

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“CONSTRUCCIÓN Y MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN  
COLECTOR SOLAR PLANO BIFLUIDOS (CSPB) PARA  
PRODUCCIÓN DE AGUA Y AIRE PRECALENTADOS”**

**AMETH JULIAN VARGAS ESPINOSA  
4-766-295**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2017**

**“CONSTRUCCIÓN Y MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN  
COLECTOR SOLAR PLANO BIFLUIDOS (CSPB) PARA  
PRODUCCIÓN DE AGUA Y AIRE PRECALENTADOS”**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR  
EL TÍTULO DE INGENIERO EN MANEJO DE CUENCAS Y  
AMBIENTE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL  
O PARCIAL DEBE SER OBTENIDA DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**APROBADO:**

**PROF. ING. JOSÉ R. CASTILLO**

\_\_\_\_\_  
**DIRECTOR**

**PROF. ING TIRSO SOLÍS**

\_\_\_\_\_  
**ASESOR**

**PROF. ING. FÉLIX GUERRA**

\_\_\_\_\_  
**ASESOR**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ  
2017**

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco*

A Dios sobre todas las cosas, por darme la vida y permitirme alcanzar una meta más. Porque en cada tropiezo, su aliento y palabra me reconfortan tiernamente.

A mi madre, Lydia Espinosa, por traerme al mundo y demostrarme con sus enseñanzas que la esperanza es lo último que se pierde. Por apoyarme desde el día uno, regalarme él te amo más sincero sobre esta tierra y tener siempre para mí, un abrazo y un beso en los momentos más difíciles.

A mi hermana, Lidya Vargas, por enseñarme el valor de la hermandad. La cual nos mantiene unidos a pesar de la distancia.

A Angela Elena Montes Montero, por demostrarme la lealtad incondicional y la sinceridad verdadera, por ayudarme a desarrollar la paciencia y el amor hacia las cosas que importan; la vida.

A mi asesor de tesis, Msc. José Ricardo Castillo por su orientación y dedicación en la realización de esta tesis, a los miembros del comité Msc. Félix Guerra y Msc. Tirso Solís, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, y los Doctores José Ramón Binns y Juan Corella por su colaboración significativa en el análisis estadístico.

A mis amistades Ixy Espinosa y katherina Guerra, por apoyarme en el desarrollo del proyecto y animarme a culminarlo. A Alexa Sánchez, Moisés Justavino, Glenys Acosta y Estaycha Ríos, por estar para mí en los momentos que necesite ayuda y palabras de aliento.

Al Sr. Roberto Guerra y familia por abrir las puertas de su casa y taller desinteresadamente, la amistad y cortesía ofrecida, y el asesoramiento brindado durante la construcción del colector solar.

A todos los profesores, familiares y amistades que han influido en mi formación personal y profesional. Muchas gracias.

Ameth J. V. Espínosa



## DEDICATORIA

*Dedicado a*

El único Dios del universo, Yahvé Sebaot. Por brindarme la fortaleza y paciencia necesaria para lograr alcanzar esta meta. Ya que “Todo tiene su tiempo, y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”. Eclesiastés 3:1

A mi madre, por tantos años de sufrimiento que le he causado, por siempre tratar de darme la mejor educación que estuviera a su alcance y por su apoyo y amor incondicional desde que tengo uso de razón. Te amo Lydia Espinosa.

A mis familiares y amistades, por tantos momentos compartidos.

Ameth J. V. Espinosa



## **“CONSTRUCCIÓN Y MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO BIFLUIDOS (CSPB) PARA PRODUCCIÓN DE AGUA Y AIRE PRECALENTADOS”**

**Vargas Espinosa, AJ. 2017.** Construcción y medición del rendimiento de un colector solar plano bifluidos (CSPB) para producción de agua y aire precalentados.

### **RESUMEN**

Esta investigación consistió en la construcción y estudio del rendimiento térmico de un prototipo de colector solar plano de un metro cuadrado de área de captación, para producción de agua precalentada y aire precalentado. Se construyó con materiales de costo accesible, de calidad y localizables en el comercio. Se acopló a un sistema solar térmico (SST) para llevar a cabo la determinación del comportamiento funcional del colector y la medición del rendimiento se realizó registrando la temperatura del agua de ingreso, la temperatura del agua en el estrato medio, el caudal del agua de ingreso, la temperatura del aire de escape, la humedad relativa del aire de escape y el caudal del aire de escape que el colector solar plano alcanzó a producir, bajo la radiación solar incidente. Los datos se levantaron entre abril y mayo de 2017, se manejaron en tres modos de operación de cinco días alternados cada modo, midiéndose diariamente en intervalos de 15 minutos de las 8:00 a las 19:00 horas. Bajo el modo A se midieron simultáneamente ambos fluidos y se obtuvo una temperatura promedio del aire de escape de 43.14 °C, la humedad relativa promedio del aire de escape alcanzó 39.97% y el caudal promedio del aire de escape de 0.72 m<sup>3</sup>/min. La temperatura promedio del agua de ingreso alcanzó 32.71 °C, una temperatura promedio del agua en el estrato medio de 32.59 °C y un caudal promedio del agua de ingreso 0.0057 m<sup>3</sup>/min. Bajo el modo B únicamente circuló agua y se obtuvo una temperatura promedio del agua de ingreso de 35.83 °C, la temperatura promedio en el estrato medio alcanzó 35.44 °C y un caudal promedio del agua de ingreso de 0.0057 m<sup>3</sup>/min. Bajo el modo C únicamente circuló aire; la temperatura promedio del aire de escape alcanzó 47.11 °C, la humedad relativa promedio del aire de escape llegó a 31.24% y el caudal promedio del aire de escape fue de 0.84 m<sup>3</sup>/min. Los resultados demostraron que se puede desarrollar un colector de un metro cuadrado de captación económico, de fácil replicado y las ecuaciones de simulación desarrolladas permitirán extrapolar el dimensionado del área de colectores para satisfacer demandas agroindustriales, comerciales y domésticas específicas, en función de la radiación solar de una determinada localidad.

**PALABRAS CAVES:** Energía solar térmica, colector solar, agua precalentada, aire precalentado, sistema solar térmico, rendimiento térmico.

## **“CONSTRUCTION AND MEASUREMENT OF EFFICIENCY FROM A BIFLUID FLAT SOLAR COLLECTOR (BFSC) FOR PRODUCTION OF PREHEATED WATER AND AIR”**

**Vargas Espinosa, AJ. 2017.** Construction and measurement of efficiency from a bifluid flat solar collector (BFSC) for production of preheated water and air.

### **ABSTRACT**

This research is about the construction and thermal performance study of a flat-plate solar collector prototype with one square meter of capturing area, for preheated air and water production. Was build with cost effective quality local materials. It was docked with a thermal solar system (SST) to carry out the determination of the functional behavior of the collector and the performance measurement was recording the water entry temperature, the temperature of the water in the middle stratum, the water flow entry, exhaust air temperature, relative humidity of exhaust air and the air flow rate of exhaust of the flat-plate collector reached to produce, under the incident solar radiation. The data was obtained between april and may 2017, were handled in three modes of operation in five alternating days each way and measured in 15 minute intervals from 8:00 to 19:00 hours. Under mode A were measured simultaneously both fluids and obtained an average exhaust air temperature of 43,14 °C, average relative humidity exhaust air reached 39.97% and 0.72 m<sup>3</sup>/min. exhaust flow air average. The average temperature of the water income reached 32.71 °C, the water average temperature at average stratum point was 32.59 °C and income water flow average 0.0057 m<sup>3</sup>/min. Mode B was only circulated water and obtained income temperature average of 35.83 °C, average temperature in the middle stratum reached 35.44 °C and a flow average income of 0.0057 water m<sup>3</sup>/min. Under the mode C it was only circulated air; the average temperature of the exhaust air reached 47.11 °C, average humidity of exhaust air reached 31.24% and average exhaust flow was 0.84 m<sup>3</sup>/min. The outcome showed this collector of one square meter of solar radiation capturing area is cost effective, can be easily replicated and developed simulation equations analysis allow to extrapolate the sizing of the area of collectors to meet specific demands on agro-industrial, commercial and domestic applications, according to solar radiation of a specific place.

**KEYWORDS:** thermal solar energy, solar collector, preheated water, preheated air, solar thermal system, thermal performance.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>HOJA DE APROBACIÓN</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	iii
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>RESUMEN</b> .....	vi
<b>ABSTRAC</b> .....	vii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Planteamiento del problema a investigar.....	2
1.2. Antecedentes .....	3
1.3. Justificación .....	5
1.4. Objetivos .....	6
1.4.1. General .....	6
1.4.2. Específicos.....	6
1.5. Hipótesis de investigación .....	6
1.6. Alcances y limitaciones .....	7
1.6.1. Alcances .....	7
1.6.2. Limitaciones .....	7
<b>2. REVISION DE LITERATURA</b> .....	8
2.1. Energía.....	8
2.1.1. Energías no renovables .....	8
2.1.2. Energías renovables .....	9
2.2. Energía solar .....	10
2.2.1. Radiación solar terrestre .....	11
2.2.2. Energía solar como fuente alterna y aplicaciones.....	13
2.2.3. Beneficios e inconvenientes.....	14
2.3. Energía térmica .....	14
2.3.1. Transferencia de calor .....	15
2.3.1.1. Conducción de calor .....	16
2.3.1.2. Convección de calor .....	16
2.3.1.3. Radiación de calor.....	17
2.3.2. Usos y sectores donde se aplica la energía térmica.....	18
2.3.3. Forma de medición .....	19

2.4.	Sistema solar térmico (SST).....	19
2.4.1.	Sistema solar térmico para producción de agua precalentada.....	20
2.4.2.	Sistema solar térmico para producción de aire precalentado.....	21
2.4.3.	Elementos del Sistema Solar Termico .....	21
2.4.3.1.	Subsistema de Captacion.....	21
2.4.3.2.	Subsistema de Almacenamiento .....	22
2.4.3.3.	Subsistema de transporte.....	23
2.4.3.4.	Subsistema auxiliar.....	24
2.4.4.	Sistema solar térmico de baja temperatura.....	25
2.4.5.	Colector solar plano .....	25
2.4.5.1.	Colector solar plano para agua precalentada .....	26
2.4.5.2.	Colector solar plano para aire precalentado .....	26
2.4.5.3.	Componentes de un colector solar plano.....	28
2.4.5.3.1.	Cubierta exterior .....	28
2.4.5.3.2.	Placa absorbidora.....	28
2.4.5.3.3.	Tuberías.....	29
2.4.5.3.4.	Aislamiento .....	30
2.4.5.3.5.	Carcasa o caja envolvente.....	30
2.4.5.4.	Colocación y orientación del colector solar .....	31
2.4.5.5.	Funcionamiento de un colector solar plano .....	31
2.4.5.5.1.	Efecto invernadero.....	32
2.4.5.5.2.	Estratificación térmica.....	32
2.5.	Fluidos caloportadores (agua-aire).....	34
2.6.	Variable importantes.....	35
2.6.1.	Temperatura .....	35
2.6.2.	Humedad relativa.....	36
2.6.3.	Caudal .....	36
3.	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	38
3.1.	Lista de materiales, herramientas, componentes auxiliares e instrumentación.....	38
3.2.	Ubicación del área de estudio .....	40
3.3.	Metodos seguidos .....	41

3.3.1.	Selección del diseño .....	41
3.3.2.	Selección, compra y movilización de materiales.....	42
3.3.3.	Construcción e instalación del sistema .....	42
3.3.4.	Levantamiento de datos.....	43
3.3.5.	Análisis estadístico .....	44
3.3.6.	Parámetros evaluados .....	44
4.	<b>RESULTADOS</b> .....	46
4.1.	Construcción e instalación del sistema.....	46
4.1.1.	Construcción del colector solar .....	46
4.1.2.	Localización del colector .....	60
4.1.3.	Construcción e instalación del sistema solar térmico (SST) .....	60
4.1.4.	Puesta en marcha del colector solar .....	66
4.2.	Levantamiento de datos .....	67
4.3.	Análisis gráfico .....	85
4.4.	Análisis estadístico .....	93
5.	<b>DISCUSION</b> .....	100
6.	<b>CONCLUSIONES</b> .....	103
7.	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	105
8.	<b>REFERENCIAS CITADAS</b> .....	106
	<b>ANEXOS</b> .....	115

## ÍNDICE DE CUADROS

NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
I	ENERGÍAS RENOVABLES LIMPIAS	10
II	CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA	10
III	CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS METALES SÓLIDOS, NO METÁLICOS, LÍQUIDOS Y GASES	16
IV	ORDEN DE MAGNITUD DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION	17
V	SECTORES DE EMPLEO DE LA ENERGIA TERMICA EN FUNCIÓN DE SUS TEMPERATURAS DE PROCESO.	18
VI	MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR	38
VII	HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR	39
VIII	COMPONENTES AUXILIARES DEL COLECTOR SOLAR	39
IX	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	40
X	MODOS EMPLEADOS EN LA MEDICIÓN DE DATOS	66
XI	PROMEDIOS DIARIOS DE AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO OBTENIDOS BAJO EL MODO A	68
XII	PROMEDIOS DE LA RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $W/m^2$ ) PARA EL MODO A	69
XIII	PROMEDIOS DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE INGRESO ( $T_{iw}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $^{\circ}C$ ) PARA EL MODO A	70
XIV	PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AGUA DE INGRESO ( $Q_{iw}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $m^3/min$ ) PARA EL MODO A	71
XV	PROMEDIOS DE LA TEMPERTURA DEL AIRE DE ESCAPE ( $T_{ea}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $^{\circ}C$ ) PARA EL MODO A.	72
XVI	PROMEDIOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE ESCAPE ( $H_{rea}$ ) A LO LARGO DEL DIA (%) PARA EL MODO A	73
XVII	PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AIRE DE ESCAPE ( $Q_{ea}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $m^3/min$ ) PARA EL MODO A	74
XVIII	PROMEDIOS DIARIOS DE AGUA PRECALENTADA OBTENIDOS BAJO EL MODO B	75
XIX	PROMEDIOS DE LA RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $W/m^2$ ) PARA EL MODO B	76

XX	PROMEDIOS DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE INGRESO ( $T_{iw}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $^{\circ}\text{C}$ ) PARA EL MODO B	77
XXI	PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AGUA DE INGRESO ( $Q_{iw}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) PARA EL MODO B	78
XXII	PROMEDIOS DIARIOS DE AIRE PRECALENTADO OBTENIDOS BAJO EL MODO C	79
XXIII	PROMEDIOS DE LA RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) PARA EL MODO C	80
XXIV	PROMEDIOS DE LA TEMPERTURA DEL AIRE DE ESCAPE ( $T_{ea}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $^{\circ}\text{C}$ ) PARA EL MODO C	81
XXV	PROMEDIOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE ESCAPE ( $H_{rea}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $^{\circ}\text{C}$ ) PARA EL MODO C	82
XXVI	PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AIRE DE ESCAPE ( $Q_{ea}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) PARA EL MODO C	83
XXVII	CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS DEL MODO A	92
XVIII	ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE CON RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) COMO VARIABLE INDEPENDIENTE, BAJO EL MODO A	94
XXIX	CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS DEL MODO B	95
XXX	ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE CON RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) COMO VARIABLE INDEPENDIENTE, BAJO EL MODO B	96
XXXI	CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS DEL MODO C	97
XXXII	ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE CON RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) COMO VARIABLE INDEPENDIENTE, BAJO EL MODO C	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
1	Radiación solar que llega a la tierra	12
2	Elementos de un sistema solar térmico	25
3	Componentes de un colector solar plano	28
4	Localización geográfica del área de estudio	41
5	Días de medición	67
6	Dinámica de presentación de los resultados	67
7	Promedios de la temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), la temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ) y la temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ )	85
8	Promedios de la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ )	86
9	Promedios de la humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ) y la humedad relativa de aire de escape ( $H_{rea}$ )	87
10	Promedios de la temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), la temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ) y la temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ )	88
11	Promedios de la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ )	89
12	Promedios de la humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ) y la humedad relativa de aire de escape ( $H_{rea}$ )	91
13	Interpretación de los modelos de regresión del modo A	94
14	Interpretación de los modelos de regresión del modo B	96
15	Interpretación de los modelos de regresión del modo C	98

## ÍNDICE DE ANEXOS

NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
1	Presupuesto de los materiales utilizados en la construcción del colector solar	115
2	Limpieza de la fascia	116
3	Marcación del límite en la parte externa de la fascia	116
4	Marcación de las intersecciones de la fascia con el centropunto	116
5	Perforación de intersecciones de la fascia	117
6	Estampador de esquinas	117
7	Corte de pestañas en la fascia	117
8	División de la fascia	117
9	Desbaste de borde filoso de la fascia	118
10	Escuadre de la fascia	118
11	Pintado de la fascia	118
12	Remachado de la fascia	119
13	Fascia a escuadra	119
14	Aislamiento interno de la fascia	119
15	Limpieza de la tabla de madera	119
16	Barnizado de la madera	120
17	Seccionamiento de la madera	120
18	Centrado de la madera en el marco	120
19	Atornillado de la cubierta aislante	120
20	Cubierta aislante	121
21	Corte la láminas metálicas	121
22	Perforación del fondo retenedor	121
23	Atornillado del fondo retenedor	121
24	Cortatubos	122
25	Secciones de tubería	122
26	Tubería soldada en forma de parrilla	122
27	Prueba de fugas en la tubería	123
28	Colocación de la tubería dentro del marco	123
29	Engrape de la tubería	123
30	Tubería adaptada al colector	123
31	Pintado de la tubería y del fondo retenedor de calor	124
32	Distribución de tapones de cobre	124
33	Tapones de cobre adaptados a la placa absorbadora de calor	124
34	Sobrepuesto de la placa captadora de calor	125
35	Instalación de la placa captadora	125
36	Adaptación de la placa captadora	126
37	Aislamiento del borde de la placa captadora	126
38	Medición de los espacios de entrada y salida del aire	126
39	Salidas del aire remarcadas	126

40	Abertura de del área de paso del aire	126
41	Perforación del protector contra lluvias	127
42	Adaptación del protector contra lluvias	127
43	Protector contra lluvia instalado	127
44	Protector contra lluvia con aislante térmico	128
45	Cordón de adhesivo de poliuretano sobre el marco del colector	128
46	Instalación de la cubierta transparente	129
47	Prototipo de colector solar plano bifluidos	129
48	Colector adaptado al SST, funcionando durante un día soleado	130
49	Colector adaptado al SST, funcionando durante un día lluvioso	130
50	Termómetro de medición del agua de ingreso	131
51	Termómetro de medición del agua en el punto medio del colector	131
52	Termoanemómetro	131
53	Micro termohigrómetro	131
54	Regleta de conexión de componentes auxiliares	132
55	Bomba recirculadora	132
56	Ventiladores	132
57	Panel fotovoltaico	132
58	Medición de la temperatura del agua de ingreso con el termómetro de inmersión	133
59	Medición de la temperatura y humedad relativa del aire de escape con el micro termohigrómetro	133
60	Medición del caudal del aire de escape con el termoanemómetro	133
61	Medición de la radiación solar con el actinógrafo	133
62	Croquis de las partes del colector solar	134
63	Croquis de la tubería en forma de parrilla	134
64	Croquis del colector solar con el SST	135
65	Croquis del posicionamiento de los instrumentos de medición	135
66	Promedios por hora obtenidos bajo el modo de agua precalentada y aire precalentado	136
67	Promedios por hora obtenidos bajo el modo de agua precalentada	137
68	Promedios por hora obtenidos bajo el modo de aire precalentado	137
69	Valores delta utilizados para el desarrollo del análisis estadístico del modo de agua precalentada y aire precalentado	138
70	Valores delta utilizados para el desarrollo del análisis estadístico del modo de agua precalentada	139
71	Valores delta utilizados para el desarrollo del análisis estadístico del modo de agua precalentada	139
72	Formulario de medición para el modo A	140
73	Formulario de medición para el modo B	141
74	Formulario de medición para el modo C	142

## 1. INTRODUCCIÓN

Panamá es un país favorecido con un potencial enorme de producción de energía limpia debido a su localización geográfica. Sin embargo ocurre crisis energética producto del cambio climático, poca planificación en el uso de los recursos naturales y el aumento poblacional, produciendo racionamiento y pérdidas económicas millonarias.

