ascender de manera independiente hacia el tanque, mientras el agua fría que se encuentra almacenada tiende a descender hasta el arreglo de tubos, debido a que tiene mayor densidad y peso. Dado a esto La recirculación del agua se realiza por el efecto de gravedad.

3.1. DISEÑO CONCEPTUAL

En base al presupuesto asignado para el desarrollo del presente proyecto y los requerimientos para su utilización, se presenta el diseño conceptual del prototipo (figura 14) que consta de:

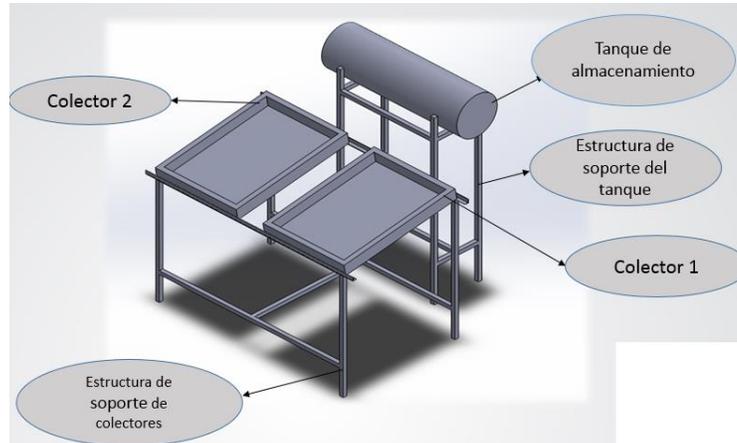


Figura 14. Prototipo del sistema de calentamiento, fuente: autores del proyecto.

3.1.1. Estructura de soporte de los colectores

Para el diseño de la estructura de soporte se debe garantizar que la inclinación y la orientación de los colectores serán las óptimas con el fin de aumentar el rendimiento del sistema.

3.1.2. Estructura de soporte del tanque de almacenamiento

A diferencia de la estructura de los colectores, este soporte debe mantener al tanque a una altura entre los 25 a 40 cm, por encima de la superficie de los colectores, De esta forma se logra que el agua recircule por todo el sistema, debido al efecto de la gravedad al cual está sometido.

3.1.3. Placa absorbedora

Este elemento es el más importante en el proceso de calentamiento del agua, debido a que es el encargado de absorber la radiación producida por el sol, para luego transformarla en energía térmica y así mismo transferirla al fluido. Generalmente pueden fabricarse con láminas de cobre o aluminio con un espesor no superior a 0.3mm. Se recomienda mantener una distancia entre los 10 y 12 cm entre los tubos, para una mejor absorción y almacenamiento de calor, se debe realizar un recubrimiento en negro mate debido a que este tipo de pintura posee buenas propiedades absorbedoras tales como una emisividad de 0.95 y una absorptancia de 0.9.

3.1.4. Cubierta

Es una lámina transparente que se encuentra encima de la placa absorbedora a una distancia no mayor a 5cm y una emisividad de 0.84, Es decir que emite el 84% de la energía que será absorbida por la placa y el 16% restante será reflejada. Sin embargo tiene como objetivo generar el efecto invernadero dentro del colector, obteniendo una gran capacidad de absorber energía y reducir las pérdidas por transferencia de calor al medio ambiente. El sistema contará con dos cubiertas independientes para cada colector fabricadas en vidrio templado con un espesor de 5mm.

3.1.5. Tanque de almacenamiento

Se pretende que sea fabricado en acero inoxidable, debido a que estará en contacto con el agua y además es un material resistente a la corrosión. Tendrá una capacidad de 120 L, y cuenta con un diseño para soportar presiones entre los 150 y 220 psi, además se le realizarán 9 uniones de ½" roscadas, para las diversas conexiones del sistema, tanto la de suministro de agua para el equipo como la de servicio para la cafetería. En la parte externa será recubierto con aislante térmico

que es de vital importancia para la eficiencia del sistema y se cubrirá totalmente con una lámina de aluminio de espesor 1.9 mm.

3.1.6. Termocuplas tipo K

Las termocuplas son sensores de temperaturas que normalmente se encuentran dentro de un tubo de acero inoxidable, en un extremo está la unión y en el otro se encuentra el terminal eléctrico de los cables protegido por una caja redonda de aluminio. Con estos dispositivos se obtendrán las temperaturas de entrada y salida en cada colector, así mismo la temperatura dentro del tanque de almacenamiento.

3.1.7. Serpentín

Está sistema debe tener dos circuitos hidráulicos, uno que estará instalado al tanque para la recirculación de agua y otro que será el de consumo de agua caliente por parte de la cafetería. El tipo de material a utilizar debe contener propiedades térmicas óptimas. Se debe tener en cuenta que no se recomienda utilizar diámetros pequeños, y evitar en lo posible las curvas y demasiadas conexiones, debido a que la fuerza con la que circula el agua a través del serpentín es relativamente pequeña. De esta forma se plantea utilizar tubería de cobre de 1 ½", debido a que es un material ideal para transmitir calor por sus propiedades específicas. Tiene una emisividad de 0.88 y una conductividad térmica de 401 w/m K.

3.1.8. Aislante térmico

El aislamiento tiene como objetivo disminuir las pérdidas de calor desde el convertidor hasta el ambiente que lo rodea, para impedir la pérdida de calor. Para realizar una buena selección, son importante las propiedades térmicas del material a utilizar. Para el sistema de colectores se utilizara manta térmica con recubrimiento de poliuretano en los costados, y para el tanque de almacenamiento se utilizara poliuretano que tiene una conductividad térmica de 0.027 w/m K.

3.2. DISEÑO EN DETALLE

Para el diseño del sistema es importante tener en cuenta el ciclo de la radiación solar que incide en toda la región donde se instalara el equipo.

3.2.1. Dimensionamiento

Para el cálculo de las dimensiones de cada uno de los componentes del sistema de calentamiento, se debe calcular la energía que se necesita para elevar la temperatura del agua desde una temperatura inicial hasta una temperatura de suministro. El parámetro más importante a determinar es el área de la placa de absorción y su análisis se realiza de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$A_C = \frac{L_{UA}}{nH_T} = \frac{\dot{Q}_{UA} + \dot{Q}_T}{nH_T} \quad [4.1]$$

Dónde:

A_C : Área de la placa de absorción, [m^2].

L_{UA} : Carga térmica mensual, [GJ/ año].

\dot{Q}_{UA} : Calor requerido para calentar el agua, [GJ/ año].

\dot{Q}_T : Pérdidas en el tanque, [GJ/ año].

n : Eficiencia del colector (85%).

H_T : Radiación global promedio anual en la superficie [kWh/m^2 -día].

Para realizar los cálculos pertinentes, a través de la ecuación [4.1] se debe tener en cuenta:

- Promedio anual de la radiación solar.
- Ubicación del sistema.
- Para la radiación global promedio sobre la superficie se tomaron datos registrados por el Manual de Radiación Solar en Colombia, en la ciudad de Bucaramanga con un valor de 13.32 [MJ/m^2 -día].

Para el dimensionamiento del colector y del tanque es necesario calcular la carga térmica mensual, la cual está definida como el calor necesario para calentar los 150 L de agua a 70°C y las pérdidas en el tanque de almacenamiento, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$L_{CA} = \dot{Q}_{UA} + \dot{Q}_T \quad [4.2]$$

$$\dot{Q}_{UA} = \dot{m}NC_p(T_f - T_0) \quad [4.3]$$

Dónde:

\dot{m} : Consumo diario de agua caliente kg/día

N: días del año

C_p : Calor específico en [J/kg. C]

T_f : Temperatura final del agua en °C

T_0 : Temperatura inicial del agua

T_a : Temperatura ambiente en °C

Se supone que las pérdidas en el tanque son despreciables para el cálculo del área del colector, de esta forma solo se necesita conocer la carga para el calentamiento del agua³³, entonces reemplazando en la ecuación [4.3] se tiene:

$$\dot{Q}_{UA} = 150 \times 365 \times 4190 \times (70 - 24) = 10552.515 \frac{MJ}{año}$$

Se requieren entonces anuales para satisfacer las necesidades de agua caliente de la cafetería. Para la determinación del área de la placa de absorción usamos la ecuación [4.1]:

$$A_c = \frac{10552.515 \frac{MJ}{año}}{0.85 \times 13.32 \left[\frac{MJ}{m^2} - dia \right] \times 365 \frac{días}{años}} = 2.5m^2$$

Entonces, se requiere un colector cuya placa de absorción será de $2.5 m^2$ para calentar el agua. De esta forma como estamos calculando el área para el colector y en este proyecto tendremos dos colectores el área de cada placa sería de 1.25

³³ Burbano, J. (2006). Diseño y construcción de un calentador solar de agua operando por termosifón. *Scientia et Technica Año XII, 6 (31)*. Recuperado desde: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/6389/3677>

m^2 . Por otra parte para calcular las pérdidas del tanque se supondrá una altura de 1.20 m y un diámetro de 40 cm. De esta forma el volumen del tanque será de:

$$V_T = \pi \frac{0.4^2}{4} 1.2 = 0.150m^3 = 150 \text{ lts} \quad [4.4]$$

Su área exterior, entonces es:

$$A_T = \frac{\pi D^2}{2} + \pi Dh = \frac{\pi 0.4^2}{2} + \pi(0.4)(1.2) = 1.8 \text{ m}^2 \quad [4.5]$$

Ya obteniendo el volumen del tanque y todas sus dimensiones se procede con el diseño detallado de los componentes principales del sistema de calentamiento tales como:

- **Placa absorbedora**

En la (Figura 15) se muestra las dimensiones de la placa absorbedora.

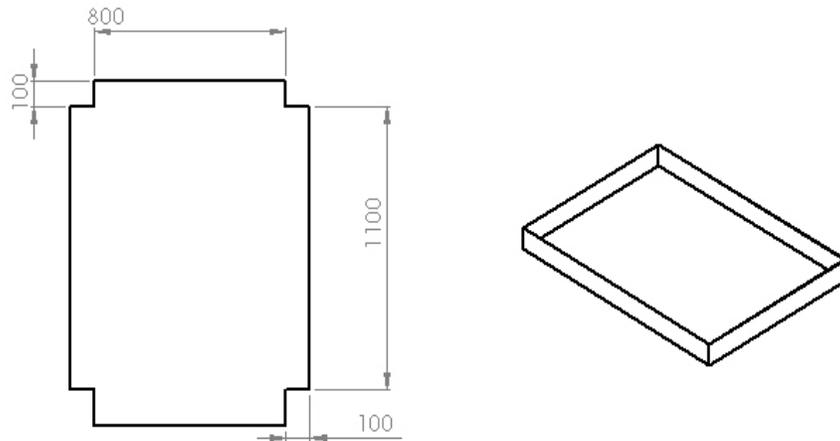


Figura 15. Plano de la placa absorbedora, fuente: autores del proyecto.

- **Carcasa del colector**

En la (Figura 16) se muestra la carcasa del colector solar que será el elemento que cubrirá la placa absorbedora y se utilizara un aislante térmico para recubrir la placa absorbedora.

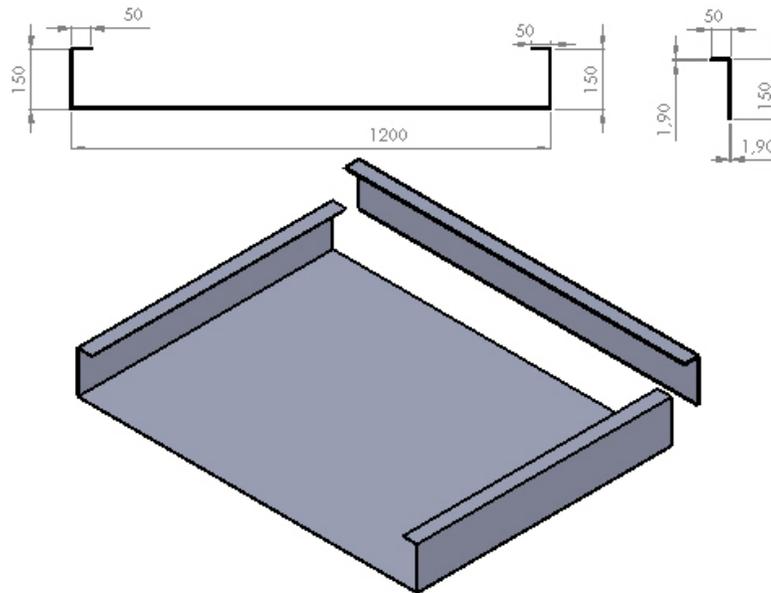


Figura 16. Plano de la carca del colector solar, fuente: autores del proyecto.

Es importante aclarar que por motivos de disponibilidad del vidrio templado utilizado para la placa absorbedora, se variaron las medidas de la placa, debido a que la empresa nos proporcionó un vidrio con medidas menores a las solicitadas. De esta forma se rediseñó este elemento que es de vital importancia para el proceso de calentamiento de agua, con un área de 0.88 m^2 .

3.3. FABRICACIÓN

En este capítulo se describe detalladamente el proceso de construcción de cada uno de los componentes del sistema de calentamiento solar.

3.3.1. Tanque de almacenamiento

La fabricación de este componente estuvo a cargo de una empresa capacitada en el diseño y construcción de tanques a presión, teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento requerida por los autores principales (Figura 17).

El tanque esta hecho totalmente en acero inoxidable y cuenta con 9 conexiones con niples de ½" roscados, para realizar las diferentes instalaciones de la tubería.



Figura 17. Tanque interno hecho en acero inoxidable, fuente: autores del proyecto.

3.3.2. Aislamiento del tanque de almacenamiento

Para el proceso de aislamiento se tomó la lámina de aluminio y se le realizaron los mismos orificios del tanque interno. Luego se sometió al proceso de doblado de acuerdo a la forma del tanque (Figura 18). Una vez terminado el proceso de doblado se procede a la aplicación manual del aislante térmico (poliuretano) como se muestra en la (Figura 19), al finalizar se sella completamente el tanque utilizando soldadura autógena y por último se pinta de negro para una mejor estética y presentación del equipo.



Figura 18. Tanque externo hecho en lámina de aluminio, fuente: autores del proyecto.



Figura 19. Aplicación del aislante térmico, fuente: autores del proyecto

3.3.3. Placa absorbedora

Se utilizó una lámina de aluminio de 0.4mm, pintada completamente en negro mate, debido a que tiene una buena conductividad térmica equivalente a 200 w/m.k. y la pintura una absorbancia promedio de 0.93. Se sometió a un proceso de doblado, teniendo en cuenta las dimensiones propuestas 1,10m de largo x 90 cm de ancho. Finalmente el resultado obtenido de este proceso se muestra en la (Figura 20).



Figura 20. Placa absorbedora, fuente: autores del proyecto.

3.3.4. Carcasa del colector

Se cortaron y se doblaron las láminas para darle forma a la caja del colector, se realizaron 2 orificios en cada carcasa para la conexión en serie entre los dos colectores, además para el aislamiento se utilizó manta térmica para los costados y en la parte inferior poliuretano (Figura 21).



Figura 21. Carcasa del colector, fuente: autores del proyecto.

3.3.5. Serpentín

Se utilizó tubería de cobre de 1 ½", debido a su buena conductividad térmica 380 w/m.k. para la construcción se utilizaron accesorios tales como se muestra en la (figura 22):

- Codos de cobre 1 ½".
- T de cobre 1 ½".
- Reducciones galvanizadas de 1 ½" a ½".
- Uniones universales 1 ½".
- Adaptador macho de cobre de 1 ½".

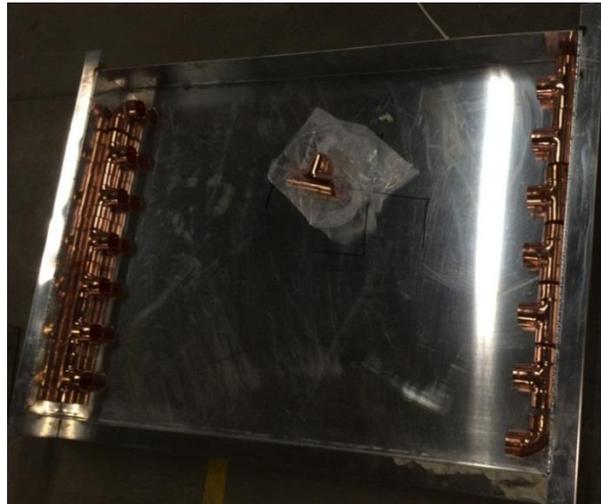


Figura 22. Accesorios del serpentín, fuente: autores del proyecto.

Finalmente se tiene el serpentín armado y soldado totalmente, es importante que la soldadura quede perfectamente ejecutada para que no existan fugas, sin embargo le realizamos las pruebas llenando con agua el interior del serpentín y comprobamos que no existían fugas. En la (figura 23) se muestran los dos serpentines del sistema de calentamiento.

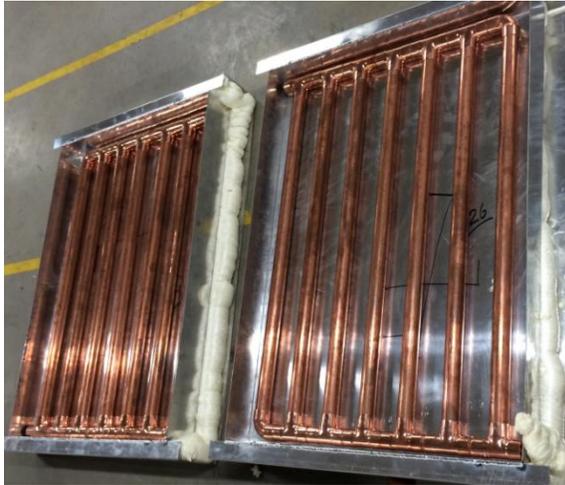


Figura 23. Serpentin de ambos colectores, fuente: autores del proyecto.

3.3.6. Cubierta

Este componente debe garantizar la hermeticidad del colector, por lo que debe estar sellado completamente. Tiene una medida de 1.20 m * 0.9 m. Así mismo se construyó un marco para el vidrio templado, en donde sujetamos el vidrio con silicona para acoplarlo al marco, y así se evitar el ingreso de agua al colector por parte de eventos ambientales externos.

En la (figura 24) se muestra el sistema de colectores acoplados con todos sus componentes. Para la fabricación del marco del vidrio se cortaron 8 tramos de ángulos en aluminio de 1 ½" x 1/8" de la siguiente forma:

- 4 tramos de 91.5 cm
- 4 tramos de 121 cm



Figura 24. Colector solar totalmente acoplado, fuente: autores del proyecto.

3.3.7. Estructura de los colectores

Para la construcción de la estructura de soporte se tiene en cuenta la inclinación que deben llevar los colectores, en la parte delantera tiene una altura de 1m y para la parte trasera una altura de 1.30 m. ofreciendo un ángulo de inclinación de 25° (Figura 25). Estas medidas fueron determinadas de acuerdo al sitio de instalación, que tenía como ubicación en la terraza del último piso del edificio k, debido a que este tiene un muro de seguridad con una altura de 1.30 metros, y no era adecuado construir la estructura por debajo de esa altura, por razones de la sombra que podía suministrarle al equipo solar.

La estructura se construye con:

- 2 tubos cuadrados de $1\frac{1}{2}$ " x $1\frac{1}{2}$ " calibre 14 de 1.70 m.
- 2 tubos cuadrados de $1\frac{1}{2}$ " x $1\frac{1}{2}$ " calibre 14 de 1.30 m.
- 2 tubos cuadrados de $1\frac{1}{2}$ " x $1\frac{1}{2}$ " calibre 14 de 1 m.
- 1 tubo cuadrado de $1\frac{1}{2}$ " x $1\frac{1}{2}$ " calibre 14 de 1.13 m.
- 2 ángulos de $1\frac{1}{2}$ " x $1/8$ " de 2.10 m.



Figura 25. Estructura de soporte de colectores, fuente: Autores del proyecto.

3.3.8. Estructura de soporte del tanque de almacenamiento

La fabricación de este componente se realizó respetando la altura que debe existir entre el colector y el tanque. De esta forma la estructura cuenta con:

- 4 tubos cuadrados de $1\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$ calibre 14 de 2.06 m.
- 3 tubos cuadrados de $1\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$ calibre 14 de 1 m.
- 4 tubos cuadrados de $1\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$ calibre 14 de 53 cm.

Luego de cortar todos los elementos, se soldaron cada componente dando forma a la estructura como se muestra en la (figura 26), en la parte superior para un mejor apoyo del tanque cortamos 2 tramos de platina y se sometió a un proceso de doblado con un radio aproximado de $R= 22$ cm, para darle forma a la curvatura que tiene el tanque, y de esta forma el tanque quedara completamente sujeto.

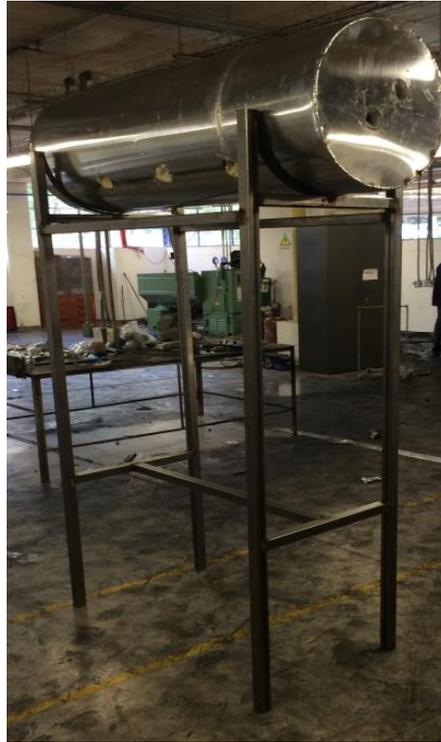


Figura 26. Estructura de soporte del tanque de almacenamiento, fuente: Autores del proyecto.

4. CALCULOS Y RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos durante las pruebas que se realizaron los días 29, 30, 31 de enero y 05 de febrero del presente año, se tomaron los datos necesarios en las entradas, salidas de cada colector y en el tanque de almacenamiento, con el fin de hallar la eficiencia de los calentadores solares.

Se realizaron pruebas variando su conexión en serie y paralelo, además se evaluaron independientemente cada colector. Con el fin de comparar los resultados obtenidos y verificar en cuál de las conexiones es más eficiente el sistema.