Según Flores (2008), Panamá posee una buena disponibilidad del recurso energético solar. Diferentes registros indican que la energía por unidad de superficie que recibe Panamá durante un día alcanza  $4,500 \text{ W/m}^2$ ; desde este principio se puede resaltar la importancia de la presente investigación; la cual consiste en el análisis del rendimiento térmico de un prototipo de colector solar plano bifluidos de un metro cuadrado de área, bajo las condiciones climáticas del corregimiento de Chiriquí. El mismo utiliza la radiación solar para la producción simultánea de agua y aire precalentados; los cuales son fluidos empleados en los sectores agroindustrial, comercial y doméstico.

Los colectores solares planos poseen diversas aplicaciones, entre las que más destacan: el secado de granos y deshidratado de frutas y hortalizas, eliminación de coliformes y bacterias en el agua, la desinfección y esterilización de instrumentos en la medicina, usos sanitarios y domésticos, la calefacción, la climatización de piscinas, la pasteurización de alimentos, el lavado de equipos de ordeño, entre otros. Sin embargo, en Panamá esta tecnología ha sido muy poco adoptada (Castillo, JR. 2016. Colectores solares (entrevista). Chiriquí, Universidad de Panamá.). Por otro lado, los colectores solares planos

encontrados en el mercado local, solo tienden a calentar un fluido. En este caso, se tomó la tarea de construir un prototipo de colector solar plano bifluidos (CSPB), utilizando métodos y materiales de costo accesible.

### **1.1. Planteamiento del problema a investigar**

En Panamá la alta demanda de energía eléctrica no es suplida, a tal punto que el país se encuentra sumergido en una crisis energética. Según Flores (2008), la capacidad instalada de energía eléctrica está próxima a 1 300 MW; pero cada año el desarrollo económico de Panamá requiere cerca de 40 MW de nueva generación.

Según Trejos (2011), en la Republica Panamá el sector que utiliza mayormente el recurso hídrico es el energético (9,861 hm<sup>3</sup> anuales); seguido por, el paso interoceánico (2,623 hm<sup>3</sup> anuales); el riego de los cultivos agrícolas (503 hm<sup>3</sup> anuales); y el abastecimiento de agua potable (294 hm<sup>3</sup> anuales). Según estos índices el acaparamiento de las aguas es dominando por las hidroeléctricas, las cuales compiten directamente tanto con los productores rurales como con los acueductos encargados del abastecimiento del agua.

Informes presentados por el MIDA (Ministerios de Desarrollo Agropecuario de Panamá), revelan que el exceso y proliferación de proyectos hidroeléctricos (73 proyectos hidroeléctricos en 6 cuencas hidrográficas) han disminuido considerablemente el volumen de agua en ríos donde se encuentran instalados proyectos de riego, dándole paso tanto a riesgos alimentarios como a escases de agua potable (Arcia 2015).

El marcado aumento de termoeléctricas en Panamá generado por la crisis en energética, ha traído consigo impactos negativos al ambiente. Debido a que tanto durante la fase de planificación, construcción y de operación de este tipo de centrales se genera una elevada contaminación. Siendo las emisiones atmosféricas, la lluvia acida, la destrucción de ecosistemas acuáticos y el aumento del calentamiento global, solo algunos de una larga lista.

Por otra parte la liberación de CO<sub>2</sub> debido a combustibles fósiles para la satisfacción de necesidades en lugares donde no llega electricidad, la mala administración del recurso agua para suplir la demanda de energía eléctrica y los altos costos del kilovatio hora que paga el usuario panameño; siendo la cuarta tarifa más alta por el uso de los servicios eléctricos en toda América Latina (Energía eléctrica...2014).

## **1.2. Antecedentes**

La actual crisis energética que atraviesa Panamá, ha provocado que el estado tome medidas de emergencia nacional, las cuales han afectado fuertemente la economía del país. Para el año 2013, el gobierno validó un comunicado informando que Panamá se encontraba en la peor sequía jamás antes vista, por lo cual se propiciaron medidas de racionamiento, entre las cuales el cierre de centros de diversión desde las 10:00 P.M., la operación de paso simultaneo de dos barcos por las esclusas del canal de Panamá, el cierre temporal de colegios y recorte de horarios laborales, así como apagones; fueron llevadas a cabo (Marinkovic 2013).

La energía solar térmica en los últimos años ha tenido un aumento considerable en muchos países del mundo; esto debido a su diversificación. En España en el año 2000 fue establecida la ordenanza solar, que regula la incorporación de sistemas de captación y utilización de energía solar activa de baja temperatura (placas solares térmicas) convirtiéndose así en la primera normativa de este tipo en Europa (Cadena *et al.* 2007). Por otro lado el avance de la capacidad acumulativa de captadores de agua alcanzó un estimado de 406 GWth al final del 2014 (los captadores de aire agregaron otros 2 GWth), proporcionando aproximadamente 341 TWh de calor al año. Las ventas domésticas se expandieron en muchos lugares de Asia, partes de África y en América Latina, marcándose tendencias de un calentamiento doméstico de mayores volúmenes de agua en hoteles, escuelas y complejos de gran tamaño, así como la aparición de nuevos mercados como el de enfriamiento solar, uso de captadores más avanzados para sistemas de calefacción distritales y para aplicaciones industriales, en los cuales despunta China, cubriendo cerca del 80% del mercado mundial para captadores solares de agua, seguido por Turquía, Brasil, India y Alemania (Sawin 2015). En Panamá no existen informes sobre el uso de esta tecnología, debido a que el estado no ha optado por implementarla como programa social o tecnológico; sin embargo, existe un reducido número de empresas privadas las cuales ofrecen servicios de instalaciones térmicas solares.

### 1.3. Justificación

Esta investigación pretende ofrecer una alternativa accesible y ecológica a los usuarios de servicios eléctricos y combustibles fósiles. Mediante el uso de energía solar térmica a través de la implementación de un colector solar plano bifluidos. Como un medio para ahorrar dinero y tiempo, así como para mitigar efectos nocivos a la salud, disminuir impactos ambientales y ayudar a disminuir la actual crisis energética que afecta a Panamá.

La adopción de esta tecnología por parte de usuarios potenciales puede ayudar a disminuir el elevado costo del kilovatio hora, el cual alcanza los 0.17 balboas. El CO<sub>2</sub> y otros gases de invernadero que son liberados por termoeléctricas que consumen combustibles fósiles, los cuales maximizan el efecto del cambio climático y enfermedades producidas por bacterias y el racionamientos energético, son causa de pérdidas económicas; así como la estabilización del recurso hídrico necesario para la seguridad alimentaria y uso humano (Castillo, JR. 2016. Colectores solares (entrevista). Chiriquí, Universidad de Panamá.).

La energía solar térmica cumple tres condiciones; es alterna, es ecológica y es barata, por lo cual la implementación del prototipo de colector solar plano bifluidos puede mitigar la problemática anteriormente mencionada, debido a que puede satisfacer diversas necesidades sin utilizar energía eléctrica de la red pública.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Determinar el rendimiento térmico de un prototipo de colector solar plano bifluidos (CSPB) para producción agua y aire precalentados, bajo las condiciones climáticas del corregimiento de Chiriquí, distrito de David, provincia de Chiriquí, Republica de Panamá.

### **1.4.2. Específicos**

1. Construir un colector solar plano mediante un diseño replicable, con herramientas comunes y materiales localizables en el comercio local.
2. Ensayar el colector registrándose la temperatura y caudal del agua precalentada producida; la temperatura, humedad relativa y caudal del aire precalentado producido por el colector solar, mientras se registra la radiación solar.
3. Tabular, graficar y analizar los valores obtenidos en la medición.
4. Generar modelos matemáticos predictivos del comportamiento térmico del colector solar en otros ambientes y niveles de radiación solar.

## **1.5. Hipótesis de investigación**

**H.a.:** Es factible construir un prototipo de colector solar plano bifluidos para la producción simultanea de agua precalentada y aire precalentado.

**H.o.:** No es factible construir un prototipo de colector solar plano bifluidos para la producción simultánea de agua precalentada y aire precalentado.

**H.a.:** Es factible determinar el rendimiento térmico de un prototipo de colector solar plano bifluidos.

**H.o.:** No es factible determinar el rendimiento térmico de un prototipo de colector solar plano bifluidos.

## **1.6. Alcances y limitaciones**

### **1.6.1. Alcances**

La investigación pretendió desarrollar un prototipo de colector solar plano bifluidos para el precalentado simultáneo de agua y aire, y determinar su rendimiento térmico. Utilizándose materiales de bajo costo adquiridos localmente e incentivar la accesibilidad y transferencia de técnicas.

Su desarrollo pretende inducir la mitigación de diferentes impactos ambientales producto de la actual crisis energética, la reducción del consumo de la energía eléctrica e incentivar el ahorro energético.

### **1.6.2. Limitaciones**

La mayor limitante fue la falta de instrumentación adecuada para toma de datos. Por otro lado, la escasa estructura adecuada para el desarrollo del proyecto.

## **2. REVISION DE LITERATURA**

### **2.1. Energía**

La energía se define como la capacidad que poseen los cuerpos para desarrollar un determinado trabajo. Desde la antigüedad el hombre ha necesitado emplear energías para sobrevivir y satisfacer sus necesidades; energías las cuales ha tomado de su entorno y aplicado según el conocimiento que se tenía en cada momento (Roldán, 2008).

#### **2.1.1. Energías no renovables**

Las energías no renovables, son aquellas que provienen de fuentes de energía que se encuentran disponibles en la naturaleza en cantidades limitadas, o cuyo ritmo de consumo es muy superior al de regeneración natural (Rufes 2010).

Estas energías se han formado a lo largo de épocas geológicas pasadas, a partir de energía solar que llegaba a la tierra y que por efecto de la fotosíntesis se convertía en materia vegetal fijándose parte del carbono existente en las atmosfera, recibiendo el nombre de combustibles fósiles (carbón, petróleo crudo y gas natural) porque se les utiliza con dicho fin. De forma que con su combustión liberan la energía solar que acumularon hace millones de años. Este proceso necesito miles de años y se estima que la energía obtenida se consumirá solo en 300. (Corominas y Puig 1990, Cuervo y Méndez 2008).

Por lo general, las fuentes no renovables de energía se llaman fuentes de energía convencionales. Son también consideradas energías sucias, ya que su uso es la causa directa de un daño mayor al medio ambiente y la sociedad: la destrucción de los ecosistemas, los daños a los bosques y acuíferos, la

aparición de enfermedades, la reducción de la productividad agrícola, el efecto invernadero entre otros (Rufes 2010).

### **2.1.2. Energías renovables**

Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes de energía virtualmente inagotables a escala humana, debido a la inmensa cantidad de energía que contienen, o cuyo ritmo de regeneración natural es muy superior al de consumo. Además tienen la ventaja de poder complementarse entre sí, favoreciendo la integración entre ellas (Corominas y Puig 1990, Cuervo y Méndez 2008).

Roldán (2012) señala que las energías renovables también conocidas como energías alternas, no son una aplicación reciente puesta de moda por grupos ecologistas, ya que fueron aprovechadas desde la antigüedad; sin embargo, las nuevas tendencias giran alrededor de ellas y hay personas que piensan que por sí solas son la solución a la demanda de energía que tiene el mundo moderno.

Las energías renovables pueden dividirse en dos categorías: contaminantes y no contaminantes. Las primeras son aquellas obtenidas de la materia orgánica o biomasa, la cual conlleva emisiones de dióxido de carbono, hollines y otras partículas sólidas, que aun así, son de un grado mucho menor que las convencionales. Las segundas, también denominadas energías limpias o verdes, son aquellas que durante su obtención o su uso no se emiten subproductos que puedan perjudicar el medio ambiente (Rufes 2010).

**CUADRO I. ENERGÍAS RENOVABLES LIMPIAS.**

Fuentes de energía	Procedencia
Solar (térmica)	Calor del sol que llega a la Tierra.
Solar (luminosa)	Luz del Sol que llega a la Tierra.
Eólica	Fuerza del viento.
Hidráulica	Agua de los ríos y Corrientes de agua dulce.
Mareomotriz	Mares y océanos.
Geotérmica	Calor del interior de la Tierra.
Undimotriz	Olas del mar y de los océanos.

**Fuente:** Tomado de Roldán 2012:46.

**CUADRO II. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA.**

Energías renovables		Energías no renovables	
Limpias	Contaminantes	Contaminantes	
E. eólica E. hidráulica E. geotérmica E. de las mareas E. del oleaje E. mareotérmica E. osmótica E. solar	Biomasa	Combustibles fosiles: Carbón Petróleo Gas natural	E. nuclear

**Fuente:** Adaptado de Rufes 2010.

Dentro del marco de las energías renovables se destaca la solar, debido a que es necesaria para el desarrollo de todas las demás. Su avance tecnológico es mucho mayor y posee mayor mercado (Cuervo y Méndez 2008)

**2.2. Energía solar**

El sol es una estrella formada casi toda por hidrógeno y una pequeña proporción de helio, en la que se libera gran cantidad de energía, debido a una reacción termonuclear al transformarse el hidrogeno en helio y las altas temperaturas y presiones que se alcanzan en su interior (Castillo 1994, Jutglar 2004). La energía liberada se conoce como energía solar.

Según Castillo (1994) esta energía es la encargada de producir la temperatura en el planeta tierra y mantener el equilibrio de muchos ciclos de vida. Siendo miles de veces mayor, a la energía consumida por la toda la humanidad.

El Sol descarga unos 0.600 kW sobre cada metro cuadrado de suelo entre los paralelos 40°S y 40°N y menos en latitudes superiores, durante unas 6 horas al día. Eso supone una cantidad de 144 billones de kWh cada dos días. La humanidad está gastando hoy esa cantidad de energía en un año. Con rendimientos del 10%, toda la energía que gasta hoy la humanidad en un año es lo que podemos extraer de la energía que llega del sol en 20 días (Ruiz 2014).

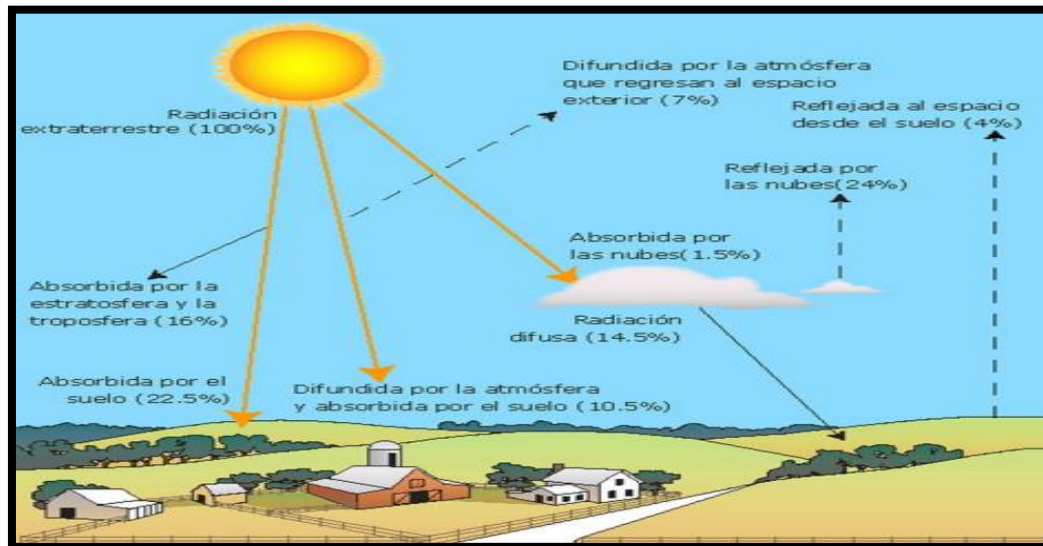
### **2.2.1. Radiación solar terrestre**

La radiación solar es el conjunto de ondas electromagnéticas producidas por el sol y que arrastran su energía a través de todo el espacio. Estas radiaciones electromagnéticas se propagan a una velocidad de 300,000 km/s en el vacío hasta llegar a la tierra, donde se mide en  $W/m^2$  (Rufes 2010).