4.1. Cálculos previos

Por medio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Nos proporcionó el dato del número promedio de horas de brillo solar en la zona de florida blanca la cual fue de 174 horas mes. Con la cual podemos calcular el promedio de radiación solar. Con la siguiente fórmula:

$$H = 490 D^{0.357} R^{0.262} \quad [5.1]$$

H: Radiación solar (cal/cm².min).

D: Número de horas de brillo solar/12.

R: Humedad relativa.

Como tenemos el número promedio de horas de brillo solar mes y para resolver la ecuación necesitamos la humedad relativa de Bucaramanga que sería de 80%.

Las horas de brillo solar mes se dividen entre 30 para obtener el número de horas de brillo solar día, luego como lo indica la ecuación [5.1] se divide entre 12.

$$D = \frac{174}{30} = 5.8$$

$$D = \frac{5.8}{12} = 0.4833$$

Finalmente se procedió a realizar los cálculos.

$$H = 490 \cdot 0.48^{0.357} \cdot 0.8^{0.262}$$

$$H = 490 \cdot 0.48^{0.357} \cdot 0.8^{0.262}$$

$$H = 355.6385 \text{ cal/cm}^2 * \text{min}$$

$$H = (355.6385 \text{ cal/cm}^2 * \text{min}) * \frac{(1.353 \text{ W/m}^2)}{(1.94 \text{ cal/cm}^2 * \text{min})}$$

$$H = 248.030 \text{ W/m}^2$$

Se obtuvo una radiación promedio de 248.030 W/m^2 .

4.2. Calculo base

A continuación se realizara el procedimiento que se utilizó para calcular cada una de las variables necesarias para obtener las eficiencias a las 11 am del colector 1.

Tabla 4. Temperaturas de entrada y salida del colector 1

11:00 am	T_e °C	T_s °C	T_m °C	T_a °C	$H W/m^2$	X	η
1	32,994	45,236					
2	31,647	46,068					
3	31,231	44,428					
Promedio							
σ							
%e							

T_e : Temperatura de entrada en °C.

T_s : Temperatura de salida en °C.

T_m : Temperatura media en °C.

T_a : Temperatura ambiente en °C.

H : Promedio de la Radiación solar w/m.

X : Ecuación diferencial.

η : Eficiencia.

σ : Desviación estándar.

%e: Porcentaje de error.

Como se indica en la tabla, se realizara el paso a paso de como calcular cada una de las variables. Las temperaturas T_e y T_s fueron obtenidas a través de las termocuplas que fueron conectadas a un sistema de adquisición de datos, que nos facilitaba lecturas de temperaturas segundo a segundo y cada 5 minutos.

Inicialmente se tomaron 3 datos con un intervalo entre sí de 5 minutos, de los cuales el primer dato se tomó 5 minutos aproximadamente antes de la hora indicada en la tabla.

La temperatura media (T_m) se calcula a través de la siguiente formula:

$$T_m = \frac{T_{e1} + T_{s1}}{2} \quad [5.2]$$

Se realizaran los cálculos para la fila 1, y así mismo se pueden realizar para las demás filas:

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2}$$

$$T_m = \frac{32.994 + 45.236}{2}$$

$$T_m = 39.115$$

La temperatura ambiente fue de 26°C, esta información se obtuvo a través de aplicaciones móviles. Para la siguiente columna que corresponde a la radiación solar se toma como base la radiación promedio solar anteriormente calculada en los cálculos previos.

Luego se procede a calcular con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{T_m - T_a}{H} \quad [5.3]$$

$$X = \frac{39.115 - 26}{248.030}$$

$$X = 0.05287$$

Se continúa con el cálculo de la eficiencia para cada fila, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.83 - 6.8 * X \quad [5.5]$$

$$\eta = 0.83 - 6.8 * 0.0528$$

$$\eta = 0.4704$$

Para efectuar el cálculo del promedio de cada variable, se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad [5.6]$$

Donde N es el número de datos a calcular y X_i es la variable. Como se tomaron 3 datos se reemplazan en la ecuación, para este caso se utilizaran los datos de temperatura de entrada, Sustituyendo en la ecuación [5.6] la n por el número de datos se obtiene:

$$\bar{X} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 X_i$$

$$\bar{X} = \frac{1}{3} (T_1 + T_2 + T_3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{3} (32.994 + 31.647 + 31.231)$$

$$\bar{X} = 31.957$$

Para calcular el porcentaje de error del promedio de cada variable, es necesario calcular la desviación estándar a través de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad [5.7]$$

Donde N es el número de datos, X_i es la variable y \bar{X} es el promedio de cada una de las variables. De esta forma se procede a realizar los cálculos:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (X_i - \bar{X})^2} \text{ Sustituyendo N por 3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (X_i - 31.957)^2} \text{ Sustituyendo } \bar{X} \text{ por } 31.957$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(32.994 - 31.957)^2 + (31.647 - 31.957)^2 + (31.231 - 31.957)^2]}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(1.037)^2 + (-0.31)^2 + (-0.726)^2]}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} (1.075 + 0.0961 + 0.527)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1.6981}{2}}$$

$$\sigma = \sqrt{0.8490} = 0.922$$

Una vez obtenida la desviación estándar se calcula el porcentaje de error:

$$\%e = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad [5.8]$$

$$\%e = \frac{0.921}{\sqrt{3}} = 0.531$$

Aplicando la fórmula para las demás filas y reemplazando en la tabla 5 se tiene:

Tabla 5. Resultado de los cálculos del porcentaje de error

11:00 am	T_e °C	T_s °C	T_m °C	T_a °C	$H W/m^2$	X	η
1	32,994	45,236	39,115	26	248,03	0,0529	0,470
2	31,647	46,068	38,858	26	248,03	0,0518	0,477
3	31,231	44,428	37,830	26	248,03	0,0477	0,506
Promedio	31,957	45,244	38,601	26	248,03	0,0508	0,485
σ	0,922	0,820	0,680	0	0	0,0027	0,019
$\%e$	0,532	0,473	0,393	0	0	0,0016	0,011

Finalmente se obtiene una eficiencia promedio con un porcentaje de error de $\bar{\eta} = 0.484 \pm 0,531\%$.

Es importante resaltar que todos los resultados de los cálculos efectuados a cada una de las diferentes conexiones realizadas en las pruebas tales como en serie, paralelo y a cada colector individualmente. Se encuentran en los anexos A 1.1, A 2.1, A 3.1 y A 4.1.

4.3. RESULTADOS

De acuerdo con las tablas de anexos A1.1, A2.1, A3.1 y A4.1 donde se encuentran los cálculos y resultados de cada uno de las diferentes conexiones realizadas. Se obtienen las gráficas de eficiencia vs tiempo. Tomando como datos principal la eficiencia promedio, la cual se encuentra resaltada de color amarillo, En cada instante de tiempo. En la (figura) se muestra un esquema de las conexiones que se realizaron para su funcionamiento en cada una de la pruebas

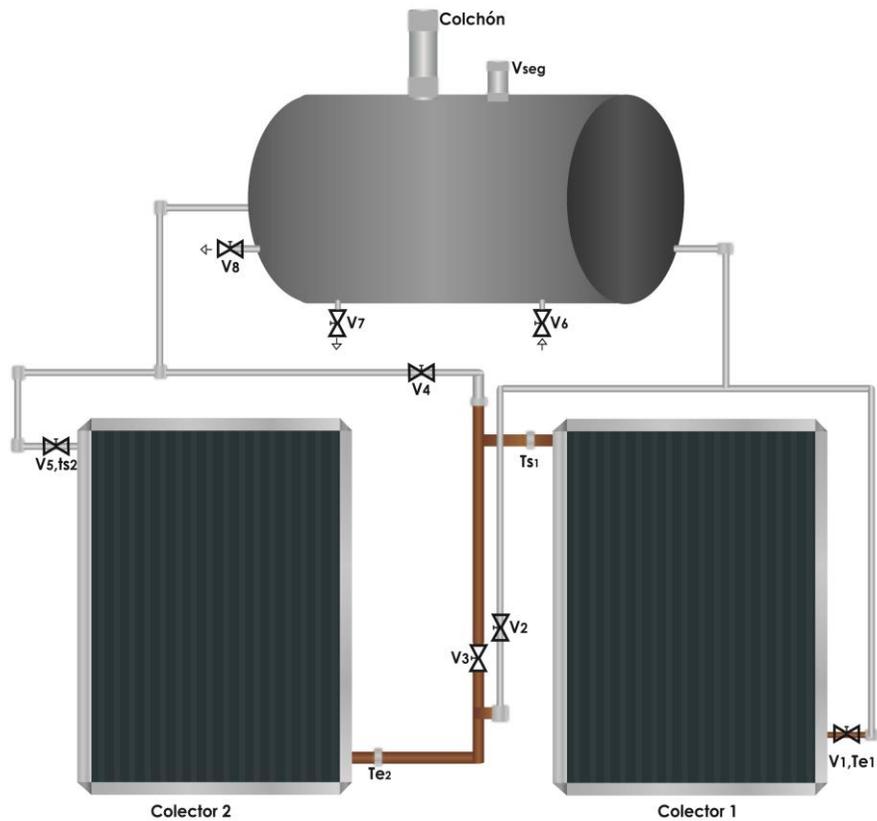


Figura 27. Conexión del sistema de calentamiento, fuente: autores del proyecto.

En la (figura 27) se muestra la conexión que se realizó al sistema de calentamiento con cada una de las variables que utilizamos para obtener los datos necesarios para calcular las eficiencias, donde:

V_1 = Válvula de entrada de agua al colector 1

V_2 = Válvula de entrada de agua desde el tanque al colector 2

V_3 = Válvula de entrada de agua desde el colector 1 al colector 2

V_4 = Válvula de salida de agua del colector 1 al tanque

V_5 = Válvula de salida de agua del colector 2 al tanque

V_6 = Válvula de desagüe del tanque

V_7 = Válvula de suministro de agua de la red

V_8 = Válvula de servicio de agua caliente

V_{seg} = Válvula de seguridad

Colchon= Colchón de aire

4.3.1. Conexión colector 1

En esta conexión se tomaron los resultados del funcionamiento únicamente del colector uno. Para iniciar esta prueba se deben cerrar las válvulas V_2 , V_3 y V_5 para impedir el paso del agua al siguiente colector, y se debe abrir las válvulas V_1 y V_4 que permiten la recirculación del agua al tanque, para ver la configuración de la apertura y cierre de válvulas, es importante ver la (Figura 27). Los datos fueron obtenidos a través de la T_{e1} y T_{s1} . En la (Figura 28) se muestra la curva de la eficiencia vs tiempo que se obtuvo en la prueba del colector 1, logrando su mayor eficiencia de 55.6% a las 2:00 pm. Durante la prueba se presentaron disminución en la eficiencia debido a que la radiación incidente sobre los colectores fue difusa.

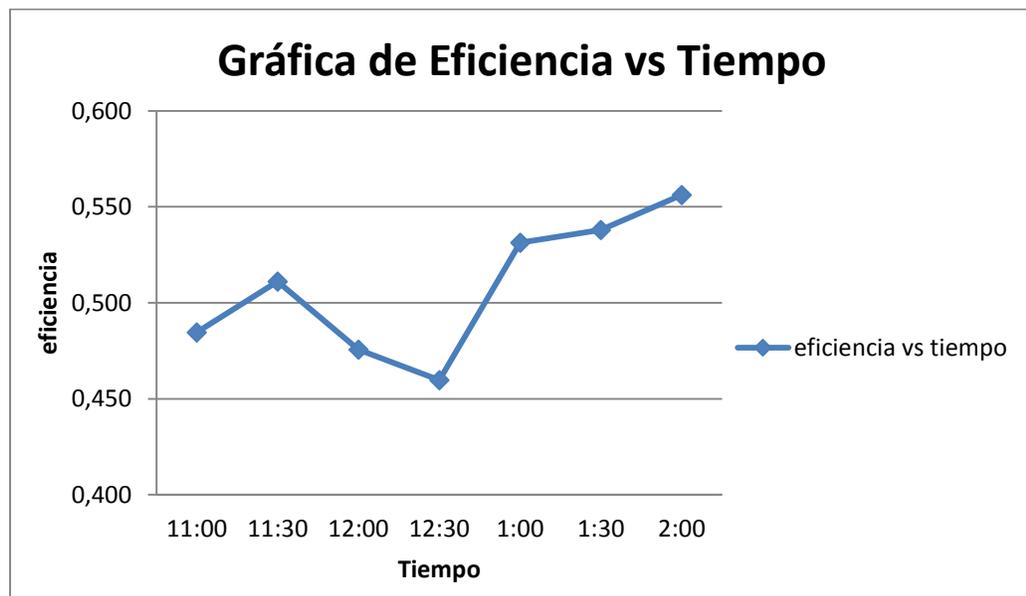


Figura 28. Curva de eficiencia vs tiempo del colector 1, fuente: autores del proyecto.

4.3.2. Conexión colector 2

En esta conexión se tomaron los resultados del funcionamiento únicamente del colector dos. Para este tipo de conexión se deben cerrar las válvulas V_1 , V_3 y V_4 , con el fin de que el agua no ingrese al colector 1, además las válvulas V_2 y V_5 tienen que abrirse para el ingreso del agua del colector al tanque, para ver la configuración de la apertura y cierre de válvulas, es importante ver la (Figura 27). Los datos se tomaron en la T_{e2} y T_{s2} . En la (Figura 29) se muestra la curva de eficiencia vs tiempo que se obtuvo en la prueba del colector 2, logrando una eficiencia máxima de 66% a las 11:00 am.

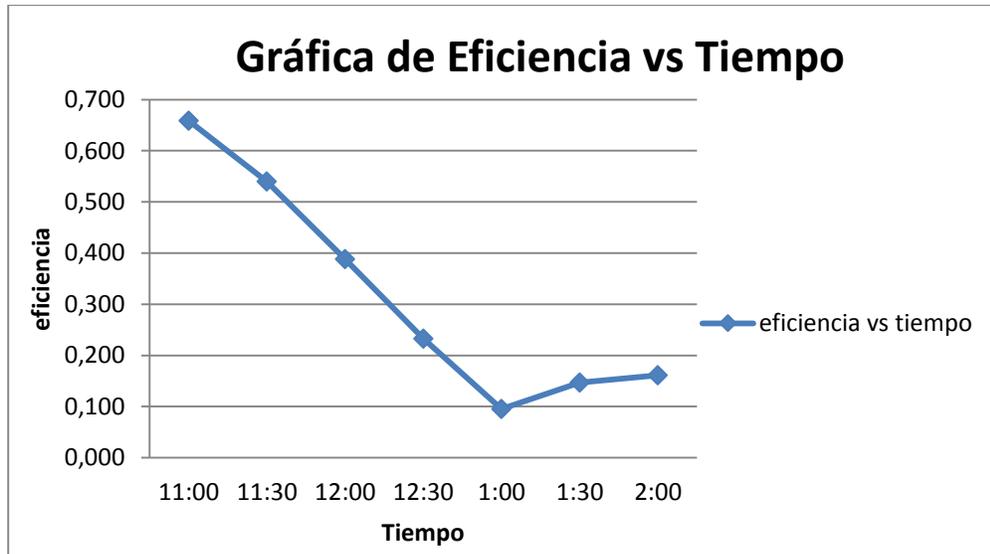


Figura 29. Curva de eficiencia vs tiempo colector 2, fuente: autores del proyecto.

4.3.3. Conexión de colectores en serie

En esta conexión los resultados se tomaron con los colectores conectados a través de un arreglo de tuberías que nos facilitan este tipo de conexión que se logra cerrando las válvulas V_2 y V_4 . Abriendo las válvulas V_1 , V_3 y V_5 . De esta forma el agua que ingresa al colector uno, circula dentro del serpentín, y sale hacia el colector 2 para realizar el mismo procedimiento regresando al tanque. Para ver la configuración de la apertura y cierre de válvulas, es importante ver la (Figura 27). En la (Figura 30) se muestra la curva de eficiencia vs tiempo que se obtuvo en la

prueba de los 2 colectores conectados en serie, logrando una eficiencia máxima de 64% a las 11:00 am.

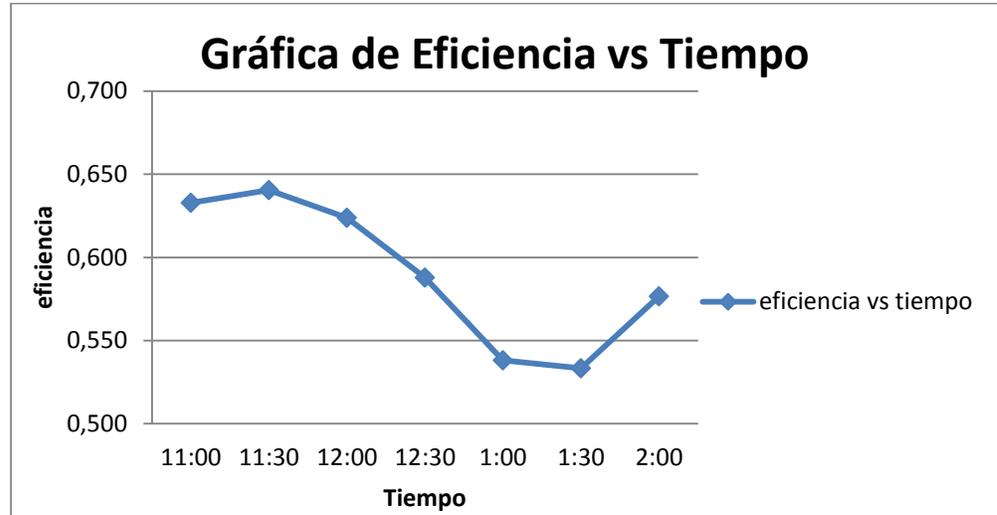


Figura 30. Curva de eficiencia vs tiempo de los colectores 1 y 2 conectados en serie, fuente: autores del proyecto.

4.3.4. Conexión de colectores en paralelo

Esta conexión se realizó, con el fin de poner en funcionamiento cada colector al mismo tiempo y de esta forma analizar sus comportamientos para calcular las eficiencias. Para realizar esta conexión se debe cerrar la válvula V_3 y las V_1 , V_2 , V_4 y V_5 se deben encontrar totalmente abiertas, de esta forma se logra que cada colector actúe independientemente. Para ver la configuración de la apertura y cierre de válvulas, es importante ver la (Figura 27). En la (Figura 31) se muestra la curva de eficiencia vs tiempo que se obtuvo en la prueba de los dos colectores conectados en paralelo. Logrando una eficiencia máxima de 61.6% a las 11:00 am.

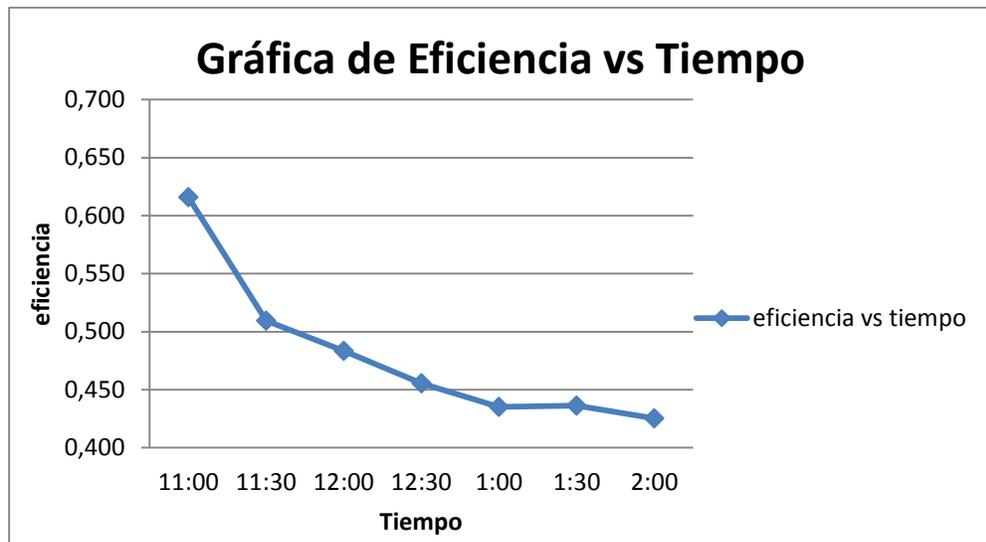


Figura 31. Curva de eficiencia vs tiempo de los colectores 1 y 2 conectados en paralelo, fuente: autores del proyecto.

Al obtener los resultados de las eficiencias calculadas en las diversas conexiones, realizamos una comparación entre las eficiencias máximas y mínimas de cada una de las conexiones como se muestra en la (tabla 6) y (tabla 7).

Tabla 6. Eficiencias máximas.

Conexión	\bar{T}_e (°C)	\bar{T}_s (°C)	$\bar{\eta}_{max}$ (%)	hora
Colector 1	33.108 \pm 0.128	38.862 \pm 0.145	55.6% \pm 0.3%	2:00 p.m.
Colector 2	29.207 \pm 0.509	33.296 \pm 0.771	65.9% \pm 1.5%	11:00 a.m.
Serie	32.284 \pm 0.135	33.541 \pm 0.276	64% \pm 0.6%	11:30 a.m.
Paralelo	30.782 \pm 0.092	36.846 \pm 0.372	61.6% \pm 0.3%	11:00 a.m.

Tabla 7. Eficiencias mínimas.

Conexión	\bar{T}_e (°C)	\bar{T}_s (°C)	$\bar{\eta}_{max}$ (%)	hora
Colector 1	36.063 \pm 0.889	42.942 \pm 0.276	46% \pm 1.6%	12:30 p.m.
Colector 2	52.537 \pm 0.134	51.080 \pm 0.225	9.5% \pm 0.5%	1:00 p.m.
Serie	35.059 \pm 0.850	38.593 \pm 0.714	53.3% \pm 2.1%	1:30 p.m.
Paralelo	34.888 \pm 1.066	46.629 \pm 1.041	42.5% \pm 2.9%	2:00 p.m.

En la (Figura 32) se presenta una comparación entre todas las eficiencias obtenidas en las diferentes pruebas realizadas. Se logró una eficiencia máxima de 65.6% a las 11:00 am y una eficiencia mínima de 9.5% a la 1:00 pm correspondientes a la conexión del colector 2.