No toda la energía que proviene del sol llega a la superficie terrestre. En su camino, la energía solar atraviesa la atmosfera y es interceptada por diferentes agentes o reflejada hacia el espacio exterior. Esta interacción da como resultado la existencia de diferentes tipos de radiación sobre el plano terrestre: la directa, que es aquella que procede del sol e incide sobre la superficie sin cambiar de dirección; la difusa, aquella que por choques sucesivos con moléculas y partículas contenidas en el aire, se ha difundido al atravesar la atmosfera; y la reflejada o albedo, procedente de la reflexión de la radiación

directa en los elementos del entorno (Castillo 1994, Jutglar 2004, Ballesteros *et. al.* 2008).

**Figura 1.** Radiación solar que llega a la tierra



**Fuente:** Tomado de Mata 2016.

Según Castillo (1994) la radiación solar que llega a la tierra no se distribuye homogéneamente debido a que existen factores como la posición geográfica, los movimientos de traslación y rotación, la orografía, Las condiciones climatológicas que influyen en el grado de nubosidad, la turbidez atmosférica, viento predominante, la época del año entre otras que hacen que la radiación solar, no llegue con igual intensidad sobre todo el planeta tierra.

Para estimar radiación solar que llega a la superficie terrestre se utiliza la irradiancia, magnitud que mide la potencia incidente que por unidad de superficie ( $W/m^2$ ) alcanza la tierra, permitiendo seleccionar escenarios para el desarrollo de tecnologías solares (Jutglar 2004).

### 2.2.2. Energía solar como fuente alterna y aplicaciones

Desde tiempos antiguos el hombre ha utilizado la energía solar para su beneficio. Ha estudiado sus características, y maximizado las aplicaciones que se le pueden dar. Según UV (2011), “desde el siglo pasado los datos de irradiación solar mundial indican que, si se aprovechara de forma eficiente toda la energía proveniente del sol, se cubrirían todas nuestras necesidades energéticas, sin la necesaria intervención de otra fuente de energía”.

Según Abramovitz *et. al.* (1998) la energía solar absorbida por la Tierra en un año es equivalente a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles en el mundo y diez mil veces superior al consumo actual.

Santamarta (2013), compara los combustibles fósiles y la energía solar, indicando que al ritmo actual de extracción, las reservas estimadas de carbón durarán 1.500 años, las de gas natural 120 y las de petróleo no más o poco más de 60 años. Mientras que con la energía solar se podrá contar por lo menos los próximos 6 mil millones de años

Los autores anteriormente citados señalan que, debido al cambio climático y la crisis económica mundial, el abandono de fuentes de energías contaminantes va en aumento. Las grandes empresas, están optando por la utilización de energías menos costosas como la solar para la creación de tecnologías y maquinarias. La creación de leyes que incentivan el uso de energías renovables se ha acrecentado, siendo estas razones la causa del incremento de nuevas tendencias en el uso en la energía solar.

La energía solar es utilizada en diferentes campos y tiene aplicaciones innumerables. Por ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico, dar calefacción, e incluso climatizar piscinas, mientras que en otros campos la producción de energía eléctrica, la refrigeración, la desalinización de aguas, el sistema de lavado y secado industrial, también son realizados con energía solar. Siendo en el caso específico del sector agropecuario: el bombeo de agua, el riego, el secado de granos, deshidratado de frutas y procesamiento de alimentos (Meinel y Meinel 1982).

### **2.2.3. Beneficios e inconvenientes**

Entre los beneficios de la energía solar se encuentran: es una energía renovable, gratuita e inagotable. Posee un suministro seguro y en autodesarrollo, mejora la salud, hace frente a las fluctuaciones del precio del petróleo, es mitigadora del cambio climático, y posee la común creencia según la cual “no habrá necesidad de guerras a causa de la energía solar” (Romero 2009).

Los inconvenientes de la energía solar son bien conocidos: la radiación llega a la Tierra de forma dispersa, intermitente (disponible únicamente durante las horas del día) e inadecuadamente distribuida sobre la superficie terrestre. Existen, sin embargo, diversas tecnologías que pueden superar estas dificultades y hacer que la energía solar sea útil para todos los propósitos (Romero 2009).

### **2.3. Energía térmica**

La primera ley de la termodinámica afirma que la energía no puede crearse ni destruirse, solo puede ser cambiada de una forma a otra. Según la finalidad

que se le da a la energía solar, esta es transformada. Pudiendo resaltar que la energía solar puede aprovecharse para producir calor.

**“La energía térmica es la manifestación de la energía en forma de calor. En todos los materiales los átomos que forman sus moléculas están en continuo movimiento ya sea trasladándose o vibrando. Este movimiento implica que los átomos tengan una determinada energía cinética a la que nosotros llamamos calor”** (Definición de...s.f.).

**“La energía solar térmica designa todas las tecnologías que, utilizando como fuente la radiación del Sol, transforman su energía en calor utilizable para satisfacer directamente cualquier necesidad calorífica (calentamiento del aire, del agua y enfriamiento del aire) o para producir electricidad o combustibles. Además, podrían incluirse las tecnologías que concentran la energía solar, y otros conceptos como las centrales de torre y la energía térmica de los océanos”** (Romero 2009).

### **2.3.1. Transferencia de calor**

Los autores Bohn *et al.* (2012) sustentan que siempre que existe una variación de temperatura en un sistema, o cuando se relacionan sistemas con temperaturas diferentes, se transfiere energía. A lo cual ellos denominan este proceso como transferencia de calor.

La energía térmica puede transmitirse de un cuerpo a otro por, conducción convección y radiación. Siendo por conducción la transmitida por contacto físico, por convección la movida por corrientes de aire y por radiación la transmitida a través de ondas electromagnéticas, (Castillo 1994).

### 2.3.1.1. Conducción de calor

Los autores Costa *et al.* (2004) comentan que cuando en un medio natural continuo y no vacío existe un gradiente de temperatura, el calor fluirá en el sentido de la temperatura decreciente (de lo más caliente a lo más frío) simultáneamente sin que exista ningún desplazamiento de materia a nivel macroscópico. A este fenómeno se le conoce como conducción molecular de calor. Si el medio natural continuo posee la misma temperatura no existirá transferencia energética.

### CUADRO III. CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS METALES SÓLIDOS, NO METÁLICOS, LÍQUIDOS Y GASES

Material	Conductividad térmica a 300 k (540 °R)	
	$W/m^{\circ}K$	$Btu/h\ ft^2\ ^{\circ}f$
Cobre	399	231
Aluminio	237	137
Acero al carbón, 1% C	43	25
Vidrio	0.81	0.47
Plásticos	0.2 – 3.0	0.12 – 0.17
Agua	0.6	0.35
Etileno glycol	0.26	0.15
Aceite para motores	0.15	0.09
Freón (líquido)	0.07	0.04
Hidrógeno	0.18	0.10
Aire	0.026	0.02

**Fuente:** Tomado de Bohn *et al.* 2012:10.

### 2.3.1.2. Convección de calor

Se explica como el transporte de moléculas calientes que se da cuando un fluido con una determinada temperatura se encuentra en constante movimiento. La convección puede ser natural o forzada según el tipo de fuerzas que actúen sobre el fluido. En el primer caso actúan solo las fuerzas de flotación (viento) generadas por la diferencia de densidades y temperaturas

que aparecen en el seno de un fluido. En el segundo caso actúan dispositivos mecánicos (bombas, agitadores y otros) que comunican energía al fluido poniéndolo en movimiento (Costa *et al.* 2004).

**CUADRO IV. ORDEN DE MAGNITUD DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION.**

Fluido	Coeficiente de transferencia de calor por convección	
	$W/m^2 \text{ } ^\circ K$	$Btu/h \text{ } ft^2 \text{ } ^\circ f$
Aire, convección libre	6 – 30	1 – 5
Vapor o aire sobrecalentado, convección forzada	30 – 300	5 – 50
Aceite, convección forzada	60 – 1800	10 – 300
Agua, convección forzada	300 – 18000	50 – 3000
Agua, en ebullición	3000 – 60000	500 – 10000
Vapor, condensándose	6000 – 120000	1000 – 20000

**Fuente:** Tomado de Bohn *et al.* 2012:19.

La conducción se diferencia de la convección en que en la primera hay un intercambio de energía entre moléculas y en la segunda se basa en el movimiento de masas de fluido, de grandes grupos de moléculas (Costa *et al.* 2004).

**2.3.1.3. Radiación de calor**

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita y sin importar la forma de la materia (superficies sólidas, líquidos y gases), esta se les atribuye a los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas constitutivos. Esta energía es transportada por ondas electromagnéticas, mientras que la conducción y convección requiere de un medio material, la radiación no lo precisa (De Witt e Incropera 1999).

### 2.3.2. Usos y sectores donde se aplica la energía térmica.

Los usos que puede suministrar la energía térmica son incalculables. Ha logrado satisfacer de forma sencilla cualquier sector. Siendo los más beneficiados según referencia:

**CUADRO V. SECTORES DE EMPLEO DE LA ENERGIA TERMICA EN FUNCIÓN DE SUS TEMPERATURAS DE PROCESO.**

SECTOR	PROCESO	NIVEL DE TEMPERATURA (°C)
Alimentos y bebidas	Lavado	40 – 80
	Pasteurización	80 – 100
	Ebullición	95 – 105
	Esterilización	140 – 150
	Tratamiento de calor	40 – 60
Industria agrícola	Secado	30 – 90
	Pasteurización	80 – 100
Industria textil	Lavado	40 – 80
	Blanqueado	60 – 100
	Teñido	100 – 160
Industria química	Ebullición	95 – 105
	Destilación	110 – 300
	Procesos químicos varios.	120 – 180
Todos los sectores	Pre calentamiento de agua para calderas	30 – 100
	Calefacción de áreas de producción	30 – 80

**Fuente:** Tomado de SAGARPA 2007:10

En el caso específico del sector agropecuario, sus aplicaciones se han manifestado en el proceso de escaldado realizado en el sacrificio de ganado en los rastros, en el escaldado de frutas y verduras, en los procesos de limpieza de instalaciones; así como en la utilización de agua caliente en procesos de agroindustrias alimenticias (nixtamal, tequileras, lácteas, etc.) (SAGARPA 2007).

### **2.3.3. Forma de medición**

La energía se mide en Julios (J) según el sistema internacional de unidades, aunque cuando se trata de energía calorífica también se suelen utilizar las calorías (cal) que corresponde a la cantidad de energía que se necesita para elevar un grado centígrado un gramo de agua. Una caloría equivale a 4.18 julios (Castillo, JR. 2016. Energía térmica (entrevista). Chiriquí, Universidad de Panamá.).

## **2.4. Sistema solar térmico (SST)**

Un sistema solar térmico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que permiten captar la energía solar disponible, transformarla en calor y acumularla mediante fluidos contenidos en depósitos de forma que se pueda utilizar cuando se requiera. Está conformado básicamente por un subsistema de captación (colector solar), un subsistema de almacenamiento (reservorio) subsistema de transporte (elementos que permiten la circulación de los fluidos) y un subsistema de energía auxiliar (energía no térmica) (Cuervo y Méndez 2008).

Los sistemas solares térmicos pueden dividirse de acuerdo a su forma de trabajar en: pasivos y activos. Los primeros aprovechan los efectos térmicos de la radiación solar, sin la necesidad de aporte de cualquier otro tipo de

energía; mientras que los segundos son semejantes a los anteriores pero con la diferencia que se requiere el aporte de energía auxiliar como, por ejemplo, la energía eléctrica consumida por bombas o ventiladores destinados a mover los líquidos o gases (aire, agua, aceite térmico o sales fundidas) que transportan el calor desde el captador solar hasta el punto de consumo (Jutglar 2004).

De acuerdo a la necesidad que se vaya a cubrir y la eficiencia térmica, los sistemas solares térmicos pueden clasificarse en: sistemas de baja temperatura, media temperatura y alta temperatura. Los sistemas de baja temperatura son aquellos en donde el fluido calentado no sobrepasa los 100°C, en los de media temperatura no sobrepasa los 300 °C y en los de alta temperatura puede llegarse a sobrepasar los 2000 °C (Mujal 2003, Linares 2017).

#### **2.4.1. Sistema solar térmico para producción de agua precalentada**

Se conoce como SST para producción de agua precalentada, al mecanismo utilizado para elevar la temperatura del agua ambiente, mediante el uso de la energía solar térmica. Esta tecnología es aplicada por lo general al agua destinada a consumo humano (potables), sin embargo, esta tecnología también puede ser aplicada a agua que no posea los parámetros adecuados para consumo humano (agua de lluvia, ríos, lagos, entre otros) y que es requerida para tal fin. Se utiliza para usos sanitarios domésticos principalmente (baños, duchas, fregado de platos, lavadora, lavavajillas, pisos, entre otros); aunque también puede ser usada a nivel industrial (medicina, agronegocios, industria alimentaria, entre otros). Este sistema es considerado de baja

temperatura; debido a que las temperaturas que alcanza el fluido calentado oscilan por debajo de los 100 °C (Castillo, JR. 2016. Sistema solar térmico (entrevista). Chiriquí, Universidad de Panamá).

#### **2.4.2. Sistema solar térmico para producción de aire precalentado**

Se denomina SST para producción de aire precalentado, al mecanismo que emplea la energía solar térmica para la producción de aire con una temperatura mayor a la ambiental. Esta tecnología es usada tanto para necesidades domésticas (climatización de viviendas) como agroindustriales (secado de granos, deshidratado de frutas y hortalizas, etc.). En muchos países esta tecnología es producida a escala industrial, por corporaciones con años en el mercado; sin embargo, puede ser diseñada y construida por personas a escala no comercial, aprovechando materiales de fácil adquisición en el mercado. Este sistema es considerado de baja temperatura; debido a que las temperaturas que alcanza el fluido calentado oscilan por debajo de los 100 °C (Castillo, JR. 2016. Sistema solar térmico (entrevista). Chiriquí, Universidad de Panamá).

#### **2.4.3. Elementos del Sistema Solar Termico**

##### **2.4.3.1. Subsistema de Captacion**

El colector solar térmico es el elemento del SST encargado de captar la energía solar, convertirla en energía térmica y cederla al fluido caloportador. Los colectores pueden utilizar un líquido o un gas para transferir el calor; los líquidos más frecuentes son el agua, una disolución anticongelante o un aceite térmico, mientras que el gas que se suele utilizar como fluido térmico es el aire. Estos a su vez pueden ser clasificados según el fluido térmico que utilicen y la

temperatura de trabajo que puedan alcanzar; clasificándose en: colectores de baja, media y alta temperatura (Jutglar 2004, Rufes 2010, Roldán 2012).

El colector solar térmico es el principal componente del sistema de captación y el elemento más representativo de las instalaciones solares térmicas. Además de producir el calor de manera eficiente, el colector debe estar diseñado para soportar la continua exposición a condiciones exteriores (lluvia, granizo, polvo) y para resistir las temperaturas extremas, tanto altas como bajas, a las que va a estar sometido (Franco *et al.* 2013).

#### **2.4.3.2. Subsistema de Almacenamiento**

El acumulador o reservorio se utiliza para almacenar el agua caliente producida en los SST hasta que se precise su uso. Por lo tanto, debe mantener la calidad sanitaria del agua, colaborar en la buena eficiencia de la instalación y evitar las pérdidas térmicas (Franco *et al.* 2013).

En el acumulador horizontal la temperatura del agua acumulada es bastante homogénea, es decir, presenta poca estratificación, y necesita más energía para llegar a temperaturas más altas. En cambio en el acumulador vertical, se logran temperaturas heterogéneas, mucho mayores en la parte superior del acumulador y bajas en la base del acumulador, es decir, una alta estratificación (Franco *et al.* 2013).

Los acumuladores solares pueden llegar a alcanzar temperaturas elevadas (superiores a 100 °C), y por tanto es preciso que estén conformados por materiales y protecciones interiores con unas características físicas concretas, además de un aislamiento térmico adecuado, imprescindible para desempeñar

su función. Los materiales habitualmente empleados para los acumuladores de ACS son el acero negro con revestimiento plástico (resinas epoxi), el acero negro vitrificado y el acero inoxidable. En determinadas situaciones, en función de la calidad del agua y cuando se tienen garantías de que el agua caliente no va a superar los 60 °C se podrían utilizar acumuladores de acero galvanizados en caliente, pero, en general, no se aconseja su uso (Franco *et al.* 2013).

En los sistemas solares térmicos destinados a la producción de aire caliente es muy poco probable encontrar un almacenador de aire, debido a que el aire caliente producido se transporta directamente a la estancia (lugar que se desea climatizar). Sin embargo, existen almacenadores de aire caliente de alta tecnología, los cuales mantienen el fluido para cuando necesite ser utilizado; en la mayoría de los casos se utilizan para calefacción (Jutglar *et al.* 2011, Del Amo y Martínez 2016).

#### **2.4.3.3. Subsistema de transporte**

Es el encargado de establecer el movimiento del fluido caliente hasta el sistema de acumulación. En los sistemas solares térmicos para aire caliente, el fluido es movido a través del colector solar debido a convección libre (diferencia de densidades) o convección forzada (gracias a un ventilador) hasta la estancia. En los sistemas solares térmicos para ACS se incluye una red hidráulica, formada por diferentes elementos que permite el flujo del agua hasta el reservorio, pudiéndose dar por convección natural (termosifón) o por convección forzada por bombeo (Franco *et al.* 2013, Díaz 2015).