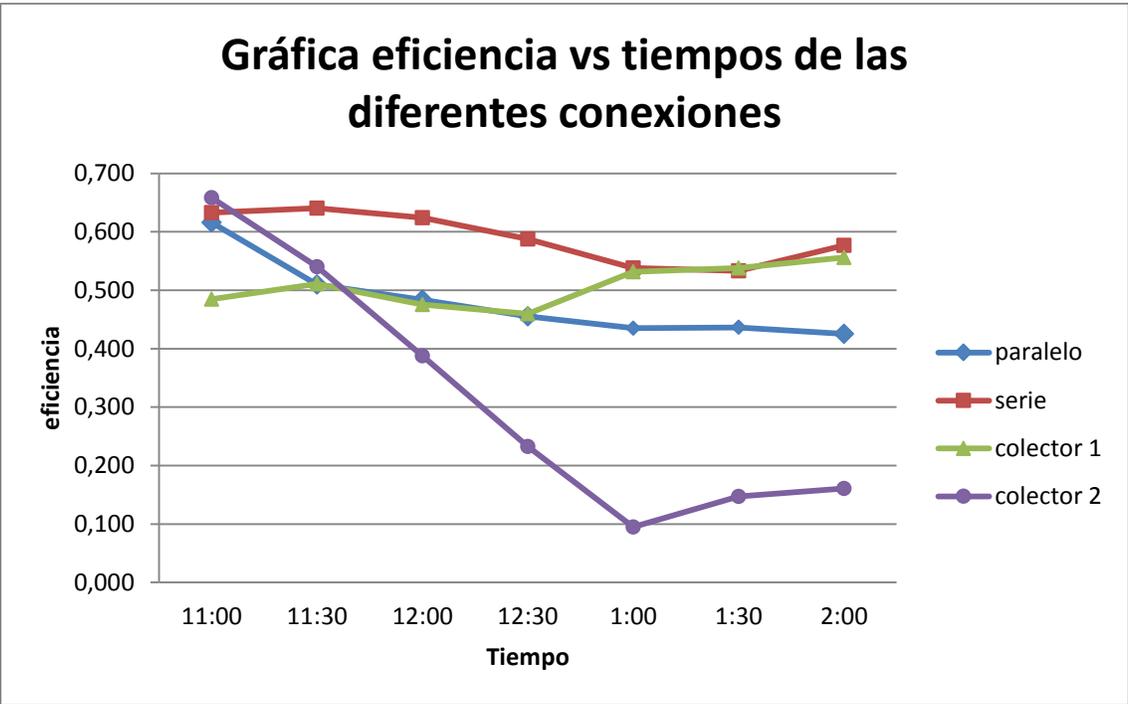


Figura 32. Comparación de las eficiencias de las diferentes conexiones, fuente: autores del proyecto.

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó y evaluó un sistema de calentamiento de agua, con un arreglo en serie-paralelo de colectores de placa plana, utilizando energía solar. Este equipo funciona a través del sistema termosifón que cuenta con una capacidad de almacenamiento de agua de 150 L, que pueden ser utilizados para suministrar agua caliente a la cafetería campestre dentro del campus universitario de la Universidad Pontificia Bolivariana.
- De acuerdo a los datos obtenidos y los análisis realizados, se obtuvo que en la conexión en paralelo se alcanzara una eficiencia máxima con un margen de error de $61.6\% \pm 0.3\%$ y en serie una eficiencia con un margen de error de $64\% \pm 0.6\%$ siendo esta más eficiente. Por otra parte en la pruebas de cada colector se alcanzó una eficiencia con un margen de error de $65.9\% \pm 1.5\%$ correspondiente al colector 2 y una eficiencia con un margen de error de $55.6\% \pm 0.3\%$ perteneciente al colector 1.
- El sistema termosifón es un principio físico que nos indica que el agua caliente tiende a ascender hacia la parte más alta del tanque, debido a la pérdida de densidad del fluido, en las pruebas realizadas se notó que dentro del tanque de almacenamiento se da una recirculación donde la temperatura del agua va aumentando a medida que la radiación solar incide sobre las placas absorbedoras obteniendo una temperatura entre los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- En el momento en que el sistema deja de recibir la radiación solar se encuentra en equilibrio y el agua se estanca, de esta forma notamos en los datos adquiridos durante la pruebas, que la temperatura del tanque disminuye $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, por más de 12 horas sin luz solar.

6. RECOMENDACIONES

- Como una medida de protección y mejorar la eficiencia del sistema se recomienda aislar las conexiones de suministro y retorno de los colectores hacia el tanque.
- Todas las conexiones realizadas en el sistema deben contar con una unión universal la cual permitirá un montaje y desmontaje más rápido, en caso de algún mantenimiento al equipo o en alguno de los casos una eventualidad inesperada.
- Se deben realizar orificios a los colectores solares que permitan la circulación del fluido que se produce a partir de la condensación del aire que se encuentra dentro de la placa absorbedora

ANEXOS

A. ANEXO: TABLAS DE DATOS Y RESULTADOS.

A1. TABLA DE DATOS DEL COLECTOR 1.

Fecha	hora	T_t °C	T_{e1} °C	T_{s1} °C	T_{s2} °C
29/01/2014	10:59:39:35	33.533	32.994	45.236	30.693
29/01/2014	11:04:39:16	33.753	31.647	46.068	31.231
29/01/2014	11:09:39:20	33.973	31.231	44.428	31.598
29/01/2014	11:14:39:17	34.463	31.794	42.739	32.284
29/01/2014	11:19:39:18	35.344	32.064	42.518	32.847
29/01/2014	11:24:39:18	35.932	32.235	43.032	33.410
29/01/2014	11:29:39:19	36.789	32.357	43.351	33.704
29/01/2014	11:34:39:19	37.352	31.794	43.032	32.651
29/01/2014	11:39:39:19	37.744	31.476	41.857	32.162
29/01/2014	11:44:39:20	38.331	32.651	41.661	33.190
29/01/2014	11:49:39:22	38.797	33.900	42.053	34.537
29/01/2014	11:54:39:23	39.188	35.393	42.641	36.103
29/01/2014	11:59:39:22	38.723	34.365	42.200	34.732
29/01/2014	12:04:39:23	39.580	36.079	42.885	36.642
29/01/2014	12:09:39:25	39.042	35.051	42.469	35.393
29/01/2014	12:14:39:24	37.964	33.753	41.270	33.802
29/01/2014	12:19:39:24	38.576	36.030	42.347	36.495
29/01/2014	12:24:39:25	39.139	37.695	43.424	38.160
29/01/2014	12:29:39:26	37.891	35.859	42.934	36.911
29/01/2014	12:34:39:26	37.450	34.634	42.469	34.879
29/01/2014	12:39:39:27	37.450	35.149	42.739	35.663
29/01/2014	12:44:39:28	37.377	35.271	42.518	35.222
29/01/2014	12:49:39:27	36.667	33.557	41.318	33.557
29/01/2014	12:54:39:28	36.740	35.149	41.759	35.198
29/01/2014	12:59:39:30	36.862	33.092	39.923	33.141
29/01/2014	13:04:39:30	36.667	32.382	39.042	32.602
29/01/2014	13:09:39:30	36.887	34.439	39.849	35.859
29/01/2014	13:14:39:31	37.034	35.883	41.098	37.401
29/01/2014	13:19:39:31	37.083	36.593	41.661	37.572
29/01/2014	13:24:39:31	37.156	33.802	40.315	33.802
29/01/2014	13:29:39:32	36.887	32.431	39.286	32.602
29/01/2014	13:34:39:33	36.960	34.292	39.776	34.757
29/01/2014	13:39:39:33	36.960	33.924	39.311	33.973
29/01/2014	13:44:39:34	36.911	34.904	40.021	34.830
29/01/2014	13:49:39:34	36.813	32.945	39.042	33.067

29/01/2014	13:54:39:35	36.716	33.361	38.968	33.337
29/01/2014	13:59:39:35	36.740	33.019	38.576	33.239

Tabla A 1. Datos del colector 1

A1.1. TABLAS DE CÁLCULOS DEL COLECTOR 1.

11:00 am	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	32,994	45,236	39,115	26	248,03	0,0529	0,470
2	31,647	46,068	38,858	26	248,03	0,0518	0,477
3	31,231	44,428	37,830	26	248,03	0,0477	0,506
Promedio	31,957	45,244	38,601	26	248,03	0,0508	0,485
σ	0,922	0,820	0,680	0	0	0,0027	0,019
$\%e$	0,532	0,473	0,393	0	0	0,0016	0,011
11:30 am	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	32,235	43,032	37,634	26	248,03	0,0469	0,511
2	32,357	43,351	37,854	26	248,03	0,0478	0,505
3	31,794	43,032	37,413	26	248,03	0,0460	0,517
promedio	32,129	43,138	37,634	26	248,03	0,0469	0,511
σ	0,296	0,184	0,221	0	0	0,0009	0,006
$\%e$	0,171	0,106	0,127	0	0	0,0005	0,003
12:00 m	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	35,393	42,641	39,017	26	248,03	0,0525	0,473
2	34,365	42,200	38,283	26	248,03	0,0495	0,493
3	36,079	42,885	39,482	26	248,03	0,0544	0,460
Promedio	35,279	42,575	38,927	26	248,03	0,0521	0,476
σ	0,863	0,347	0,605	0	0	0,0024	0,017
$\%e$	0,498	0,200	0,349	0	0	0,0014	0,010
12:30 pm	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	37,695	43,424	40,560	26	248,03	0,0587	0,431
2	35,859	42,934	39,397	26	248,03	0,0540	0,463
3	34,634	42,469	38,552	26	248,03	0,0506	0,486
Promedio	36,063	42,942	39,503	26	248,03	0,0544	0,460
σ	1,541	0,478	1,008	0	0	0,0041	0,028
$\%e$	0,889	0,276	0,582	0	0	0,0023	0,016
1:00 pm	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	35,149	41,759	38,454	26	248,03	0,0502	0,489
2	33,092	39,923	36,508	26	248,03	0,0424	0,542

3	32,382	39,042	35,712	26	248,03	0,0392	0,564
promedio	33,541	40,241	36,891	26	248,03	0,0439	0,531
S	1,437	1,386	1,411	0	0	0,0057	0,039
Error	0,830	0,800	0,814	0	0	0,0033	0,022
1:30 pm	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	33,802	40,315	37,059	26	248,03	0,0446	0,527
2	32,431	39,286	35,859	26	248,03	0,0397	0,560
3	34,292	39,776	37,034	26	248,03	0,0445	0,527
promedio	33,508	39,792	36,650	26	248,03	0,0429	0,538
σ	0,965	0,515	0,686	0	0	0,0028	0,019
%e	0,557	0,297	0,396	0	0	0,0016	0,011
2:00 pm	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	32,945	39,042	35,994	26	248,03	0,0403	0,556
2	33,361	38,968	36,165	26	248,03	0,0410	0,551
3	33,019	38,576	35,798	26	248,03	0,0395	0,561
promedio	33,108	38,862	35,985	26	248,03	0,0403	0,556
σ	0,222	0,250	0,184	0	0	0,0007	0,005
%e	0,128	0,145	0,106	0	0	0,0004	0,003

A2. TABLA DE DATOS COLECTOR 2.

Fecha	Hora	T_t	T_{e1}	T_{e2}	T_{s2}
30/01/2014	10:51:11:75	39.703	30.766	40.560	34.659
30/01/2014	10:56:11:62	40.388	29.566	30.105	34.610
30/01/2014	11:01:11:62	34.267	31.133	28.342	33.337
30/01/2014	11:06:11:62	32.945	30.570	29.175	31.941
30/01/2014	11:11:11:63	32.896	30.864	30.374	32.676
30/01/2014	11:16:11:63	33.337	31.843	32.015	32.872
30/01/2014	11:21:11:64	33.410	31.892	33.484	32.700
30/01/2014	11:26:11:64	33.508	32.945	34.904	34.463
30/01/2014	11:31:11:64	33.288	33.239	36.201	35.149
30/01/2014	11:36:11:65	33.312	32.774	37.279	35.442
30/01/2014	11:41:11:66	33.484	32.847	38.576	36.006
30/01/2014	11:46:11:66	33.557	33.949	39.996	36.667
30/01/2014	11:51:11:67	33.582	34.365	41.196	37.107
30/01/2014	11:56:11:67	33.655	34.488	42.469	38.038
30/01/2014	12:01:11:67	33.680	34.463	43.400	38.283
30/01/2014	12:06:11:68	33.239	35.247	44.722	39.825

30/01/2014	12:11:11:68	32.872	36.079	45.677	41.049
30/01/2014	12:16:11:69	32.651	35.981	46.607	42.690
30/01/2014	12:21:11:69	32.406	36.103	46.974	42.077
30/01/2014	12:26:11:69	32.749	38.748	48.238	43.326
30/01/2014	12:31:11:71	32.749	39.115	49.059	44.893
30/01/2014	12:36:11:71	32.578	39.654	49.807	45.407
30/01/2014	12:41:11:72	32.504	40.192	50.339	46.215
30/01/2014	12:46:11:72	32.382	40.143	51.257	47.561
30/01/2014	12:51:11:72	32.064	39.947	51.498	48.334
30/01/2014	12:56:11:73	31.745	41.270	52.271	50.629
30/01/2014	13:01:11:74	31.672	41.245	52.706	51.305
30/01/2014	13:06:11:74	31.452	41.025	52.633	51.305
30/01/2014	13:11:11:74	31.354	39.923	51.909	50.749
30/01/2014	13:16:11:75	31.354	40.633	52.126	51.884
30/01/2014	13:21:11:75	31.231	39.139	51.377	50.460
30/01/2014	13:26:11:76	30.986	38.527	51.377	49.300
30/01/2014	13:31:11:77	30.668	38.356	51.160	49.566
30/01/2014	13:36:11:77	30.570	36.936	50.653	47.416
30/01/2014	13:41:11:78	30.644	39.801	51.353	50.001
30/01/2014	13:46:11:79	30.937	41.833	52.247	51.498
30/01/2014	13:51:11:79	30.986	39.311	51.595	49.373
30/01/2014	13:56:11:79	30.913	37.254	50.025	47.146
30/01/2014	14:01:11:82	31.035	38.111	51.136	47.146
30/01/2014	14:06:11:81	31.084	39.139	52.126	48.841

Tabla A2. Datos del colector 2.

A2.1. TABLAS DE RESULTADOS DEL COLECTOR 2

11:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	30,105	34,610	32,358	25	248,03	0,0297	0,628
2	28,342	33,337	30,840	25	248,03	0,0235	0,670
3	29,175	31,941	30,558	25	248,03	0,0224	0,678
promedio	29,207	33,296	31,252	25	248,03	0,0252	0,659
σ	0,882	1,335	0,968	0	0	0,0039	0,027
$\%e$	0,509	0,771	0,559	0	0	0,0023	0,015
11:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	34,904	34,463	34,684	25	248,03	0,0390	0,565
2	36,201	35,149	35,675	25	248,03	0,0430	0,537
3	37,279	35,442	36,361	25	248,03	0,0458	0,519
promedio	36,128	35,018	35,573	25	248,03	0,0426	0,540
σ	1,189	0,502	0,843	0	0	0,0034	0,023
$\%e$	0,687	0,290	0,487	0	0	0,0020	0,013
12:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	42,469	38,038	40,254	25	248,03	0,0615	0,412
2	43,400	38,283	40,842	25	248,03	0,0639	0,396
3	44,722	39,825	42,274	25	248,03	0,0696	0,356
promedio	43,530	38,715	41,123	25	248,03	0,0650	0,388
σ	1,132	0,969	1,039	0	0	0,0042	0,028
$\%e$	0,654	0,559	0,600	0	0	0,0024	0,016
12:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	48,238	43,326	45,782	25	248,03	0,0838	0,260
2	49,059	44,893	46,976	25	248,03	0,0886	0,228
3	49,807	45,407	47,607	25	248,03	0,0911	0,210
promedio	49,035	44,542	46,788	25	248,03	0,0878	0,233
σ	0,785	1,084	0,927	0	0	0,0037	0,025
$\%e$	0,453	0,626	0,535	0	0	0,0022	0,015
1:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	52,271	50,629	51,450	25	248,03	0,1066	0,105
2	52,706	51,305	52,006	25	248,03	0,1089	0,090
3	52,633	51,305	51,969	25	248,03	0,1087	0,091
promedio	52,537	51,080	51,808	25	248,03	0,1081	0,095
σ	0,233	0,390	0,311	0	0	0,0013	0,009

%e	0,134	0,225	0,179	0	0	0,0007	0,005
1:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	51,377	49,300	50,339	25	248,03	0,1022	0,135
2	51,160	49,566	50,363	25	248,03	0,1023	0,135
3	50,653	47,416	49,035	25	248,03	0,0969	0,171
promedio	51,063	48,761	49,912	25	248,03	0,1004	0,147
σ	0,372	1,172	0,760	0	0	0,0031	0,021
%e	0,215	0,677	0,439	0	0	0,0018	0,012
2:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	50,025	47,146	48,586	25	248,03	0,0951	0,183
2	51,136	47,146	49,141	25	248,03	0,0973	0,168
3	52,126	48,841	50,484	25	248,03	0,1027	0,131
promedio	51,096	47,711	49,403	25	248,03	0,0984	0,161
σ	1,051	0,979	0,976	0	0	0,0039	0,027
%e	0,607	0,565	0,563	0	0	0,0023	0,015

A3. TABLA DE DATOS DE LOS COLECTORES EN SERIE

Fecha	Hora	T_t	T_{e1}	T_{s1}	T_{s2}
31/01/2014	10:57:26:34	35.124	30.815	38.136	37.254
31/01/2014	11:02:26:34	36.348	30.521	37.475	34.561
31/01/2014	11:07:26:35	37.401	31.476	37.989	34.512
31/01/2014	11:12:26:33	38.527	31.525	38.527	33.557
31/01/2014	11:17:26:33	38.674	31.452	39.017	33.312
31/01/2014	11:22:26:35	39.947	31.623	39.678	33.361
31/01/2014	11:27:26:36	40.413	32.529	40.560	34.022
31/01/2014	11:32:26:36	41.172	32.260	40.633	33.533
31/01/2014	11:37:26:37	41.416	32.064	40.731	33.067
31/01/2014	11:42:26:37	41.833	32.186	40.927	33.606
31/01/2014	11:47:26:38	42.469	32.284	41.098	33.826
31/01/2014	11:52:26:39	42.322	32.064	41.147	33.900
31/01/2014	11:57:26:39	42.445	32.064	41.049	33.557
31/01/2014	12:02:26:39	42.518	32.700	41.416	34.855
31/01/2014	12:07:26:40	42.836	32.896	41.514	35.026
31/01/2014	12:12:26:42	42.934	32.774	41.539	34.585
31/01/2014	12:17:26:42	42.885	33.067	41.514	35.075
31/01/2014	12:22:26:42	42.714	33.484	41.612	35.589

31/01/2014	12:27:26:42	42.714	31.868	40.339	34.561
31/01/2014	12:32:26:44	42.763	33.851	40.878	36.716
31/01/2014	12:37:26:43	43.204	34.341	40.878	37.524
31/01/2014	12:42:26:44	43.865	35.002	41.098	37.670
31/01/2014	12:47:26:44	43.498	33.631	40.829	36.862
31/01/2014	12:52:26:45	43.963	34.585	40.976	37.719
31/01/2014	12:57:26:46	43.644	34.341	40.976	36.740
31/01/2014	13:02:26:46	43.498	35.442	41.784	38.013
31/01/2014	13:07:26:47	43.938	36.495	42.983	38.846
31/01/2014	13:12:26:47	43.473	35.442	42.885	37.646
31/01/2014	13:17:26:48	43.914	35.638	43.351	37.915
31/01/2014	13:22:26:48	43.816	35.222	43.277	37.842
31/01/2014	13:27:26:49	44.257	36.667	44.110	39.801
31/01/2014	13:32:26:49	44.452	34.732	43.375	38.650
31/01/2014	13:37:26:50	44.159	33.778	42.641	37.328
31/01/2014	13:42:26:51	44.501	34.145	42.445	37.915
31/01/2014	13:47:26:51	44.379	35.026	42.763	38.772
31/01/2014	13:52:26:52	44.550	34.096	42.347	38.723
31/01/2014	13:57:26:53	44.452	33.165	41.735	37.548
31/01/2014	14:02:26:52	44.746	31.794	40.780	36.128

Tabla A3. Datos de los colectores conectados en serie

A3.1. TABLAS DE CÁLCULOS DE LOS COLECTORES CONECTADOS EN SERIE

11:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	30,815	37,254	34,035	26	248,03	0,0324	0,610
2	30,521	34,561	32,541	26	248,03	0,0264	0,651
3	31,476	34,512	32,994	26	248,03	0,0282	0,638
promedio	30,937	35,442	33,190	26	248,03	0,0290	0,633
σ	0,489	1,569	0,766	0	0	0,0031	0,021
$\%e$	0,282	0,906	0,442	0	0	0,0018	0,012
11:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	32,529	34,022	33,276	26	248,03	0,0293	0,631
2	32,260	33,533	32,897	26	248,03	0,0278	0,641
3	32,064	33,067	32,566	26	248,03	0,0265	0,650
promedio	32,284	33,541	32,913	26	248,03	0,0279	0,640
σ	0,233	0,478	0,355	0	0	0,0014	0,010
$\%e$	0,135	0,276	0,205	0	0	0,0008	0,006
12:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η

1	32,064	33,557	32,811	26	248,03	0,0275	0,643
2	32,700	34,855	33,778	26	248,03	0,0314	0,617
3	32,896	35,026	33,961	26	248,03	0,0321	0,612
promedio	32,553	34,479	33,516	26	248,03	0,0303	0,624
σ	0,435	0,803	0,618	0	0	0,0025	0,017
%e	0,251	0,464	0,357	0	0	0,0014	0,010
12:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	31,868	34,561	33,215	26	248,03	0,0291	0,632
2	33,851	36,716	35,284	26	248,03	0,0374	0,575
3	34,341	37,670	36,006	26	248,03	0,0403	0,556
promedio	33,353	36,316	34,835	26	248,03	0,0356	0,588
σ	1,309	1,593	1,449	0	0	0,0058	0,040
%e	0,756	0,920	0,836	0	0	0,0034	0,023
1:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	34,341	36,740	35,541	26	248,03	0,0385	0,568
2	35,442	38,013	36,728	26	248,03	0,0433	0,536
3	36,495	38,846	37,671	26	248,03	0,0471	0,510
promedio	35,426	37,866	36,646	26	248,03	0,0429	0,538
σ	1,077	1,061	1,067	0	0	0,0043	0,029
%e	0,622	0,612	0,616	0	0	0,0025	0,017
1:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	36,667	39,801	38,234	26	248,03	0,0493	0,495
2	34,732	38,650	36,691	26	248,03	0,0431	0,537
3	33,778	37,328	35,553	26	248,03	0,0385	0,568
promedio	35,059	38,593	36,826	26	248,03	0,0436	0,533
σ	1,472	1,237	1,346	0	0	0,0054	0,037
%e	0,850	0,714	0,777	0	0	0,0031	0,021
2:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	34,096	38,723	36,410	26	248,03	0,0420	0,545
2	33,165	37,548	35,357	26	248,03	0,0377	0,573
3	31,794	36,128	33,961	26	248,03	0,0321	0,612
promedio	33,018	37,466	35,242	26	248,03	0,0373	0,577
σ	1,158	1,299	1,228	0	0	0,0050	0,034
%e	0,669	0,750	0,709	0	0	0,0029	0,019