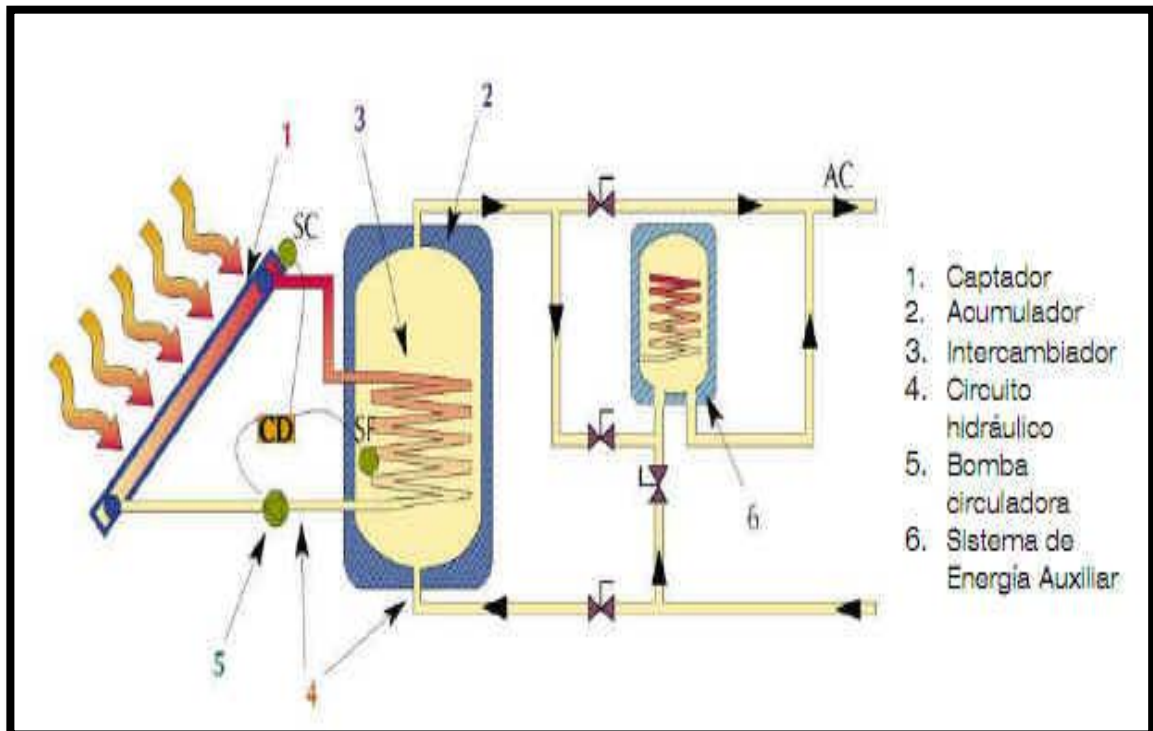
Las tuberías interconectan hidráulicamente todos los componentes y canalizan el movimiento de los fluidos. En el circuito primario se utilizan tuberías de cobre,

de acero inoxidable o de acero negro; las tuberías de materiales plásticos no deberían utilizarse en circuitos primarios a no ser que existan plenas garantías de que van a soportar las condiciones extremas de presión y temperatura del circuito. En los circuitos secundarios y de consumo podrán utilizarse cobre y acero inoxidable; Las tuberías de materiales plásticos podrán utilizarse si son de materiales compatibles con el ACS y se analiza detalladamente su durabilidad en las condiciones de presión y temperatura que van a tener los circuitos (Franco *et al.* 2013).

#### **2.4.3.4. Subsistema auxiliar**

Los sistemas solares térmicos dependen directamente del recurso solar, sin embargo, no siempre está disponible debido a condiciones climáticas, limitando dicho recurso y haciendo el servicio intermitente. Para garantizar siempre la cantidad del fluido caliente, se recomienda instalar un sistema de calentamiento de respaldo, el cual apoye el sistema térmico en diferentes eventualidades. El sistema de respaldo puede ser convencional, pudiendo ser calentadores eléctricos, o bien que utilicen gas LP, diésel u otros combustibles (FIRCO 2012).

**Figura 2.** Elementos de un sistema solar térmico



**Fuente:** Tomado de FECMES 2017.

#### 2.4.4. Sistema solar térmico de baja temperatura

Se denomina sistemas de baja temperatura a todos aquellos en los que el fluido calentado no sobrepasa los 100 °C. En estas instalaciones se utiliza como receptor un captador fijo de placa plana o uno solar de vacío. Los usos más frecuentes de la energía solar térmica de baja temperatura son: la calefacción de edificios, la climatización de piscinas, la producción de agua caliente sanitaria, el secado, entre otros (Linares 2017).

#### 2.4.5. El Colector solar plano

Dentro de la clasificación de los captadores solares, es conocido como colector solar plano al que produce menor temperatura de trabajo. Según Cabrera (2011), un captador solar plano, también llamado colector solar o panel solar

térmico, es un dispositivo que sirve para aprovechar la energía de la radiación solar, transformándola en energía térmica de baja temperatura para usos domésticos o comerciales (calefacción, agua caliente, climatización de piscinas, entre otros).

#### **2.4.5.1. Colector solar plano para agua precalentada**

Los colectores empleados con mayor frecuencia para la producción de agua precalentada son los colectores solares planos con cubierta vidriada; logrando una mayor difusión debido a su buena relación costo-rendimiento; sin embargo, la curva de rendimiento debe ser el parámetro que más importe. Su funcionamiento está basado en el efecto invernadero. Posee una cubierta transparente de vidrio que reduce las pérdidas energéticas y protege la placa absorbente; una superficie absorbente que recoge la radiación solar incidente y la transmite a los tubos por donde circula el agua; unos tubos de circulación que están en contacto con la placa absorbente y por los cuales circula el fluido; el fluido, una mezcla proporcionada de agua y líquido anticongelante al cual se transmite la energía absorbida en la placa; y, por último, el material aislante, que aumenta la retención térmica dentro del colector y mejora así el funcionamiento general del sistema (Maestre 2015).

#### **2.4.5.2. Colector solar plano para aire precalentado**

Entre los calentadores solares de aire, los colectores de placas planas representan una de las configuraciones más económicas, de fácil instalación y mantenimiento (Kalogirou 2004, citado por Baritto y Bracamonte 2012).

Su forma más simple consiste de una lámina de vidrio o material transparente situado en la parte superior, una placa plana que actúa como un cuerpo negro

para absorber calor y una estructura aislada térmicamente que dé soporte a los elementos anteriores. Para su funcionamiento los rayos del sol pasan a través del vidrio y son atrapados en el espacio entre la cubierta y la placa o absorbedor. El calor es posteriormente usado para la necesidad que se requiera cubrir (Ávila *et al.* 2010).

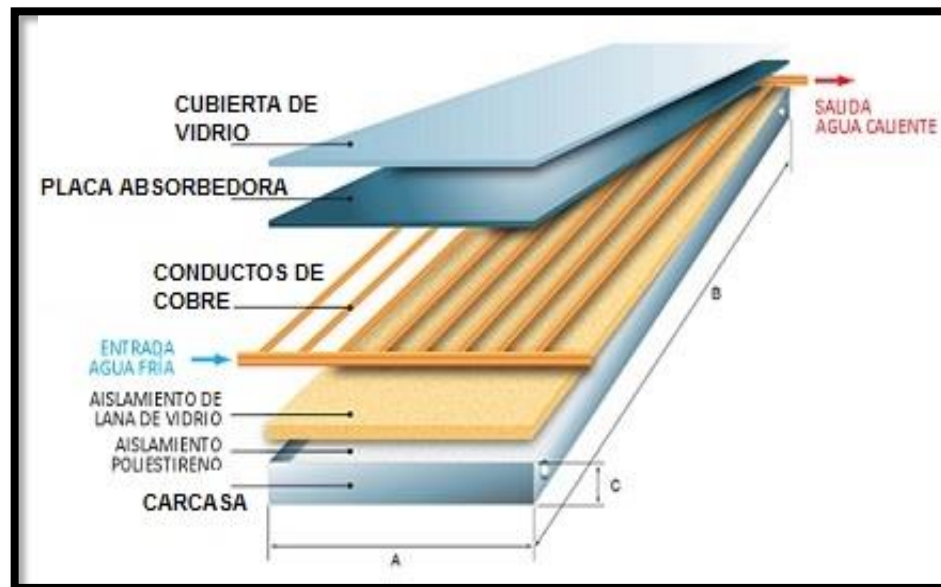
En los colectores de aire el fluido que refrigera la placa es directamente el aire que se quiere calentar. Esta tecnología tiene un rango amplio de aplicaciones y ofrece una buena capacidad de aprovechamiento energético, aunque la temperatura de la demanda por lo general es inferior a los 60 °C. Se utiliza para secado de productos agrícolas, en el calentamiento y acondicionamiento de aire para espacios habitados o invernaderos o incluso para el precalentamiento de aire para procesos de la industria textil o papelera. El aire circula a través del colector por convección natural o por circulación forzada por impulsadores (Del Amo y Martínez 2016).

Los inconvenientes derivan de las propiedades del aire, baja densidad, calor específico por unidad de volumen y conductividad térmica. De esta forma, la mayor dificultad radica en la transferencia de calor entre la placa y el fluido. El rendimiento de estos colectores depende en gran medida del caudal del aire circundante (Del Amo y Martínez 2016).

Los colectores solares de aire suelen utilizarse como apoyo en sistemas de calefacción; sin embargo, otro sector interesante para esta tecnología son los secadores de alimentos, pero requieren de producciones variadas para evitar la estacionalidad de su uso (Del Amo y Martínez 2016).

### 2.4.5.3. Componentes de un colector solar plano

Figura 3. Componentes de un colector solar plano



Fuente: Tomado de Rodríguez s.f.

#### 2.4.5.3.1. Cubierta exterior

Es el elemento transparente que cubre la placa absorbedora, generalmente de vidrio templado de bajo contenido en hierro para dotarle de resistencia y a la vez buena capacidad de aislamiento. El cristal de la cubierta debe comportarse como un elemento transparente a la radiación solar incidente (radiación de longitud de onda corta), y a la vez mostrarse opaca a la radiación de calor emitida por la placa absorbedora (radiación de onda larga), de manera que se favorezca la generación del efecto invernadero (Rodríguez s.f.).

#### 2.4.5.3.2. Placa absorbedora

Es el elemento que absorbe la radiación solar, para luego transmitir esta energía al fluido térmico que circula por su interior. Constituida por una lámina

metálica, normalmente de cobre o aluminio, bajo la que se dispone de un circuito de tuberías de cobre por donde circula el fluido térmico de trabajo.

A esta lámina metálica se le suele someter a un tratamiento con pinturas negras especiales, con objeto de mejorar su capacidad de absorción de radiaciones en longitud de onda corta (radiaciones solares) y disminuir la capacidad de emisión en longitudes de onda larga (para que no desprenda tanto calor), de manera que retenga el mayor calor posible.

Este calor absorbido por la placa absorbidora es transferida al lugar por donde circula el fluido térmico caloportador, el cual es un circuito de tubos de cobre adheridos en el caso del agua; o una zona libre, por donde circule el aire (Rodríguez s.f.).

#### **2.4.5.3.3. Tuberías**

Según De Witt e Incropera (1999) en un colector solar plano típico, la energía se colecta mediante un fluido de trabajo que se hace circular a través de tubos que están en buen contacto con la cara posterior de una placa de absorción. La configuración de estos tubos puede ser de distintas formas, según sea el caso.

La configuración de los tubos en parrilla es la más utilizada: se trata de una parrilla de tubos paralelos entre sí, conectados en ambos extremos a tubos de mayor diámetro que recogen todo el caudal. La gran ventaja de este sistema es la posibilidad de trabajar en régimen de circulación natural (Del Amo y Martínez 2016).

La configuración de tubos en serpentín: es algo más económica debido a su proceso de fabricación, sin embargo, esta configuración tiene mayores pérdidas de carga y por ello no se recomienda para trabajar en circulación natural (termosifón) (Del Amo y Martínez 2016).

En ambos casos, parrilla o serpentín, es posible encontrar en el mercado ambos. La existencia de las dos configuraciones se debe a un asunto constructivo.

#### **2.4.5.3.4. Aislamiento**

Para reducir las pérdidas de calor hacia el exterior, se coloca un material aislante en el fondo de la carcasa y por los laterales que son las partes opacas del captador por donde no se necesita que entre radiación solar. Los materiales más empleados como aislantes son las espumas de poliuretano y las resinas de melanina

Además de ofrecer un alto coeficiente de aislamiento, debe mantener inalterables sus propiedades y no degradarse por el calor. Recordar que el aislamiento situado en el fondo de un captador, bajo la placa absorbedor, puede alcanzar temperaturas similares a esta (del orden de los 150 °C), por lo que debe poder resistir sin descomponerse ni emitir gases que puedan ensuciar la parte interior de la cubierta de cristal (Rodríguez s.f.).

#### **2.4.5.3.5. Carcasa o caja envolvente**

Es el elemento contenedor de los demás componentes que constituyen el captador. Esta carcasa suele ser de aluminio anodizado, más ligero y resistente a los agentes atmosféricos, o de acero galvanizado. Normalmente

incluye un marco que le confiere mayor rigidez y posibilita su anclaje a la estructura portante para darle la inclinación y orientación debida al colector

(Rodríguez s.f.).

#### **2.4.5.4. Colocación y orientación del colector solar**

Los colectores de placa plana se suelen colocar en posición fija. De tal forma que reciban la máxima energía posible de acuerdo con la posición del Sol. Los colectores deben estar orientados hacia el sur si la localidad de instalación se ubica en el hemisferio norte; y su ángulo de inclinación puede variar de un lugar a otro en función de su latitud. La inclinación del colector ha de intentar enfrentarlo perpendicularmente a los rayos del Sol. La regla práctica para colocar el colector consiste en añadir  $15^\circ$  a la latitud de un lugar determinado. Se pueden montar los colectores sobre los tejados o sobre el suelo. Hay que montarlos cerca del resto del sistema y evitar las sombras lo más posible (Johnson y Whitman s.f.).

#### **2.4.5.5. Funcionamiento de un colector solar plano**

El funcionamiento de un colector solar plano se basa en el efecto invernadero. La radiación solar incide con longitud de onda corta (radiación visible) sobre toda la cubierta del captador. Parte de toda la onda es reflejada, entre un 4 y 6 %, el resto es absorbido ya que, al calentarse el absorbedor, este emite radiación de onda larga (radiación infrarroja; menos energética) y no puede salir al exterior debido a las propiedades ópticas de la cubierta, transformando así la radiación solar incidente en energía térmica. En la parte posterior y en los laterales se encuentra el aislamiento térmico que produce una reducción de las pérdidas de temperatura por conducción. También, y de manera similar,

la cubierta transparente, situada en la parte frontal, se encarga de reducir las pérdidas de temperatura por convección, pero, a pesar de ello, esta zona es por donde se producen más pérdidas de temperatura (Linares 2017).

#### **2.4.5.5.1. Efecto invernadero**

La radiación electromagnética al incidir sobre un cuerpo puede ser absorbida total o parcialmente, reflejada o puede atravesar el cuerpo (transparencia). Un cuerpo puede ser transparente a una determinada longitud de onda y a otra no; así el vidrio es transparente para longitudes de onda entre 0,3 y 3  $\mu\text{m}$  (radiación visible) mientras que para el resto de un cuerpo opaco (Cuervo y Méndez 2008).

Este hecho da lugar al fenómeno denominado efecto invernadero, que consiste en que la radiación solar atraviesa un vidrio e incide sobre la placa metálica del colector donde se absorbe. Después la placa emite radiación pero con una longitud de onda mayor, entre 4,5 y 4,7  $\mu\text{m}$  (radiación infrarroja), por lo que el vidrio se comporta como material opaco, consiguiéndose así que la radiación emitida por la placa no escape del captador (Cuervo y Méndez 2008).

#### **2.4.5.5.2. Estratificación térmica**

Se denomina estratificación térmica al lugar que ocupa una masa de fluido dentro de un espacio, dependiendo de las varianzas de densidades en su temperatura. Cuando un fluido es calentado se vuelve menos denso, por lo tanto más liviano; mientras que un fluido que posee una temperatura más baja tendera a ser más pesado. Dentro de los colectores solares térmicos, se

produce estratificación térmica de fluidos, este fenómeno es de vital importancia para el adecuado funcionamiento del mecanismo.

En los colectores diseñados para producción de ACS este fenómeno ocurre dentro del reservorio. La forma de los acumuladores suele ser cilíndrica y la superficie vertical, mayor que la horizontal; para favorecer la estratificación del fluido. La estratificación en el interior del acumulador se realiza por la variación de densidad del fluido debido a la temperatura. El agua, al calentarse se vuelve menos densa y asciende mediante movimientos colectivos; a su vez, cuando se enfría gana densidad y desciende al ser más pesada que el agua caliente que le rodea: Esta circulación favorece al intercambio energético en el seno del fluido, con el fin de suministrar agua caliente constante (Del Amo y Martínez 2016).

En los colectores diseñados para producción de aire caliente, el fenómeno de estratificación es el que permite el movimiento del aire desde la entrada del colector hasta la salida. El aire del ambiente natural entra al colector por el punto más bajo, pasa a través de él, se calienta y continúa su curso hasta el punto más alto o de salida. Este proceso ocurre debido a la propia densidad del aire, la cual crea una corriente de convección y obliga a la masa de aire caliente subir hasta encontrar la salida. Este fenómeno ocurre de forma natural en los colectores tradicionales, sin embargo, en los colectores con fuentes auxiliares, se provoca una convección forzada (Johnson y Whitman s.f., Castilla 2007).

## 2.5. Fluidos caloportadores (agua-aire)

Los fluidos son sustancias que tienen la propiedad de fluir, carecen de rigidez y elasticidad y en consecuencia son incapaces de resistir esfuerzos de corte, por pequeño que sea el esfuerzo. Pueden clasificarse en líquidos y gases (De Llano 1998).

Los colectores solares utilizan los fluidos como medios transportadores de calor, los cuales por convección y conducción arrastran el calor desde el punto de captación hasta donde será utilizado. En general los colectores solares calientan fluidos en forma monoica, sin embargo, existen dispositivos mixtos los cuales trabajan con varios fluidos (De Llano 1998, Maestre 2015).

Entre los fluidos más utilizados encontramos el agua y el aire; esto debido a su fácil adquisición. No obstante, muchas veces estos fluidos pueden ser empleados para trabajos similares, por lo cual es importante conocer sus marcadas diferencias.

El agua es el fluido utilizado por excelencia para la producción de ACS. Maestre (2015) afirma que este fluido presenta mayores ventajas en cuanto a su capacidad para transportar calor, ya que puede llevar hasta 5 veces más calor por unidad de masas que el aire (Su calor específico es de 1 cal/gr frente a la del aire que es de 0.24 cal/gr); pero además, la densidad del agua es también mayor que la del aire siendo de 1000 kg/ m<sup>3</sup> frente a los 1,225 kg /m<sup>3</sup> (valor para aire seco a nivel del mar a temperatura de 15 grados a presión atmosférica estándar); de modo que, considerando ambos aspectos, se necesitaría aproximadamente 3 400 veces más volumen de aire que de agua para transportar la misma cantidad de calor.

El aire es utilizado por excelencia en el campo de la climatización y el secado industrial. Este fluido a diferencia del agua es mucho más fácil de trabajar debido a que su obtención es inmediata y las instalaciones técnicas son menos complejas; además, presenta ciertas ventajas frente a las temperaturas que se puedan desarrollar: por un lado es inmune a la ebullición y por otro al congelamiento. Tampoco produce corrosión interna lo que hace innecesario el uso de dispositivos para evitar sus nocivos efectos (Maestre 2015).