A4. TABLA DE DATOS DE COLECTORES CONECTADOS EN PARALELO

Fecha	Hora	T_t	T_{e1}	T_{s1}	T_{s2}
05/02/2014	10:53:59:13	44.134	30.791	45.775	37.254
05/02/2014	10:58:59:13	44.403	30.619	46.191	36.103
05/02/2014	11:03:59:14	44.844	30.937	46.876	37.181
05/02/2014	11:08:59:14	44.501	30.962	47.244	38.013
05/02/2014	11:13:59:15	43.840	31.476	47.803	40.217
05/02/2014	11:18:59:16	44.403	32.480	49.083	42.102
05/02/2014	11:23:59:16	44.746	32.137	49.324	41.147
05/02/2014	11:28:59:17	44.697	32.382	49.976	42.934
05/02/2014	11:33:59:17	44.624	33.116	50.315	44.403
05/02/2014	11:38:59:17	44.501	31.966	49.904	43.791
05/02/2014	11:43:59:18	43.889	31.133	49.035	42.812
05/02/2014	11:48:59:19	44.477	31.672	49.035	44.330
05/02/2014	11:53:59:19	44.673	32.382	48.817	44.844
05/02/2014	11:58:59:19	44.575	32.627	48.938	44.648
05/02/2014	12:03:59:20	44.697	32.627	48.841	44.722
05/02/2014	12:08:59:21	44.208	31.990	48.238	43.595
05/02/2014	12:13:59:23	43.473	30.815	46.999	42.053
05/02/2014	12:18:59:23	43.718	32.235	47.585	43.547
05/02/2014	12:23:59:24	44.061	33.361	47.827	44.550
05/02/2014	12:28:59:25	43.767	33.582	47.924	45.211
05/02/2014	12:33:59:26	44.354	35.124	48.213	46.142
05/02/2014	12:38:59:25	44.379	35.810	48.431	45.726
05/02/2014	12:43:59:27	44.330	35.271	48.817	45.970
05/02/2014	12:48:59:27	43.644	33.263	48.189	44.771
05/02/2014	12:53:59:28	43.914	33.239	48.238	45.407
05/02/2014	12:58:59:27	44.599	35.222	48.841	47.537
05/02/2014	13:03:59:29	44.036	34.610	48.238	46.411
05/02/2014	13:08:59:29	44.306	34.806	48.431	46.999
05/02/2014	13:13:59:31	44.257	34.243	48.334	46.387
05/02/2014	13:18:59:30	44.330	35.124	48.721	47.875
05/02/2014	13:23:59:31	44.036	33.582	48.068	46.387
05/02/2014	13:28:59:31	44.232	34.439	48.117	46.313
05/02/2014	13:33:59:31	44.110	35.100	47.658	46.338
05/02/2014	13:38:59:32	44.452	33.680	47.561	45.897
05/02/2014	13:43:59:33	44.575	34.022	47.875	45.726
05/02/2014	13:48:59:34	44.306	35.296	47.996	47.146
05/02/2014	13:53:59:34	44.085	36.495	48.213	48.117
05/02/2014	13:58:59:36	44.085	32.872	47.244	44.624

Tabla A4. Datos de los colectores conectados en paralelo

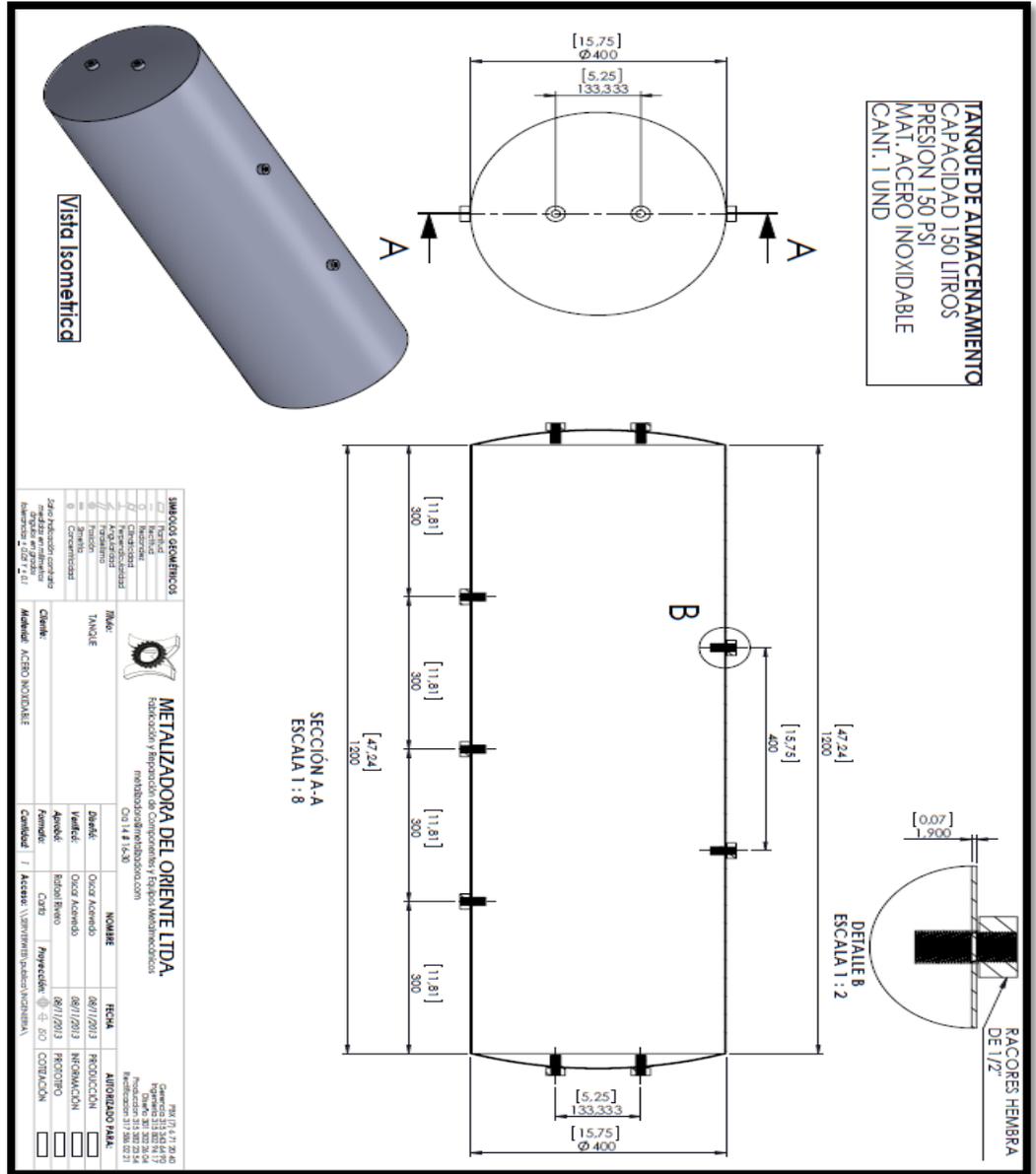
A4.1. TABLAS DE CÁLCULOS DE COLECTORES CONECTADOS EN PARALELO

11:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	30,791	37,254	34,023	26	248,03	0,0323	0,610
2	30,619	36,103	33,361	26	248,03	0,0297	0,628
3	30,937	37,181	34,059	26	248,03	0,0325	0,609
promedio	30,782	36,846	33,814	26	248,03	0,0315	0,616
σ	0,159	0,644	0,393	0	0	0,0016	0,011
$\%e$	0,092	0,372	0,227	0	0	0,0009	0,006
11:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	32,137	41,147	36,642	26	248,03	0,0429	0,538
2	32,382	42,934	37,658	26	248,03	0,0470	0,510
3	33,116	44,403	38,760	26	248,03	0,0514	0,480
promedio	32,545	42,828	37,687	26	248,03	0,0471	0,510
σ	0,509	1,631	1,059	0	0	0,0043	0,029
$\%e$	0,294	0,941	0,611	0	0	0,0025	0,017
12:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	32,382	44,844	38,613	26	248,03	0,0509	0,484
2	32,627	44,648	38,638	26	248,03	0,0510	0,484
3	32,627	44,722	38,675	26	248,03	0,0511	0,483
promedio	32,545	44,738	38,642	26	248,03	0,0510	0,483
σ	0,141	0,099	0,031	0	0	0,0001	0,001
$\%e$	0,082	0,057	0,018	0	0	0,0001	0,000
12:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	33,361	44,550	38,956	26	248,03	0,0522	0,475
2	33,582	45,211	39,397	26	248,03	0,0540	0,463
3	35,124	46,142	40,633	26	248,03	0,0590	0,429
promedio	34,022	45,301	39,662	26	248,03	0,0551	0,455
σ	0,960	0,800	0,870	0	0	0,0035	0,024
$\%e$	0,555	0,462	0,502	0	0	0,0020	0,014
1:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	33,239	45,407	39,323	26	248,03	0,0537	0,465
2	35,222	47,537	41,380	26	248,03	0,0620	0,408
3	34,610	46,411	40,511	26	248,03	0,0585	0,432
promedio	34,357	46,452	40,404	26	248,03	0,0581	0,435
σ	1,015	1,066	1,032	0	0	0,0042	0,028