## **2.6. Variables importantes**

### **2.6.1. Temperatura**

La temperatura (del latín *temperatura*, medida adecuada, temple, temperamento) es una magnitud física que nos indica cuantitativamente el nivel térmico de un cuerpo (caliente o frío). Cuando se toca un cuerpo con una temperatura menor se experimenta una sensación de frío, mientras si se toca un cuerpo con temperatura mayor se experimenta calor (Cortes y Garibay s.f., Peña 2007)

La temperatura de un cuerpo indica en qué dirección se desplazará el calor al poner en contacto dos cuerpos que se encuentran a temperaturas distintas. Cuando existe una diferencia de temperatura, el calor tiende a transferirse del sistema de mayor temperatura al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico (Cortes y Garibay s.f.)

Para medir la temperatura ha sido necesario elaborar escalas que usan puntos de referencia fijos, como el punto de congelación y el punto de ebullición del agua al nivel del mar. La escala de mayor uso, acorde con el Sistema

Internacional de medidas (SI), es la centígrada o Celsius, pero, todavía se continúan usando otras como el Fahrenheit y la Kelvin o absoluta; mientras que el instrumento utilizado para medir la temperatura es el termómetro (Brenes y Saborío 1995).

### **2.6.2. Humedad relativa**

Cuando se dice que el clima es seco o húmedo se hace referencia al vapor de agua contenido en el aire. La humedad relativa es la relación entre el contenido de vapor de agua del aire a cierta temperatura y la cantidad de vapor de agua que el aire puede retener a esa temperatura. Por ejemplo, a una humedad relativa del 50%, el aire está reteniendo la mitad del vapor de agua que podría retener a esa temperatura. Cuando la humedad relativa es 100%, el aire está saturado con vapor de agua. La humedad relativa del aire disminuye a medida que aumenta la temperatura, ya que el aire puede retener tanto más vapor de agua cuanto mayor sea su temperatura. A un nivel de 100% de humedad relativa, el vapor de agua se condensa para formar llovizna, niebla y nubes (Johnson y Whitman s.f., Gliessman 2002).

La humedad relativa es adimensional y se expresa comúnmente como porcentaje; su instrumento de medición se llama higrómetro (Allen *et al.* 2006).

### **2.6.3. Caudal**

Según Millán (1998) entendemos como caudal la cantidad de fluido que atraviesa una sección dada por unidad de tiempo. Esta cantidad de fluido podemos expresarla en dos formas, en masa o en volumen.

El caudal másico y el caudal volumétrico están relacionados a través de la densidad del fluido, que en el caso de los gases es variable con la presión y la temperatura. El caudal másico vendrá expresado en kg/s, mientras la unidad de caudal volumétrico en m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, se emplea L/min, o en m<sup>3</sup>/s, unidades que presentan dificultades si se pretende introducirlas en cálculos a causa del factor 60 de transformación de minutos a segundos (Millán 1998).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lista de materiales, herramientas, componentes auxiliares e instrumentación.

**CUADRO VI. MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.**

MATERIALES	CANTIDAD	CARACTERISTICAS
<b>PRINCIPALES</b>		
Fascia galvanizada	1	3.65 m de largo, 25.5 cm de ancho y 10 cm de grosor
Tabla de pino	1	3.65 m de largo, 30.5 cm de ancho y 2.54 cm de grosor
Lámina de zinc liso	2	1.20 m x 1 m, pintadas de color negro mate
Placa de vidrio	1	1.20 m x 0.98 m x 3 mm de espesor
Tramo de tubo de cobre	1	ASTM 1.27 cm de diámetro x 6.1 m de largo
<b>ACCESORIOS</b>		
Codos de cobre	13	1.27 cm de diámetro
taponos de cobre	9	1.27 cm de diámetro
Tornillos de acero inoxidable	55	44 tornillos de 4.8mm x 2.54cm y 9 tornillos de 4.8 mm x 3.81 cm
Remaches	16	1.9mm x 12.7mm
Grapas metálicas	15	1.27 cm de diámetro
<b>PINTURAS, DILUYENTES Y SELLADORES</b>		
Aislante térmico	1	Rollo de 0.10 m de ancho x 10 m de largo
Silicona	1	200 g, transparente, resistible a altas T°
Spray	1	Color negro mate
Barniz	1	0.95 L, poliuretano de uso en exteriores
Thinner	1	3.78 L, especial para poliuretano
Pintura	1	Color blanco mate, poliuretano, anticorrosiva

**CUADRO VII. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.**

HERRAMIENTAS	CANTIDAD	FUNCION
Broca de cobalto de 3,2mm	1	Crear orificios en el colector
Broca de cobalto de 4,8mm	1	Crear orificios en el colector
Centro punto	1	Crear un punto de referencia para tornillos y brocas
Cinta métrica	1	Tomar medidas
Cortatubo	1	Cortar tubos de cobre
Destornillador estrella	1	Ajustar y desajustar tornillos estrella
Disco para cortar madera	1	Cortar la tabla de pino
Disco para cortar metal	1	Cortar metales
Escuadra	1	Cuadrar la fascia
Esmeril	1	Cortar materiales metálicos y madera
Lija para metal y madera	1	Eliminar asperezas en las diferentes piezas
Lijadora	1	Limar asperezas en los extremos y quitar pintura.
Máquina de soldar	1	Soldar la tubería en forma de parrilla
Martillo de goma	1	Darle forma a la fascia.
Martillo de metal	1	Darle forma a la fascia.
Nivel	1	Determinar el paralelismo de los elementos de la fascia
Pinza de presión	2	Inmovilizar materiales para ser trabajados
Pistola de pintar	1	Pintar la carcasa del colector
Remachadora	1	Ajustar remaches en los extremos de la Fascia.
Soldador de estaño	1	soldar fugas en la tubería
Soldadura de bronce 3/16"	1	Soldar la tubería de cobre con los codos.
Taladro	1	Abrir huecos y ajustar tornillos
*Estampador de esquinas	1	Moldear la parte interna de la fascia.
Tiza	1	Marcar área de trabajo

\* El estampador de esquinas, fue creado durante el estudio.

**CUADRO VIII. COMPONENTES AUXILIARES DEL COLECTOR SOLAR.**

COMPONENTES AUXILIARES	CANTIDAD	CARACTERISTICAS		
		Potencia (W)	Voltaje (V)	Intensidad (A)
Panel Fotovoltaico	1	53	17.4	3.5
Bomba Recirculadora	1	2.76	12	0.23
Ventiladores	2	6	12	0.5

**CUADRO IX. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.**

INSTRUMENTOS	CANTIDAD	FUNCIÓN
Micro termohigrómetro	2	Medición de la humedad relativa (%) y temperatura ambiental (°C).
Termoanemómetro	1	Medición de la velocidad del aire (m/s).
Actinógrafo	1	Registrar las variaciones de los efectos actínicos de los rayos solares (W/m <sup>2</sup> ).
Termómetro de inmersión	3	Medición de la temperatura en medios líquidos (°C).

**3.2. Ubicación del área de estudio**

El estudio del rendimiento térmico del prototipo de colector solar bifluidos (CSPB) fue realizado en el futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSó) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Panamá, ubicada en el corregimiento de Chiriquí, Distrito de David, Provincia de Chiriquí. Se encuentra localizado entre los ocho grados, 23 minutos y 35.16 segundos Latitud Norte y 82 grados, 19 minutos, 52.45 segundos Longitud Oeste; con una altitud de 29 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo a la Clasificación de Zonas de Vida de Holdridge, el Corregimiento de Chiriquí corresponde al Bosque Húmedo Tropical Basal transición seca; con un clima Subecuatorial con Estación Seca, según el nuevo Sistema de Clasificación Climática de Panamá elaborado por A. Mackay en el 2000 (modificado De Martonne, 1974); una temperatura promedio de 27.1 grados Celsius, durante el periodo comprendido entre 1984 – 2012 según la estación meteorológica CEIACHI y una precipitación pluvial promedio de 2634.5 milímetros anuales,

durante el periodo comprendido entre 1984 – 2013 según la estación meteorológica CEIACHI (Caballero 2015, Google Earth 2017).



Coordenadas Geográficas  
8° 23' 35.16" y 8° 24' 29" Latitud Norte  
82° 19' 52.45" Longitud Oeste.

**Fuente:** Adaptado de Google Earth 2017.

**Figura 4.** Localización geográfica del área de estudio

### 3.3. Métodos seguidos

#### 3.3.1. Selección del diseño

El prototipo de colector solar plano bifluidos para la producción de agua caliente sanitaria (acs) y aire caliente (ac) fue diseñado bajo criterios descritos por los autores Arnaldo Bezerra, Silvio Rossi y Gonzalo Roa en diferentes obras.

### **3.3.2. Selección, compra y movilización de materiales**

Los materiales utilizados en la construcción del prototipo fueron seleccionados de acuerdo a cuatro parámetros: disponibilidad en el mercado local, bajos costos, calidad y fácil trabajabilidad. Estos materiales fueron cotizados y comparados en diferentes centros comerciales de David y Bugaba, posteriormente fueron adquiridos y movilizados hasta el taller del señor Roberto Guerra en Santa Fe, La Concepción, Bugaba.

### **3.3.3. Construcción e instalación del sistema**

Se construyó un prototipo de colector solar plano bifluidos de un metro cuadrado de área de captación efectiva, utilizando técnicas comunes y tecnologías de bajo y mediano costo. Además, se movilizó desde Bugaba hasta el futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSo), de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, en donde fue instalado. Posteriormente, se le complemento un sistema solar térmico y se procedió al levantamiento de datos. Los pasos realizados fueron los siguientes:

- Construcción del colector
  - Construcción del marco
  - Construcción e instalación de la cubierta aislante
  - Instalación de fondo retenedor de calor
  - Armado e instalación de la tubería
  - Instalación de la placa absorbadora de calor
  - Apertura de la zona de entrada y salida del aire
  - Construcción e instalación de los protectores contra lluvia
  - instalación de la cubierta transparente

- Localización del colector
- Construcción e instalación del sistema solar térmico (SST)
  - Construcción y establecimiento del tanque reservorio de agua
  - Armado e instalación del sistema de tubería
  - Armado e instalación del conjunto de componentes auxiliares eléctricos
  - Instalado de los termómetros de inmersión
  - Llenado del tanque reservorio
- Puesta en marcha del colector solar

#### **3.3.4. Levantamiento de datos**

El levantamiento de datos se realizó durante quince días, entre los meses de abril y mayo. Tomando una lectura cada quince minutos desde las 8:00 horas, hasta las 18:30 horas. Este proceso fue realizado bajo tres modos diferentes (A, B y C), los cuales constaron de cinco días cada uno.

La metodología A consistió en medir simultáneamente la producción de agua precalentada y la producción de aire precalentado. La metodología B consistió en medir únicamente la producción de agua precalentada y la metodología C en medir únicamente la producción de aire precalentado.

Se colocó un actinógrafo sobre una superficie plana para obtener datos de radiación solar incidente, en unidad de vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Mediante un micro termohigrómetro se registró la temperatura ( $^{\circ}C$ ) y la humedad relativa (%) del aire ambiente que ingreso al colector solar, utilizando otro micro termohigrómetro se registró la temperatura y humedad relativa del aire de escape producido por el colector (caliente); con un termoanemómetro

se registró caudal ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) del aire de escape. Mientras, que con dos termómetros de inmersión adaptados al tanque reservorio del colector, se midió la temperatura del agua de ingreso y la temperatura del agua en el punto medio del tanque. Además, con un tercer termómetro de inmersión se midió la temperatura del agua de red, directamente desde el grifo (ver anexos 50, 51, 53 y 54).

Los valores del caudal del agua de ingreso fueron estimados, de acuerdo a datos técnicos sobre la capacidad de trabajo de la bomba recirculadora.

### **3.3.5. Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico de los datos recolectado, se utilizó el programa informático Microsoft Excel, el cual permitió tabular, promediar, graficar y analizar los datos. Además, se utilizó el programa de Sistemas de Análisis Estadístico (SAS), con el cual se obtuvieron modelos de correlación lineal de Pearson y regresión lineal simple, entre los valores delta, de las variables medidas vs la radiación solar.

### **3.3.6. Parámetros evaluados**

- Radiación Solar (Vatios por metro cuadrado,  $\text{W}/\text{m}^2$ )
- Temperatura del agua de ingreso al reservorio (Grados Celsius,  $^{\circ}\text{C}$ )
- Temperatura del agua en el punto medio del tanque reservorio (Grados Celsius,  $^{\circ}\text{C}$ )
- Temperatura del agua de red (Grados Celsius,  $^{\circ}\text{C}$ )
- Caudal del agua de ingreso al reservorio (Metros cúbicos por minuto,  $\text{m}^3/\text{min}$ )
- Temperatura del aire de ingreso (Grados Celsius,  $^{\circ}\text{C}$ )

- Temperatura del aire de escape (Grados Celsius, °C)
- Humedad relativa del aire de ingreso (Porcentaje, %)
- Humedad relativa del aire de escape (Porcentaje, %)
- Caudal del aire de escape producido por el colector (Metros cúbicos por minuto, m<sup>3</sup>/min)

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Construcción e instalación del sistema**

#### **4.1.1. Construcción del colector solar**

##### **A. Construcción del marco.**

Para la construcción del marco se utilizó una fascia galvanizada de 3.65 metros de largo, 25.5 centímetros de ancho y 10 centímetros de grosor.

- a. Se inició limpiando todo el polvo de la fascia con ayuda de una brocha y un trapo (ver anexo 2).
- b. Con una cinta métrica se midió una distancia de 1.24 metros desde el extremo de la fascia y se marcó el límite, con tiza de soldador.
- c. Se colocó masking tape en el límite marcado. A lo interno y externo de la fascia.
- d. Con ayuda de una escuadra y bolígrafo se trazó una línea sobre el masking tape colocado en la fascia, para subrayar el límite (ver anexo 3).
- e. Se utilizó la escuadra para hacer una marca en las pestañas laterales de la fascia.
- f. Se realizó un rayado perpendicular en ambas esquinas del inicio de las pestañas, interceptando la línea transversal que marca la longitud de 1.24 metros.
- g. Utilizando un centro punto, se marcó las intersecciones en ambas líneas, para facilitar el doblado de la fascia (ver anexo 4).

h. Se colocó la fascia en forma oblicua para taladrar con una broca de 3.2 milímetros de diámetro las intersecciones marcadas con el centro punto (ver anexo 5).

i. Con un mazo, se golpeó un estampador de esquinas, que abarcaba totalmente la línea transversal de 1.24 metros, en el área interna de la fascia, para facilitar el doblado (ver anexo 6).

j. Utilizando un esmeril angular se cortó las líneas marcadas en las pestañas de la fascia hasta el orificio previamente perforado (ver anexo 7).

\*\*\* A partir la marca de 1.24 metros en la parte interna de la fascia, se hicieron tres marcas más. Con medidas de 1.00 metro, 1.24 metros y 1.00 metro. Dividiendo la fascia en cuatro secciones; a cada sección se le aplicó la misma metodología. Al tener todas las secciones listas, se utilizó un esmeril angular para cortar la fascia sobrante (ver anexo 8).

k. Con ayuda de una lima para metal se desbastó el borde filoso dejado por el esmeril angular, así como los bordes de las perforaciones para evitar posibles accidentes y facilitar previamente el doblado (ver anexo 9).

l. Se modificó la posición de las pestañas (abiertas/cerradas) para poder que una sección encajara con la otra.

m. Se procedió a realizar el doblado de la fascia, hasta lograr una figura rectangular (ver anexo 10).

n. Se desdobló la fascia hasta una posición casi recta, para ser limpiada y posteriormente movida a la zona de pintado.

o. Utilizando una pistola de pintar a presión se aplicó pintura de poliuretano blanca mate sobre la parte externa de la fascia y se dejó secar al sol durante 30 minutos (ver anexo 11).

p. Se dobló nuevamente la fascia hasta llevar cada sección a un ángulo de 90 grados a escuadra y con una pinza de presión se sostuvo momentáneamente.

q. Se realizaron cuatro perforaciones en cada doblez del marco, dos en cada pestaña; utilizándose el taladro con una broca de 4,8 milímetros.

r. Para finalizar la construcción del marco, con una remachadora se instalaron remaches de ala corta de 4,8 milímetros de diámetro en tres vértices, dejando un vértice abierto para poder insertar dentro del marco, el material aislante. Se soltó la pinza de presión y se limpió nuevamente la fascia (ver anexos 12 y 13).

## **B. Construcción e instalación de la cubierta aislante.**

El material utilizado para la construcción de la cubierta aislante fue una tabla de pino tratado de 3.65 metros de largo, 30.5 centímetros de ancho y 2.54 centímetros de grosor.

a. Se aplicó cinta asfáltica en toda la parte interna del marco (ver anexo 14).

b. Se retiró toda la suciedad de la tabla de pino con una toalla limpia y seca (ver anexo 15).

c. Utilizando una lija para madera, se pulió toda la superficie, bordes y esquinas de la tabla, para remover las imperfecciones y obtener un acabado liso.

d. Con ayuda de una cinta métrica y bolígrafo, se midieron y marcaron cuatro secciones sobre la tabla. Cada sección de 1.22 metros de largo.

e. Utilizando la pistola de pintar a presión, se aplicó barniz de poliuretano para exteriores a toda la tabla y se dejó secar durante 30 minutos (ver anexo 16).

f. Se procedió a cortar con el disco para madera, las cuatro secciones marcadas en la tabla. Una de las secciones fue cortada longitudinalmente por la mitad, debido a que las cuatro juntas sobrepasaban el ancho del área interna del colector (ver anexo 17).

g. Con la lija para madera, se lijaron los bordes de las piezas de madera que fueron cortados.

h. Con el disco para madera se realizaron cuatro hendiduras en las esquinas de dos piezas de madera; dos hendiduras en cada pieza. Colocando las piezas verticalmente, una al lado de otra, se hicieron las hendiduras. Dos del lado derecho de una pieza y dos del lado izquierdo de otra pieza; esto para que, al introducir las piezas de madera dentro del marco, las mismas ajustaran sobre los remaches instalados en los vértices del marco.

i. Con una brocha se aplicó barniz poliuretano para exteriores, sobre los bordes de las piezas cortadas y sobre las hendiduras hechas. Se dejó secar durante 20 minutos.

j. Se le colocaron remaches al último vértice del marco. Terminando así de cerrar el marco protector.

k. Se colocaron las piezas de madera dentro del marco, ubicando las piezas con las hendiduras hacia sus respectivas esquinas. Se trató de distribuir lo más uniforme posible las piezas de madera (ver anexo 18).

l. Utilizando un taladro con broca de 4.8 milímetros se perforaron orificios a un centímetro del borde de la pestaña del marco, donde irían los tornillos que fijaran las piezas de madera al fondo del marco.

m. Utilizando un taladro con broca de 3.2 milímetros se perforaron orificios en la madera en donde irían los tornillos, para facilitar el atornillado de los mismos.

n. Se atornillaron veinticuatro tornillos de 4.8mm x 2.54cm de acero inoxidable en el perímetro del marco. Colocando ocho tornillos en el lateral izquierdo y ocho tornillos en el lateral derecho (dos tornillos por cada pieza de madera). Cuatro tornillos en la parte superior y cuatro en la parte inferior del marco (cuatro tornillos por cada pieza de madera) (ver anexos 19 y 20).

o. Se selló con silicona todas las aberturas entre las maderas, así como la zona interna del colector, para eliminar cualquier tipo de fuga existente.