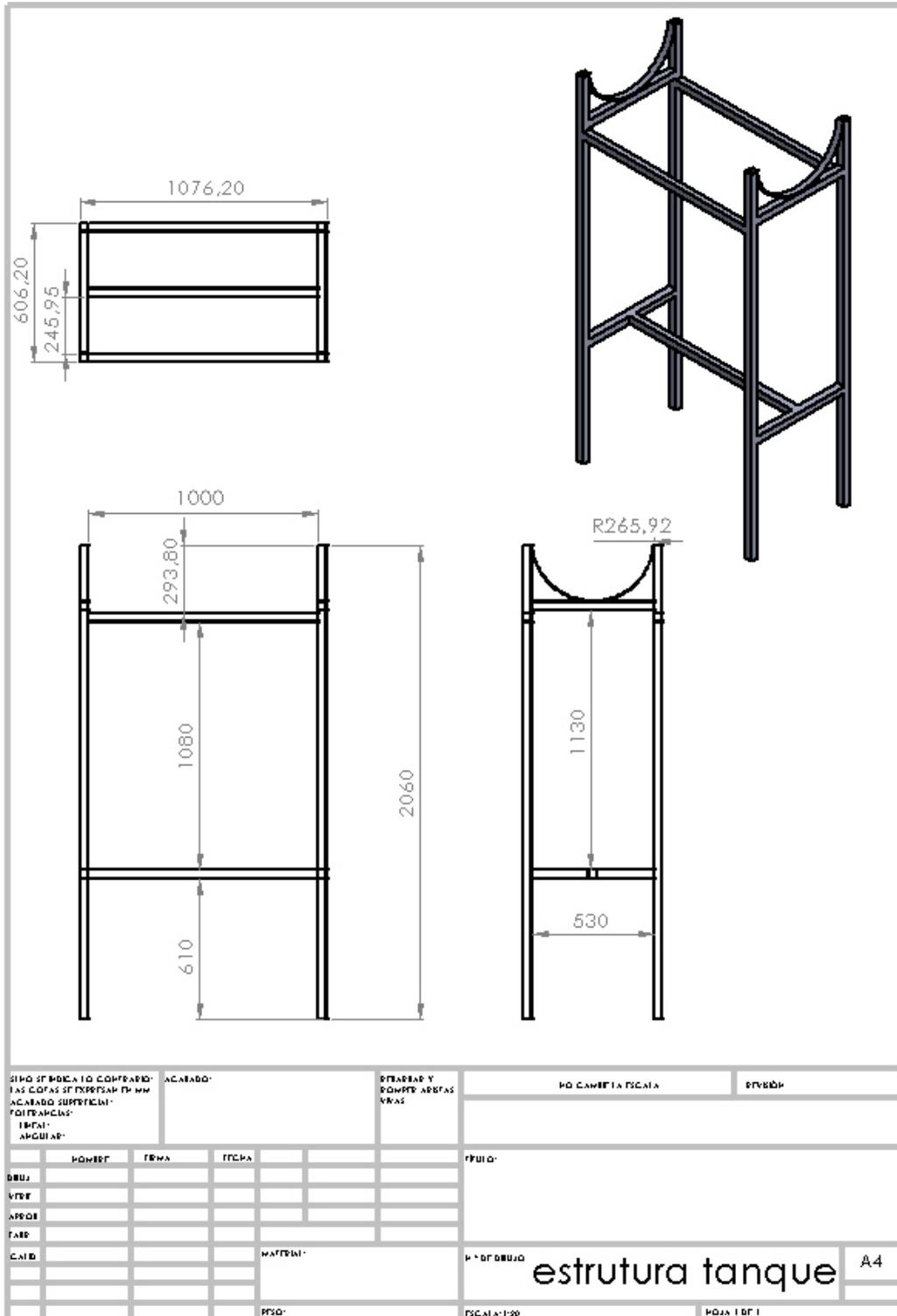
%e	0,586	0,615	0,596	0	0	0,0024	0,016
1:30	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	33,582	46,387	39,985	26	248,03	0,0564	0,447
2	34,439	46,313	40,376	26	248,03	0,0580	0,436
3	35,100	46,313	40,707	26	248,03	0,0593	0,427
promedio	34,374	46,338	40,356	26	248,03	0,0579	0,436
σ	0,761	0,043	0,361	0	0	0,0015	0,010
%e	0,439	0,025	0,209	0	0	0,0008	0,006
2:00	T_e	T_s	T_m	T_a	H	X	η
1	35,296	47,146	41,221	26	248,03	0,0614	0,413
2	36,495	48,117	42,306	26	248,03	0,0657	0,383
3	32,872	44,624	38,748	26	248,03	0,0514	0,481
promedio	34,888	46,629	40,758	26	248,03	0,0595	0,425
σ	1,846	1,803	1,824	0	0	0,0074	0,050
%e	1,066	1,041	1,053	0	0	0,0042	0,029

B. ANEXO : PLANOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

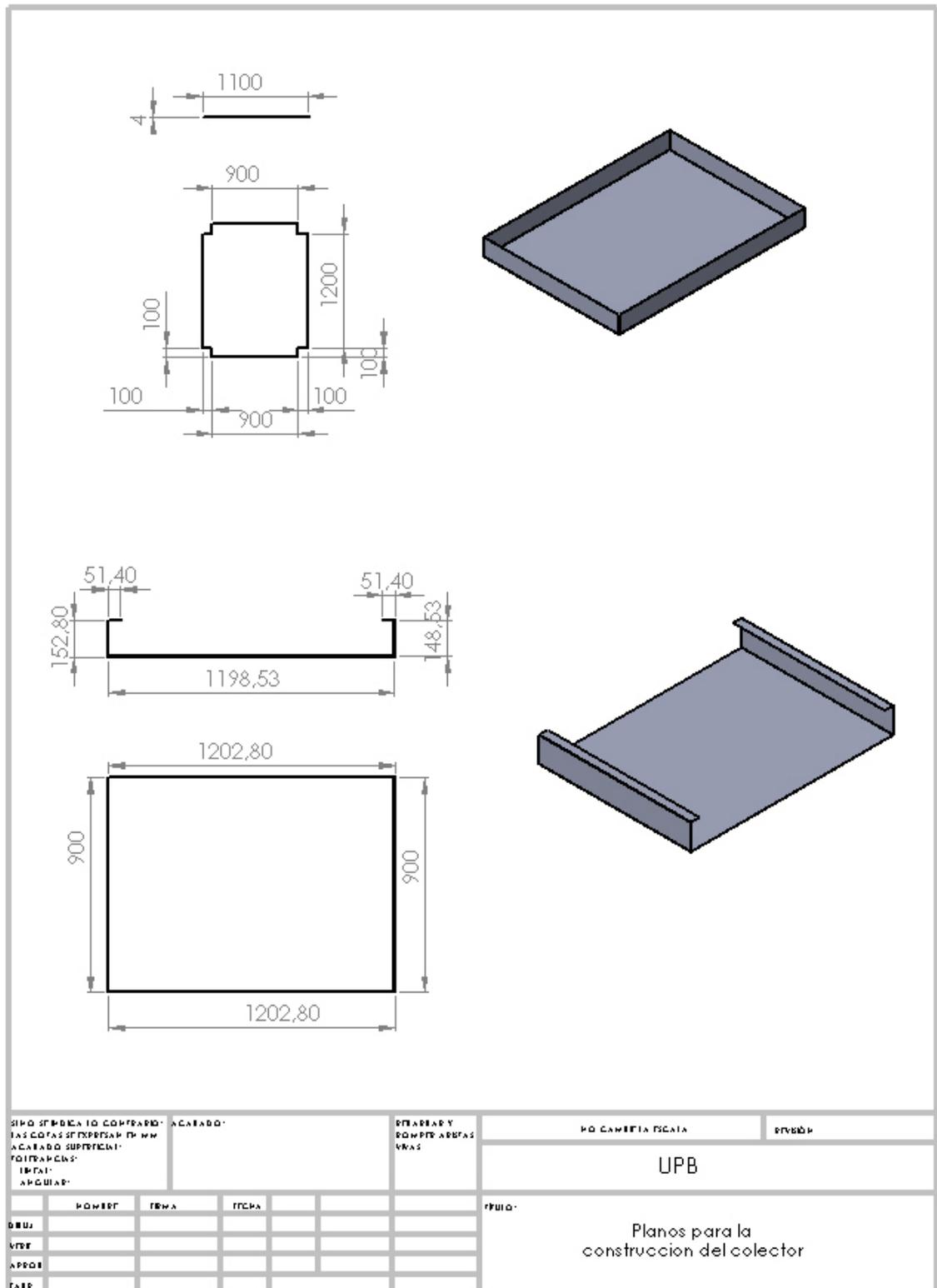
B1. PLANO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO



B2. PLANOS DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL TANQUE



B4. PLANOS DE LOS COLECTORES



BIBLIOGRAFIA

Alcaldía de Bucaramanga. Indicadores. Información meteorológica. [Citado el 06 de diciembre de 2013] disponible en internet.

<<http://www.bucaramanga.gov.co/Contenido.aspx?param=277>>

BURBANO, J. (2006). Diseño y construcción de un calentador solar de agua operando por termosifón. Scientia et Technica Año XII, 6 (31). Recuperado desde:

<<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/6389/3677>>

CARMONA, J. (2013). Transferencia de calor en edificación. (Figura). [Citado el 04 de Enero de 2014]. Disponible en internet:

<<http://juliocarmonablog.wordpress.com/2013/06/21/transferencia-de-calor-en-edificacion/>>

CELEMIN, María del rosario. Fuentes de energías para el futuro. Ministerio de educación, 2008. P 144 -145. ISBN 8436946758. [Citado el 06 de diciembre de 2013]

Centro de energías renovables. Colectores sin cubierta. Disponible en internet:

<cer.gob.cl/tecnologías/solar/energías-solar-termicas-agua-caliente-sanitaria-acs/colectores-sin-cubierta/> [citado el 25 de septiembre de 2013]

Cleanergy solar. Angulo de inclinación de los colectores solares. [Citado el 04 de diciembre de 2013]. Disponible en internet:

<<http://www.cleanergysolar.com/2011/11/03/angulo-de-inclinacion-de-los-colectores-solares/>>

Colombia. Ministerio de Minas y Energía -Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá: UPME - IDEAM.2005. [Citado el 04 de diciembre de 2013].

DE JUANA Sardón, José maría. Energías renovables para el desarrollo. Editorial paraninfo, 2003. ISBN 842832864. [Citado el 06 de diciembre de 2013].

Eca, Instituto de Tecnología y Formación. Energía Solar Térmica. FC Editorial, 2008. ISBN 8496743314, 9788496743311. [Citado el 26 de septiembre de 2013].

Hormiga solar. 2011. Colector de placa plana. (Figura). [Citado el 04 de diciembre de 2013]. Disponible en internet: < <http://www.hormigasolar.com/colectores-solares-de-placa-plana/>>

INCROPERA, Frank. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. Cuarta edición. México: Prentice hall, 1999. Pág. 2. [Citado el 06 de diciembre de 2013]

Ingeniería e Innovación en eléctricos. Colectores de tubo de vacío. [Citado el 25 de septiembre de 2013]. Disponible en: <http://ipsolares.mex.tl/frameset.php?url=/73571_COMO-FUNCIONAN-LOS-CALENTADORES-.html>

Instalaciones de energía solar, Centro de estudios de energía solar, Progensa, Tomo 3, 3a Edición, España 1992.

Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. (2007). [Consultado: 12 de septiembre de 2013] Disponible en internet: <http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random49ae9a23d0d51/1236188976_Guia_didactica_colectores_solares_termicos.pdf>

Portal de las energías renovables. Colectores solares térmicos. [Citado el 25 de septiembre de 2013]. Disponible en: <http://esp.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=41&ID_area=8&ID_sub_area=26>

RODRÍGUEZ Murcia, H. (2009): Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería, n° 28, noviembre, pp. 84-87. [Citado el 04 de diciembre de 2013].

Roldan Vilorio, José (2012). Necesidades energéticas y propuestas de instalaciones solares. Editorial Paraninfo. ISBN 8428332975. [Consultado 12 de septiembre de 2013]

Sitiosolar. Los colectores de tubos de vacío. [Citado el 26 de septiembre de 2013]. Disponible en internet: < <http://www.sitiosolar.com>>

ZABALZA Bribián, Ignacio. (2007) El ahorro energético en el nuevo código técnico de la edificación. FC Editorial, 2007. ISBN 8496743306. [Consultado: 12 de septiembre de 2013]