### **C. Instalación de fondo retenedor de calor.**

El material utilizado como fondo retenedor de calor fueron dos láminas de zinc liso, sobrepuestas en una sola de 1.20 metros de largo y 1 metro de ancho. Debido a que no se contaba con una lámina más grande.

a. Se limpiaron las láminas de zinc con un trapo húmedo y se dejaron secar al sol.

b. Se marcó una sección rectangular que, al sobreponer una lámina sobre la otra, daba 1.22 metros de largo y 1 metro de ancho.

c. Se cortó la sección rectangular con un esmeril angular, por la línea trazada (ver anexo 21).

d. Con la parte interna del esmeril, se desbaste el borde de la sección cortada y se pasó posteriormente una lija de metal para eliminar las asperezas filosas y evitar accidentes.

e. Se procedió a instalar ambas láminas de zinc, sobre la cubierta de madera del colector. Con ayuda de un martillo de goma, se ajustaron las láminas; golpeando levemente hasta cubrir toda el área interna del colector.

f. Utilizando un taladro con broca 3,2 milímetros se perforaron un total de siete orificios; en donde irían los tornillos. Se perforaron cuatro orificios a 20 centímetros desde cada vértice de la lámina instalada hacia el centro del colector en forma diagonal y tres orificios en el centro de la lámina; uno arriba, uno abajo y uno en el medio (ver anexo 22).

g. Se atornillaron siete tornillos 4.8mm x 2.54cm de acero inoxidable en los orificios previamente abiertos, hasta adaptar firmemente la lámina al fondo del colector (ver anexo 23).

#### **D. Armado e instalación de la tubería.**

El material utilizado en la construcción de la tubería fue un tramo y medio de tubo de cobre de 1.27 centímetros de diámetro y 6.1 metros de largo.

a. Se limpió la tubería interna y externamente con agua, para eliminar la suciedad y cualquier estorbo del interior.

b. Utilizando cinta métrica y tiza de constructor, se midieron y marcaron sobre el tubo, una sección de 116.7 centímetros de longitud, seis secciones de 96.7 centímetros m de longitud, una sección de 20 centímetros de longitud y diez secciones de 10.7 centímetros de longitud.

c. Con ayuda de un cortatubo, se cortaron las diferentes secciones marcadas (ver anexos 24 y 25).

d. Con una lija de metal, se desbastaron suavemente los bordes de las secciones previamente cortadas, así como los bordes de trece codos de cobre de 1.27 centímetros de diámetro para poner a ajustar con mayor facilidad cada sección.

e. Se limpió con un trapo, las secciones de tubo de cobre y los codos de cobre.

f. Se procedió a hacer el armado de la tubería. Se inició ajustando cada uno de los lados de las secciones de tubería de 10.7 centímetros a un codo de cobre. Posteriormente, se ajustó una sección de tubería de 96.7 centímetros en cada uno de los espacios vacíos de los codos pegados a las secciones más pequeñas, siguiendo una secuencia en forma de parrilla. Finalmente, se ajustó la sección de tubería de 116.7 centímetros en el codo de cobre sobrante ubicado en el extremo, y se colocó un último codo de cobre en el otro extremo, al cual se le embono la sección de tubería de 20 centímetros.

g. Se procedió a soldar con soldadura de bronce, cada una de las secciones armadas; soldando en total veintiséis puntos del circuito (ver anexo 26).

\*\*\* Una vez confeccionada la tubería de cobre, se le realizaron dos pruebas de fugas. La primera prueba consistió en sumergir la tubería de cobre en un tanque con agua; el observar burbujas provenientes del circuito, indicaba fuga. La segunda prueba consistió en colocar un poco de agua dentro de la tubería de cobre, taparla y pasar aire a presión desde un compresor al circuito; el observar salidas de agua en el circuito, indicaba fuga (ver anexo 27).

\*\*\* Las fugas encontradas en el circuito, fueron soldadas hasta sellarlas completamente.

h. Se sobrepuso la tubería de cobre encima del colector; utilizando un vidrio transparente como soporte, para marcar las medidas y ajustar el distanciamiento dentro del colector; debido a que la tubería no cabía en la parte interna del colector.

i. Utilizando una cinta métrica y marcador, se realizó un marco de 17 centímetros sobre el vidrio transparente, desde el borde interno del colector hasta la los ramales de la tubería.

j. Se marcó dentro del colector, los espacios por donde debían salir los extremos de la tubería. El extremo de la tubería con la sección de 20 centímetros de longitud, indicaba el área de entrada del agua al colector. Mientras que, el extremo de la tubería con la sección de 116.7 centímetros de longitud, indicaba el área de salida del agua desde el colector. Las marcas fueron realizadas en la parte interna del marco del colector.

k. Con ayuda de un centropunto y un martillo, se golpeó las dos áreas previamente marcadas, para posteriormente ser taladradas. El golpe con el centropunto se realizó para evitar que la broca del taladro resbalara.

l. Utilizando el taladro, se abrieron los espacios marcados. Se utilizaron brocas de diferente tamaño hasta abrir completamente los espacios.

m. Con una lija de metal, se desbaste los bordes de ambos espacios abiertos.

n. Se procedió a colocar la tubería dentro del colector, pasando los extremos a través de los espacios abiertos y tratando de encajar los ramales al marco hecho sobre el vidrio (ver anexo 28).

o. Se engrapo la tubería al fondo del colector, utilizando quince grapas metálicas de 1.27 centímetros de diámetro. Las grapas metálicas fueron distribuidas sobre todo el circuito de la tubería y ajustadas con tornillos de 4.8mm x 2.54cm de acero inoxidable. Durante el engrapado, se golpeó primero con un centro punto, luego se taladro con una broca de 3.2 milímetros y finalmente se atornillo (ver anexos 29 y 30).

p. Se colocó cinta asfáltica a los tramos de tubería que salían del colector, para sellar los espacios y evitar fugas de calor.

\*\*\* Después de realizar el instalado, se procedió a pintar con spray de color negro mate toda la tubería y el fondo de lámina de zinc liso, para evitar perdida de calor (ver anexo 31).

#### **E. Instalación de la placa absorbadora de calor.**

El material utilizado como placa absorbadora de calor fue una lámina de zinc liso, de 1.20 metros de largo y 1 metro de ancho.

a. En una lámina de zinc liso, con ayuda de una cinta métrica y una tiza para trazar metal, se midió y marcó una sección rectangular de 1.20 metros de largo y 1 metro de ancho.

b. Se cortó la sección rectangular con un esmeril angular, por la línea trazada.

c. Con la parte interna del esmeril, se desbaste el borde de la sección cortada y se pasó posteriormente una lija de metal para eliminar las asperezas filosas y evitar accidentes.

d. Se limpió la lámina de zinc con un trapo húmedo y se dejó secar al sol.

e. Utilizando un spray de color negro mate se pintó la lámina por un lado y se dejó secar al sol durante 25 minutos.

\*\*\* Debido a que se necesitaba adaptar con uniformidad la lámina de zinc liso al fondo del colector, pero en medio se encontraba la tubería, se optó por utilizar nueve tapones de cobre de 1.27 centímetros de diámetro como soporte entre la lámina y el fondo del colector (ver anexo 32).

f. Se distribuyeron los tapones de cobre en el fondo del colector, entre medio de la tubería instalada, para medir donde debería ir cada uno.

g. Se calco el borde de los tapones en la lámina de zinc liso del fondo del colector, mediante una tiza de soldador.

h. Utilizando una cinta métrica, se tomaron las medidas de la distribución de los tapones sobre el fondo del colector y con un marcador se anotaron sobre la parte no pintada de la lámina de zinc liso no adaptada, donde posteriormente se ajustarían los tapones de cobre.

i. Con un martillo y un centropunto, se golpeó la lámina de fondo del colector, en las marcas donde estaban distribuidos los tapones de cobre. Se trató de golpear en todo el centro de las marcas, para indicar una guía donde taladrar.

j. Con ayuda de un taladro con broca de 3.2 milímetros se perforaron las marcas hechas en la lámina de fondo del colector hasta llegar a la madera. Se perforaron las marcas hechas en la lámina no adaptada, y se perforo el centro de cada tapón de cobre.

k. Se unieron los tapones de cobre a la lámina de zinc liso no adaptada, insertando tornillos de 4.8 mm x 3.81 cm de acero inoxidable, en las perforaciones previamente hechas y se atornillo hasta que los codos de cobre quedaran firmes (ver anexo 33).

l. Se procedió a instalar la lámina de zinc liso, dentro del colector. Para este procedimiento se utilizó un martillo de goma y una pata de cabra. Se inició introduciendo dos extremos de la lámina y bajándola con pequeños golpes con el martillo de goma. Utilizando la pata de cabra, se metió a la fuerza los dos extremos faltantes. Una vez insertada la lámina de zinc liso, se volvió a golpear con el martillo de goma hasta bajarla, y ajustar los tapones de cobre uniformemente al fondo del colector (ver anexos 34 y 35).

m. luego se procedió a adaptar la lámina de zinc liso al fondo del colector, utilizando un destornillador estrella, se ajustaron los tornillos; hasta dejar firme todo el complemento (ver anexo 36).

n. Después de realizar el instalado, se procedió a cubrir con cinta asfáltica todo el borde de la lámina captadora (ver nexa 37).

\*\*\* Durante la instalación de la cubierta aislante, la tubería y la placa absorbadora de calor, existieron casos en los cuales las puntas de algunos tornillos sobresalían de la madera. Por lo cual, una vez instalada la placa

absorbedora de calor, se procedió a cortar con una lijadora, la puntas sobresalientes y a cubrir con silicona transparente esas partes.

#### **F. Apertura de la zona de entrada y salida del aire.**

Esta operación se realizó en la parte angosta del marco del colector, utilizando el espacio dejado entre la lámina captadora y el borde interno superior del marco

- a. Con una cinta métrica, un lápiz y una regla de metal, se midió y subrayó en el marco del colector, los orificios de entrada y salida del aire. Para la entrada del aire, se marcaron dos rectángulos de 38 centímetros de largo y 7.5 centímetros de ancho, con una separación de 5 centímetros. Mientras, que, para la salida del aire, se marcó un rectángulo de 60 centímetros largo y 7.5 centímetros de ancho (ver anexo 38).
- b. Utilizando un piloto, se remarcaron los orificios, para no perder la línea guía durante el corte (ver anexo 39).
- c. Con ayuda de un esmeril angular, se procedió a cortar las áreas previamente trazadas en el marco (ver anexo 40).
- d. Con un martillo se golpeó en el área cortada, para retirar el material sobrante.
- e. Utilizando el área interna del esmeril, se desbastaron los bordes para eliminar las asperezas filosas dejadas. Se utilizó una lija de metal, para terminar de pulir el área cortada.
- f. Se limpió toda el área trabajada, utilizando una escobilla y se cubrió con cinta asfáltica, el borde del área abierta.

## **G. Construcción e instalación de los protectores contra lluvia.**

El material utilizado en la construcción de los protectores contra lluvia; fue dos retazos de lámina zinc liso. A los cuales se les llamo viseras.

a. Con una cinta métrica, una tiza de soldador y una regla metálica, se midió y marcó sobre una lámina de zinc liso: un rectángulo de 92 centímetros de largo y 8 centímetros de ancho, para cubrir el orificio de entrada, y un rectángulo de 80 centímetros de largo y 8 centímetros de ancho, para cubrir el orificio de salida. Así, como cuatro triángulos para cubrir las esquinas.

b. Con ayuda de un esmeril angular, se cortaron los rectángulos y triángulos marcados.

c. Utilizando la parte interna del esmeril angular, se desbaste los bordes filosos de los rectángulos y triángulos de zinc liso cortados, para evitar accidentes.

Debido a que se necesitaba ajustar los rectángulos de lámina de zinc liso al colector, se utilizaron cuadros de platina (riel) para cielorraso como soporte.

d. Con una regla y bolígrafo, se midieron y marcaron sobre una platina para cielorraso, diez cuadros, de 2.5 centímetros de largo y 2.5 centímetros de ancho, con pestañas de 1.5 centímetros de alto.

e. Utilizando una tijera para metal, se cortaron los cuadros previamente marcados.

f. Mediante un taladro con broca de 3.2 milímetros, se perforo el centro de los cuadros de platina para cielorraso, mientras que con broca con una de 4.8 milímetros se perforaron sus pestañas (ver anexo 41).

g. Se procedió a unir los cuadros de platina para cielorraso, a los rectángulos de lámina de zinc liso, mediante remaches de ala corta de 4.8 milímetros. Se adaptaron cinco cuadros a la visera de entrada y cinco cuadros a la visera de salida (ver anexos 42 y 43).

h. Utilizando tornillos de 4.8mm x 2.54cm de acero inoxidable, se adaptaron los protectores de lluvia al marco del colector; atornillando hasta dejar firmes.

i. Se colocaron los triángulos de zinc liso cortados en el extremo de cada rectángulo y se cubrió con cinta asfáltica todo el conjunto. De tal modo, que se formara una visera protectora contra la lluvia (ver anexo 44).

\*\*\* En todos los pasos realizados en la construcción del prototipo se utilizó equipo de protección personal y se siguieron normas de seguridad.

#### **H. instalación de la cubierta transparente.**

El material utilizado como cubierta transparente fue una pieza de vidrio de 1.21 metros de largo, 1 metro de ancho y 3 milímetros de grosor.

a. Utilizando una lijadora, se retiró parte de la pintura blanca mate del borde superior de marco, para ajustar mejor el vidrio. Se utilizó una regla de metal como barrera, forzada con pinzas de presión, para evitar lijar más de lo debido.

b. Se colocó cinta asfáltica sobre la parte del área lijada, para evitar entrada de agua por lo extremos del vidrio, cuando lloviera.

\*\*\* **El pasó a y b, se realizaron durante la puesta de la cubierta aislante del fondo del colector. Sin embargo, se recomienda ser realizados previamente al instalado del vidrio.**

- c. Con un paño limpiador, se eliminó la suciedad en ambos lados del vidrio.
- d. Se presentó el vidrio sobre el marco para verificar, ajustarlo y marcar en sus bordes la posición centrada, previo a la instalación.
- e. Se colocó un cordón de adhesivo de poliuretano para parabrisas, sobre el borde superior del marco (ver anexo 45).
- f. Se procedió a instalar el vidrio a cuatro manos, sobre el marco en la posición previamente marcada (ver anexo 46).
- g. Se ejerció un poco de presión sobre el vidrio para mejorar la adherencia y evitar espacios huecos entre el vidrio y el marco.
- h. Finalmente, se dejó secar durante 24 horas (ver anexo 47).

#### **4.1.2. Localización del colector**

Se transportó el colector solar desde el Taller Guerra en Bugaba, hasta el futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSó), en el corregimiento de Chiriquí. Donde se construyó una plataforma de piedra picada para instalar el colector solar, luego se colocó sobre un pallet y se orientó en el sentido Norte-Sur, con un ángulo de inclinación de 15 grados; para un mejor aprovechamiento de la radiación solar.

#### **4.1.3. Construcción e instalación del sistema solar térmico (SST)**

Debido a las condiciones físicas del prototipo de colector solar construido, fue necesaria la fabricación e instalación de un SST que permitiera realizar las mediciones pertinentes, para el análisis del comportamiento térmico del colector. Para su construcción e instalación se siguieron los siguientes pasos:

### **A. Construcción y establecimiento del tanque reservorio de agua.**

Para la construcción del reservorio de agua, se utilizó un tanque metálico cilíndrico con capacidad de 200 litros, el cual fue modificado mediante soldadura.

b. Mediante soldadura, se le adaptaron tres roscas de 1.91 centímetros de diámetro al tanque metálico. La primera rosca, en la parte media central de una base, la segunda rosca en la parte alta central de la base contraria y la tercera rosca en una superficie lateral. Dejando el tanque con cuatro entradas enroscables (una natural, tres soldadas)

b. Utilizando un esmeril angular, se abrió una ventana al tanque metálico, sobre la superficie lateral contraria a la tercera rosca soldada.

c. Se lavó el tanque por dentro, con agua a presión y jabón granulado.

d. Se cubrió con cinta asfáltica, toda la parte externa del tanque metálico. Se cubrió la ventana abierta; de tal manera que se pudiera quitar para observar el nivel del agua y poner nuevamente para no dejar escapar calor.

e. Se enroscó un niple niquelado de 1.95 centímetros de diámetro con teflón, en la entrada natural del tanque, hasta dejar un lado dentro del tanque.

f. Se introdujo una boya en el tanque reservorio y se adaptó al niple enroscado; mediante una sección de tubería PVC de 2.54 centímetros de diámetro con adaptaciones en ambos lados. La función de la boya era controlar el volumen de agua dentro del reservorio.

g. Se construyó un soporte de metal, mediante soldadura. Para colocar el tanque reservorio en forma vertical.

h. Utilizando llantas recicladas y un pallet, se armó un soporte improvisado, para dar mayor altura al tanque reservorio.

i. Se colocó el soporte de metal arriba del pallet y luego el tanque reservorio en forma vertical; de tal forma, que quedara la ventana hacia arriba y la tercera rosca soldada hacia abajo (rosca de la superficie lateral).

### **B. Armado e instalación del sistema de tubería.**

El material utilizado en el armado de la tubería; fue un tramo de tubo CPVC de 2.54 centímetros de diámetro (10 metros de largo) y medio tramo de tubo CPVC de 1.90 centímetros de diámetro (5 metros de largo). No se utilizó todo el tramo de tubería, sin embargo, se compró así, debido a que fue la medida mínima encontrada en el mercado.

a. Con una cinta métrica, se midió la distancia desde la entrada de la tubería del colector, hasta la rosca soldada en la superficie lateral del tanque reservorio y la distancia desde la salida de la tubería del colector hasta la segunda rosca soldada (rosca en la parte alta central de la base). Posteriormente se midió dos secciones de tubería CPVC de 0.5 pulgadas de diámetro, del mismo largo que las dos medidas previamente realizadas.

b. Se cortaron las dos secciones de tubería medidas.

c. Se colocaron adaptaciones para tubería CPVC de 1.27 centímetros de diámetro, en la entrada y salida de la tubería de cobre, del colector solar.

d. Se enroscó una adaptación CPVC de 1.90 centímetros de diámetro con teflón, a la rosca soldada de la superficie lateral del tanque, luego se le adaptó una T CPVC del mismo diámetro y una reducción a 1.27 centímetros de diámetro en un lado de la T, para poder instalar el tramo de tubería CPVC correspondiente.

e. Se adaptó una pequeña sección de tubería CPVC de 1.90 centímetros de diámetro, en el lado de la T sin reducción, luego una adaptación del mismo diámetro con rosca y finalmente un grifo; el cual serviría para vaciar el tanque reservorio.

f. Se procedió a instalar las dos secciones de tubería CPVC de 1.27 centímetros de diámetro, anticipadamente cortadas. Una sección fue instalada en la T CPVC y la otra sección en la salida de la tubería de cobre del colector.

\*\*\* Para el adaptado de todos los componentes CPVC que no eran enroscables, se utilizó pegamento para CPVC.

### **C. Armado e instalación del conjunto de componentes auxiliares eléctricos.**

Los componentes auxiliares utilizados fueron dos ventiladores, una bomba recirculadora y un panel fotovoltaico (ver anexos 54, 55, 56 y 57).

a. Se soldó una adaptación eléctrica hembra/macho, a los dos ventiladores y a la bomba recirculadora, mediante un punto de estaño (esto fue realizado en una electrónica). Esto se hizo, para poder desconectar con facilidad los ventiladores y la bomba.

b. Se cubrió con tape negro, los cables de la adaptación. Dejando solamente los terminales positivos/negativos al desnudo, para posteriormente ser conectados.

c. Utilizando una regleta de empalmes, se unieron todos los terminales positivos en un puerto y los negativos en otro puerto.

d. Se adaptó un cable eléctrico bastante largo, a la regleta de empalmes; colocando el terminal positivo en el puerto anexo a los terminales positivos ya unidos y el terminal negativo en el puerto anexo a los terminales negativos ya unidos.

e. Se adaptó el otro extremo del cable al panel fotovoltaico, uniendo el terminal positivo en un puerto y el negativo en otro puerto. Para así poder transmitir la energía eléctrica, desde el panel fotovoltaico a los componentes auxiliares.

\*\*\*Una vez unido el conjunto, se colocó al sol y se realizó una prueba para observar si funcionaba. Posteriormente, se desconectaron los ventiladores y la bomba recirculadora, para proceder al instalado.

f. Utilizando dos adaptadores enroscables CPVC de 1.27 centímetros de diámetro, se procedió a instalar la bomba recirculadora en el sistema de tuberías. Se unió un adaptador con la entrada de la tubería de cobre y el otro adaptador con la sección de tubería CPVC de 1.27 centímetros de diámetro conectada al tanque reservorio.

g. Se colocó dos rectángulos de hielo seco, en cada una de las entradas de aire del colector solar; dejando solamente un espacio central con las

dimensiones necesarias para poder colocar los ventiladores, y utilizando cinta se cubrió las esquinas para evitar pérdida de calor.

h. Utilizando tape doble contacto, se procedió a instalar los ventiladores. Se colocó un ventilador en cada entrada, pegándolo arriba y abajo con el adhesivo. Se instalaron de esta forma, para poder quitarlos cuando lloviera o al momento de ser guardados.

#### **D. Instalado de los termómetros de inmersión.**

Se utilizaron dos termómetros de inmersión, en el armado del SST.

a. Se hizo una marca en el centro de un tapón CPVC de 1.90 centímetros de diámetro y en el centro de un tapón CPVC de 1.27 centímetros de diámetro

b. Utilizando un taladro, se perforo el centro de los tapones, para introducir los termómetros.

c. Utilizando una lija, se desbaste el interior de ambos tapones, para una mejor adhesión de la silicona.

d. Se unió el tapón CPVC de 1.90 centímetros de diámetro a un adaptador CPVC del mismo diámetro, mientras que el tapón CPVC de 1.27 centímetros de diámetro se unió a una T CPVC del mismo diámetro.

d. Se introdujeron los termómetros dentro de los conjuntos, y con silicona de alta temperatura se rellenó la parte interna de ambos; se compactó lo más posible la silicona y se dejó secar durante 24 horas. Esta silicona fue aplicada para no dejar escapar agua caliente

e. Se procedió a instalar los termómetros. El termómetro dentro del conjunto CPVC de 1.90 centímetros de diámetro, se adaptó en la rosca ubicada en el centro de la base del tanque reservorio. Mientras que el termómetro dentro del conjunto CPVC de 1.27 centímetros de diámetro fue adaptado en la rosca soldada en la parte superior de la base contraria.

\*\*\*Aunque los termómetros de inmersión formaban parte de los instrumentos de medición, el lugar donde fueron instalados afectó el armado del SST.

\*\*\*Una vez instalados los termómetros, se procedió a adaptar la sección de tubería CPVC de 1.27 centímetros de diámetro ubicada en la salida del colector, a la T CPVC de 1.27 centímetros de diámetro donde se encontraba el termómetro. Terminando así, de unir por completo el sistema de tuberías.

\*\*\*Finalmente, se procedió a cubrir todo el sistema de tuberías con aislante para tuberías y con cinta asfáltica. Para evitar al mínimo la pérdida de calor.

## **E. Llenado del tanque reservorio**

Utilizando un conjunto de adaptaciones y reducciones CPVC y PVC, se unió una manguera al niple galvanizado del tanque colector, llenándolo hasta el punto de que la boya permitiera.

### **4.1.4. Puesta en marcha del colector solar**

Se colocó el panel fotovoltaico en el mismo ángulo que el colector solar térmico, se conectaron los componentes auxiliares y se procedió a iniciar el levantamiento de datos (ver anexos 48 y 49).

#### 4.2. Levantamiento de datos

El rendimiento del colector solar plano bifluidos (CSPB) se evaluó durante 15 días, en función de la radiación solar recibida en el plano horizontal.

El periodo diario establecido para la toma de datos fue desde las 8:00 horas hasta las 19:00 horas. Sin embargo, solo se recolectaron datos hasta las 18:30 horas (ver anexos 58, 59, 60 y 61).

Se realizó la toma de datos bajo tres modos diferentes, las cuales se pasan a llamar modo A, modo B y modo C; tal como se describe en el siguiente cuadro (cuadro X).

**CUADRO X. MODOS EMPLEADOS EN LA MEDICIÓN DE DATOS.**

Modo	Objeto de medición	Variables registradas	Condiciones operativas de medición	Datos por parámetro
<b>Modo A</b>	Agua	Trw, Tiw, Tmw, Qiw	Se conecta ventiladores y bomba de agua.	Doscientos seis
	Aire	Tia, Tea, Hria, Hrea, Qea		Doscientos seis
<b>Modo B</b>	Agua	Tiw, Tmw, Qew	Se conecta bomba de agua, se desconecta ventiladores y salidas de aire selladas.	Ciento noventa y uno
<b>Modo C</b>	Aire	Tia, Tea, Hria, Hrea, Qea	Bomba de agua desconectada, ventiladores activados y ventilas abiertas.	Ciento setenta y seis

Radiación solar (Rs), Temperatura del agua de red (Trw), Temperatura del agua de ingreso (Tiw), Temperatura del agua en el punto medio (Tmw), Caudal del agua de ingreso (Qiw), Temperatura del aire de ingreso (Tia), Temperatura del aire de escape (Tea), Humedad relativa del aire de ingreso (Hria), Humedad relativa del aire de escape (Hrea), Caudal del aire de escape (Qea).

Cada modo fue ejecutado durante cinco días de forma intercalada y cíclica, como se muestra a continuación (Fig. 5).

DIA	MODO	FECHA
DIA 1	AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO	24 DE ABRIL
DIA 2	AGUA PRECALENTADA	25 DE ABRIL
DIA 3	AIRE PRECALENTADO	26 DE ABRIL
DIA 4	AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO	27 DE ABRIL
DIA 5	AGUA PRECALENTADA	28 DE ABRIL
DIA 6	AIRE PRECALENTADO	01 DE MAYO
DIA 7	AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO	03 DE MAYO
DIA 8	AGUA PRECALENTADA	04 DE MAYO
DIA 9	AIRE PRECALENTADO	05 DE MAYO
DIA 10	AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO	08 DE MAYO
DIA 11	AGUA PRECALENTADA	09 DE MAYO
DIA 12	AIRE PRECALENTADO	10 DE MAYO
DIA 13	AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO	17 DE MAYO
DIA 14	AGUA PRECALENTADA	18 DE MAYO
DIA 15	AIRE PRECALENTADO	20 DE MAYO

**Figura 5.** Cronograma de medición

La dinámica de presentación de los resultados se pasa a mostrar en la siguiente figura (fig. 6).

MODO	CONTENIDO
A	AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO
B	AGUA PRECALENTADA
C	AIRE PRECALENTADO

**Figura 6.** Dinámica de presentación de los resultados

**A continuación, se presentan los resultados del modo A; agua precalentada y aire precalentado.**

## MODO A. AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO

CUADRO XI. PROMEDIOS DIARIOS DE AGUA PRECALENTADA Y AIRE PRECALENTADO OBTENIDOS BAJO EL MODO A.

DIA	AGUA				AIRE					RADIACIÓN SOLAR (W/m <sup>2</sup> )
	Temperatura (°C)			Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Caudal (m <sup>3</sup> /min)	
	Trw	Tiw	Tmw		Qiw	Tia	Tea	Hria		
1	29.84	34.58	35.27	0.0057	34.27	46.55	60.77	31.63	0.71	588.21
4	29.48	34.35	33.76	0.0057	33.50	46.17	64.79	30.14	0.78	624.02
7	28.61	32.07	31.58	0.0057	31.42	43.91	72.80	38.37	0.75	563.29
10	27.74	30.50	30.55	0.0057	29.74	38.37	82.12	52.90	0.68	359.22
13	28.32	32.03	31.80	0.0057	30.83	40.70	76.26	46.83	0.66	487.06
<b>PROMEDIO</b>	<b>28.80</b>	<b>32.71</b>	<b>32.59</b>	<b>0.0057</b>	<b>31.95</b>	<b>43.14</b>	<b>71.35</b>	<b>39.97</b>	<b>0.72</b>	<b>524.36</b>

Temperatura del agua de red (Trw), Temperatura del agua de ingreso (Tiw), Temperatura del agua en el punto medio (Tmw), Caudal del agua de ingreso (Qiw), Temperatura del aire de ingreso (Tia), Temperatura del aire de escape (Tea), Humedad relativa del aire de ingreso (Hria), Humedad relativa del aire de escape (Hrea), Caudal del aire de escape (Qea), Radiación solar (Rs).

Bajo el modo A (agua precalentada y aire precalentado), el día cuatro presento mayor promedio de radiación solar ( $\bar{R}_s$ ); mayor promedio de temperatura del agua de ingreso ( $\bar{T}_{iw}$ ), mayor promedio de caudal del aire del escape ( $\bar{Q}_{ea}$ ) y menor promedio de humedad relativa del aire de escape ( $\bar{H}_{rea}$ ). Sin embargo, el día uno ocurrió mayor temperatura promedio del aire de escape ( $\bar{T}_{ea}$ ). Además, todos los días mostraron el mismo promedio de caudal del agua de ingreso ( $\bar{Q}_{iw}$ ).

Al analizar el comportamiento del agua, se encontró que la diferencia entre la temperatura del agua de la red ( $T_{rw}$ ) y la temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), resultó en un valor delta promedio ( $\bar{\Delta T}_w$ ) de 3.91 °C. Por otro lado, se calculó la diferencia entre la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ), la cual generó una diferencia promedio entre ambas variables ( $\bar{\Delta T}_a$ ), con un valor de 11.19 °C. Finalmente, la diferencia entre la humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ) y la humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ), produjo un delta promedio ( $\bar{\Delta H}_a$ ) de 31.38%.

**CUADRO XII. PROMEDIOS DE LA RADIACION SOLAR ( $R_s$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $W/m^2$ ) PARA EL MODO A.**

HORA	DIA 1	DIA 4	DIA 7	DIA 10	DIA 13	PROMEDIO
08:00 - 09:00	531.25	432.50	416.25	168.00	194.00	348.40
09:00 - 10:00	771.00	720.75	739.25	225.25	349.50	561.15
10:00 - 11:00	1007.00	753.50	1051.75	257.50	485.50	711.05
11:00 - 12:00	1023.25	981.00	675.25	367.75	570.50	723.55
12:00 - 13:00	1064.00	403.25	1064.00	620.25	297.00	689.70
13:00 - 14:00	638.50	923.50	347.25	783.75	1128.67	764.33
14:00 - 15:00	672.50	970.50	829.75	540.00	882.00	778.95
15:00 - 16:00	494.50	716.00	283.50	481.00	647.25	524.45
16:00 - 17:00	89.00	486.25	234.75	208.50	123.50	228.40
17:00 - 18:00	25.75	270.25	120.75	27.25	29.00	94.60
18:00 - 19:00	8.67	67.67	45.00	11.00	-----	33.08
<b>PROMEDIO</b>	<b>575.04</b>	<b>611.38</b>	<b>527.95</b>	<b>335.48</b>	<b>470.69</b>	<b>496.15</b>

- Periodo con valores de  $R_s$  superior al promedio general.

Los mayores valores de radiación solar ocurrieron entre las 12:00 y las 13:00 horas, los días uno y siete, alcanzando un valor de 1064.00  $W/m^2$ , en ambos casos. También el día uno se registró el menor valor de radiación solar entre

las 18:00 y las 19:00 horas, con 8.67 W/m<sup>2</sup>. Además, el mayor promedio de radiación solar aconteció el día cuatro con 611.38 W/m<sup>2</sup>, mientras que el menor promedio aconteció el día diez, alcanzando 335.48 W/m<sup>2</sup>.

Los registros de radiación solar diaria con promedios mayores al promedio general de 496.15 W/m<sup>2</sup>, ocurrieron entre las 9:00 y las 16:00 horas.

**CUADRO XIII. PROMEDIOS DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE INGRESO (Tiw) A LO LARGO DEL DIA (°C) PARA EL MODO A.**

HORA	DIA 1	DIA 4	DIA 7	DIA 10	DIA 13	PROMEDIO
08:00 - 09:00	29.9	28.00	26.00	27.93	29.13	28.18
09:00 - 10:00	31.5	30.00	28.18	28.28	29.93	29.58
10:00 - 11:00	33.3	31.53	30.08	29.23	30.80	30.99
11:00 - 12:00	35.2	33.03	31.18	29.25	31.88	32.10
12:00 - 13:00	37.0	33.95	33.15	30.38	32.15	33.32
13:00 - 14:00	38.0	35.28	33.58	31.85	32.33	34.20
14:00 - 15:00	38.8	37.00	34.80	32.83	33.80	35.45
15:00 - 16:00	39.1	37.80	34.98	33.63	34.55	36.01
16:00 - 17:00	36.8	38.15	34.35	33.70	34.30	35.47
17:00 - 18:00	30.8	38.18	34.48	28.78	31.20	32.68
18:00 - 19:00	28.6	35.17	32.00	27.40	-----	30.80
<b>PROMEDIO</b>	34.44	34.37	32.07	30.29	32.01	32.61

- Período con valores de Tiw superior al promedio general.

La mayor temperatura del agua de ingreso (Tiw) al reservorio, presento 39.1 °C, entre las 15:00 y las 16:00 horas del día uno. La menor (Tiw) ocurrió entre las 8:00 y las 9:00 horas del día siete, con 26 °C. Por otro lado, el promedio más elevado sucedió el día uno, con un valor de 34.44 °C y el menor

promedio sucedió el día diez con 30.29°C. Los valores promedio superiores al  $\bar{T}_{iw}$  de 32.61 °C, se presentaron entre las 12:00 y las 18:00 horas.

**CUADRO XIV. PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AGUA DE INGRESO ( $Q_{iw}$ ) A LO LARGO DEL DIA ( $m^3/min$ ) PARA EL MODO A.**

HORA	DIA 1	DIA 4	DIA 7	DIA 10	DIA 13	PROMEDIO
08:00 - 09:00	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060
09:00 - 10:00	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
10:00 - 11:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
11:00 - 12:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
12:00 - 13:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
13:00 - 14:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
14:00 - 15:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
15:00 - 16:00	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
16:00 - 17:00	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060
17:00 - 18:00	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
18:00 - 19:00	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	-----	0.0025
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0057</b>

- Periodo con valores de  $Q_{iw}$  superior al promedio general.

Durante el ensayado, el caudal del agua de ingreso ( $Q_{iw}$ ) al colector, se comportó igual durante los cinco días. El mayor  $Q_{wi}$  fue un valor de 0.0065  $m^3/min$ , producido entre las 10:00 y las 15:00 horas y el menor valor con 0.0025  $m^3/min$ , entre las 18:00 y las 19:00 horas. Por otro lado, el promedio del caudal del agua de ingreso ( $\bar{Q}_{iw}$ ) fue de 0.0057  $m^3/min$ ; el cual fue superado entre las 8:00 y las 17:00 horas.

**CUADRO XV. PROMEDIOS DE LA TEMPERTURA DEL AIRE DE ESCAPE (Tea) A LO LARGO DEL DIA (°C) PARA EL MODO A.**

HORA	DIA 1	DIA 4	DIA 7	DIA 10	DIA 13	PROMEDIO
08:00 - 09:00	37.63	34.55	31.70	30.75	29.95	32.92
09:00 - 10:00	46.58	45.53	45.08	31.90	35.28	40.87
10:00 - 11:00	54.18	48.45	51.20	33.60	40.80	45.65
11:00 - 12:00	59.33	52.03	47.98	36.25	43.38	47.79
12:00 - 13:00	60.45	47.03	44.38	44.08	38.70	49.58
13:00 - 14:00	55.40	52.58	57.65	49.83	45.43	49.66
14:00 - 15:00	51.55	55.50	51.45	46.13	52.13	51.35
15:00 - 16:00	44.88	50.18	40.75	45.03	48.43	45.85
16:00 - 17:00	36.28	44.83	36.50	38.50	37.08	38.64
17:00 - 18:00	32.50	39.63	34.58	30.20	31.40	33.66
18:00 - 19:00	28.90	34.70	32.50	28.30	-----	31.10
<b>PROMEDIO</b>	<b>46.15</b>	<b>45.91</b>	<b>43.13</b>	<b>37.69</b>	<b>40.26</b>	<b>42.46</b>

- Periodo con valores de Tea superiores al promedio general.

El mayor valor de temperatura del aire de escape (Tea), ocurrió entre las 12:00 y las 13:00 horas del día uno, con un valor de 60.45 °C, mientras que el menor valor se registró entre las 18:00 y las 19:00 horas del día diez, con 28.30° C. También, el día uno presento el mayor promedio con 46.15 °C y el día diez el menor promedio, con 37.69 °C. Por su parte, las temperaturas promedio del aire, superiores al promedio general (42.46 °C), acontecieron entre las 10:00 y las 16:00 horas.

**CUADRO XVI. PROMEDIOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE ESCAPE (Hrea) A LO LARGO DEL DIA (%) PARA EL MODO A.**

HORA	DIA 1	DIA 4	DIA 7	DIA 10	DIA 13	PROMEDIO
08:00 - 09:00	51.75	62.50	75.00	81.25	81.50	70.40
09:00 - 10:00	30.00	33.50	36.25	72.25	58.00	46.00
10:00 - 11:00	17.50	25.75	22.25	62.75	43.25	34.30
11:00 - 12:00	10.50	20.50	27.75	57.75	37.25	30.75
12:00 - 13:00	11.50	27.50	13.25	39.00	45.50	27.35
13:00 - 14:00	12.50	20.75	28.25	27.25	49.67	27.68
14:00 - 15:00	16.25	13.00	20.75	30.25	22.75	20.60
15:00 - 16:00	24.75	17.75	38.00	33.75	25.25	27.90
16:00 - 17:00	47.00	27.00	53.25	45.75	46.50	43.90
17:00 - 18:00	63.00	37.25	61.00	71.50	70.50	60.65
18:00 - 19:00	73.67	51.33	70.00	83.00	-----	69.50
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.58</b>	<b>30.62</b>	<b>40.52</b>	<b>54.95</b>	<b>48.02</b>	<b>41.73</b>

- Periodo con valores de Hrea inferiores al promedio general.

El menor valor de humedad relativa del aire de escape (Hrea) se registró el día uno entre las 11:00 y las 12:00 horas con 10.50%. También se observa que el día dos presento el menor valor promedio, con 30.62%, mientras que el mayor promedio ocurrió el día diez, con 54.95%.

Los valores inferiores al promedio general de Hrea (41.73%), se presentaron entre las 10:00 y las 16:00 horas.

**CUADRO XVII. PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AIRE DE ESCAPE ( $Q_{ea}$ ) A LO LARGO DEL DÍA ( $m^3/min$ ) PARA EL MODO A.**

HORA	DIA 1	DIA 4	DIA 7	DIA 10	DIA 13	PROMEDIO
08:00 - 09:00	0.85	0.79	0.77	0.62	0.64	0.73
09:00 - 10:00	0.87	0.82	0.81	0.71	0.80	0.80
10:00 - 11:00	0.85	0.83	0.84	0.72	0.81	0.81
11:00 - 12:00	0.85	0.83	0.78	0.83	0.82	0.82
12:00 - 13:00	0.90	0.82	0.83	0.85	0.36	0.75
13:00 - 14:00	1.02	0.87	0.81	0.88	0.65	0.85
14:00 - 15:00	0.78	0.85	0.85	0.84	0.82	0.83
15:00 - 16:00	0.92	0.86	0.71	0.89	0.82	0.84
16:00 - 17:00	0.50	0.83	0.75	0.62	0.54	0.65
17:00 - 18:00	0.08	0.74	0.52	0.05	0.11	0.30
18:00 - 19:00	0.00	0.24	0.00	0.00	-----	0.06
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.69</b>	<b>0.77</b>	<b>0.70</b>	<b>0.64</b>	<b>0.64</b>	<b>0.68</b>

- Periodo con valores de  $Q_{ea}$  superiores al promedio general.

Durante el ensayo, el mayor caudal del aire de escape ( $Q_{ea}$ ), se produjo el día uno entre las 13:00 y las 14:00 horas, con un valor de  $1.02 m^3/min$ ; el menor valor se registró el día diez con  $0.05 m^3/min$ , entre las 17:00 y las 18:00 horas. De igual forma, el mayor  $\bar{Q}_{ea}$  sucedió el día cuatro con  $0.77 m^3/min$  y el menor promedio sucedió el día diez y el día trece, con  $0.64 m^3/min$ . Además, los promedios de  $Q_{ea}$  superiores al promedio general ( $\bar{Q}_{ea} = 0.69 m^3/min$ ), ocurrieron entre las 8:00 y las 16:00 horas.

**A continuación, se presentan los resultados del modo B; agua precalentada.**

**MODO B. AGUA CALIENTE.****CUADRO XVIII. PROMEDIOS DIARIOS DE AGUA PRECALENTADA OBTENIDOS BAJO EL MODO B.**

DIA	AGUA				RADIACION SOLAR (W/m <sup>2</sup> ) Rs
	Temperatura (°C)			Caudal (m <sup>3</sup> /min) Qiw	
	Trw	Tiw	Tmw		
2	29.88	37.47	37.20	0.0057	753.81
5	29.75	37.52	36.99	0.0057	548.72
8	28.35	35.12	35.03	0.0057	654.27
11	28.24	33.16	32.65	0.0057	617.26
14	28.56	35.88	35.35	0.0057	677.87
<b>PROMEDIO</b>	<b>28.95</b>	<b>35.83</b>	<b>35.44</b>	<b>0.0057</b>	<b>650.39</b>

Temperatura del agua de red (Trw), Temperatura del agua de ingreso (Tiw), Temperatura del agua en el punto medio (Tmw), Caudal del agua de ingreso (Qiw), Radiación solar (Rs).

Bajo el modo B (agua caliente), el día dos presento mayor promedio de radiación solar ( $\overline{Rs}$ ) y mayor promedio de temperatura del agua de ingreso ( $\overline{Tiw}$ ). Además, todos los días mostraron el mismo promedio del caudal del agua de ingreso ( $\overline{Qia}$ ) y se obtuvo también, una diferencia delta promedio ( $\overline{\Delta Tw} = Tiw - Trw$ ) de 6.88 °C.

**CUADRO XIX. PROMEDIOS DE LA RADIACION SOLAR (Rs) A LO LARGO DEL DIA (W/m<sup>2</sup>) PARA EL MODO B.**

HORA	DIA 2	DIA 5	DIA 8	DIA 11	DIA 14	PROMEDIO
08:00 - 09:00	496.75	457.75	510.00	498.25	503.50	493.25
09:00 - 10:00	764.50	757.25	736.00	560.25	646.75	692.95
10:00 - 11:00	925.50	922.25	939.75	690.75	747.75	845.20
11:00 - 12:00	1064.00	516.75	958.00	927.50	894.50	872.15
12:00 - 13:00	1183.00	563.00	744.25	840.25	872.25	840.55
13:00 - 14:00	886.50	761.25	1199.50	930.50	1146.75	984.90
14:00 - 15:00	862.25	639.00	815.25	673.25	1031.00	804.15
15:00 - 16:00	667.75	588.75	123.50	267.50	502.00	429.90
16:00 - 17:00	102.75	447.00	22.75	17.00	221.00	162.10
17:00 - 18:00	79.00	208.50	12.00	-----	58.33	89.46
18:00 - 19:00	-----	49.67	-----	-----	-----	49.67
<b>PROMEDIO</b>	<b>703.20</b>	<b>537.38</b>	<b>606.10</b>	<b>600.58</b>	<b>662.38</b>	<b>569.48</b>

- Periodo con valores de Rs superior al promedio general.

El mayor valor de radiación solar ocurrió el día dos, entre las 12:00 y las 13:00 horas, alcanzando un valor de 1183.00 W/m<sup>2</sup>. Mientras, que el menor valor se registró el día tres, entre las 17:00 y las 18: horas, con 12.00 W/m<sup>2</sup>. Además, el mayor promedio de radiación solar aconteció el día dos con 703.20 W/m<sup>2</sup>, mientras que el menor promedio aconteció el día cinco, alcanzando 537.38 W/m<sup>2</sup>.

Los registros de radiación solar diaria con promedios mayores al promedio general ( $\bar{R}_s$ ) de 569.48 W/m<sup>2</sup>, ocurrieron entre las 9:00 y las 15:00 horas.

**CUADRO XX. PROMEDIOS DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE INGRESO (Tiw) A LO LARGO DEL DIA (°C) PARA EL MODO B.**

HORA	DIA 2	DIA 5	DIA 8	DIA 11	DIA 14	PROMEDIO
08:00 - 09:00	32.18	33.35	30.33	28.38	29.83	30.81
09:00 - 10:00	33.70	34.63	32.03	30.10	31.85	32.46
10:00 - 11:00	35.43	36.05	33.80	31.33	33.40	34.00
11:00 - 12:00	37.33	36.85	35.60	32.95	35.03	35.55
12:00 - 13:00	39.38	37.83	36.98	34.38	36.15	36.94
13:00 - 14:00	40.60	38.50	38.33	35.93	38.03	38.28
14:00 - 15:00	41.28	39.18	39.23	36.35	39.13	39.03
15:00 - 16:00	41.80	39.68	38.23	36.53	39.73	39.19
16:00 - 17:00	37.70	39.80	33.03	32.30	39.15	36.40
17:00 - 18:00	28.90	39.45	29.40	-----	36.80	33.64
18:00 - 19:00	-----	37.37	-----	-----	-----	37.37
<b>PROMEDIO</b>	<b>36.83</b>	<b>37.52</b>	<b>34.69</b>	<b>33.14</b>	<b>35.91</b>	<b>35.79</b>

- Periodo con valores de Tiw superior al promedio general.

La mayor temperatura del agua de ingreso (Tiw) al reservorio, presento 39.1 °C, entre las 15:00 y las 16:00 horas del día uno. La menor (Tiw) ocurrió entre las 8:00 y las 9:00 horas del día siete, con 26 °C. Por otro lado, el promedio más elevado sucedió el día uno, con un valor de 34.44 °C y el menor promedio sucedió el día diez con 30.29°C. Los valores promedio superiores al  $\bar{T}_{iw}$  de 32.61 °C, ocurrieron entre las 12:00 y las 18:00 horas.

**CUADRO XXI. PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AGUA DE INGRESO ( $Q_{iw}$ ) A LO LARGO DEL DÍA ( $m^3/min$ ) PARA EL MODO B.**

HORA	DIA 2	DIA 5	DIA 8	DIA 11	DIA 14	PROMEDIO
08:00 - 09:00	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060
09:00 - 10:00	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
10:00 - 11:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
11:00 - 12:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
12:00 - 13:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
13:00 - 14:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
14:00 - 15:00	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
15:00 - 16:00	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
16:00 - 17:00	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060
17:00 - 18:00	0.0038	0.0038	0.0038	-----	0.0038	0.0038
18:00 - 19:00	-----	0.0025	-----	-----	-----	0.0025
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0063</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0057</b>

- Periodo con valores de  $Q_{iw}$  superior al promedio general.

Durante el ensayo, el mayor caudal del agua de ingreso ( $Q_{iw}$ ) alcanzado, fue un valor de  $0.0065 m^3/min$  y ocurrido entre las 10:00 y las 15:00 horas; el menor  $Q_{wi}$  alcanzado ocurrió el día cinco, con un valor de  $0.0025 m^3/min$ , entre las 18:00 y las 19:00 horas. Por otra parte, el mayor promedio se produjo el día once, con  $0.0063 m^3/min$ ; y el menor promedio, el día cinco,  $0.0057 m^3/min$ .

Los registros del caudal del agua de ingreso diaria, con promedios mayores al promedio general ( $\bar{Q}_{iw}$ ) de  $0.0057 m^3/min$ , ocurrieron entre las 8:00 y las 17:00 horas.

**A continuación, se presentan los resultados del modo C; aire precalentado.**

## MODO C. AIRE PRECALENTADO

**CUADRO XXII. PROMEDIOS DIARIOS DE AIRE PRECALENTADO OBTENIDOS BAJO EL MODO C.**

DIA	AIRE					RADIACIÓN SOLAR (W/m <sup>2</sup> )
	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)		Caudal (m <sup>3</sup> /min)	
	Tia	Tea	Hria	Hrea	Qea	Rs
3	32.32	46.62	67.82	32.64	0.86	526.88
6	31.74	44.47	76.86	38.46	0.84	483.71
9	32.16	49.93	72.06	25.26	0.87	691.61
12	31.37	47.19	74.74	33.87	0.76	606.58
15	33.15	47.36	63.36	25.97	0.85	675.00
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.15</b>	<b>47.11</b>	<b>70.97</b>	<b>31.24</b>	<b>0.84</b>	<b>596.76</b>

Temperatura del aire de ingreso (Tia), Temperatura del aire de escape (Tea), Humedad relativa del aire de ingreso (Hria), Humedad relativa del aire de escape (Hrea), Caudal del aire de escape (Qea), Radiación solar (Rs).

Bajo el modo C (aire precalentado), el día nueve presentó mayor promedio de radiación solar ( $\bar{R}_s$ ), mayor promedio de temperatura del aire de escape ( $\bar{T}_{ea}$ ), mayor promedio de caudal del aire de escape ( $\bar{Q}_{ea}$ ) y menor promedio de humedad relativa del aire de escape ( $\bar{H}_{rea}$ ).

Al analizar el comportamiento del aire, se encontró que la diferencia entre la temperatura del aire de ingreso (Tia) y la temperatura del aire de escape (Tea), resulto en un valor delta promedio ( $\bar{\Delta T}_a$ ) de 14.96 °C, mientras que la diferencia entre la humedad relativa del aire de ingreso (Hria) y la humedad relativa del aire de escape (Hrea), produjo un delta promedio ( $\bar{\Delta H}_r$ ) de 39.73%.

**CUADRO XXIII. PROMEDIOS DE LA RADIACION SOLAR (Rs) A LO LARGO DEL DIA (W/m<sup>2</sup>) PARA EL MODO C.**

HORA	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	PROMEDIO
08:00 - 09:00	522.00	500.75	462.75	356.50	441.50	456.70
09:00 - 10:00	698.75	654.75	645.50	766.50	635.50	680.20
10:00 - 11:00	819.25	746.50	949.75	547.25	811.00	774.75
11:00 - 12:00	682.50	812.25	809.50	1105.50	974.25	876.80
12:00 - 13:00	551.50	647.00	837.50	758.50	1129.75	784.85
13:00 - 14:00	577.25	569.00	774.50	793.00	930.50	728.85
14:00 - 15:00	409.75	135.00	773.00	1012.00	796.50	625.25
15:00 - 16:00	82.75	118.00	143.33	382.50	522.75	249.87
16:00 - 17:00	12.00	65.67	-----	36.75	281.25	98.92
17:00 - 18:00	-----	-----	-----	8.00	77.67	42.83
<b>PROMEDIO</b>	<b>483.97</b>	<b>472.10</b>	<b>674.48</b>	<b>576.65</b>	<b>660.07</b>	<b>531.90</b>

- Periodo con valores de Rs superior al promedio general.

El mayor valor de radiación solar ocurrió el día quince, entre las 12:00 y las 13:00 horas, alcanzando un valor de 1129.00 W/m<sup>2</sup>. Mientras, que el menor valor se registró el día doce, entre las 17:00 y las 18: horas, con 8.00 W/m<sup>2</sup>. Además, el mayor promedio de radiación solar aconteció el día nueve con 674.48 W/m<sup>2</sup>, mientras que el menor promedio aconteció el día seis, alcanzando 472.10 W/m<sup>2</sup>.

Los registros de radiación solar diaria con promedios mayores al promedio general ( $\bar{R}_s$ ) de 531.90 W/m<sup>2</sup>, ocurrieron entre las 9:00 y las 15:00 horas.

**CUADRO XXIV. PROMEDIOS DE LA TEMPERTURA DEL AIRE DE ESCAPE (Tea) A LO LARGO DEL DIA (°C) PARA EL MODO C.**

HORA	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	PROMEDIO
08:00 - 09:00	36.43	37.83	34.03	34.83	36.43	35.91
09:00 - 10:00	48.18	50.08	46.20	45.68	43.85	46.80
10:00 - 11:00	55.88	47.18	57.80	46.35	47.50	50.94
11:00 - 12:00	57.55	55.73	58.30	58.80	50.08	56.09
12:00 - 13:00	47.95	54.93	55.98	54.75	58.33	54.39
13:00 - 14:00	50.48	46.33	48.33	51.68	59.25	51.21
14:00 - 15:00	45.98	39.08	54.95	60.68	55.08	51.15
15:00 - 16:00	34.53	34.73	41.80	48.28	45.73	41.01
16:00 - 17:00	30.70	31.00	-----	33.55	39.90	33.79
17:00 - 18:00	-----	-----	-----	27.55	34.20	30.88
<b>PROMEDIO</b>	<b>45.29</b>	<b>44.09</b>	<b>49.67</b>	<b>46.21</b>	<b>47.03</b>	<b>45.21</b>

- Periodo con valores de Tea superiores al promedio general.

El mayor valor de temperatura del aire de escape (Tea), ocurrió entre las 14:00 y las 15:00 horas del día doce, con un valor de 60.68 °C, mientras que el menor valor se registró entre las 18:00 y las 19:00 del mismo día, con 28.30° C. En cuanto a los promedios, el día nueve presento el mayor, con 49.67 °C y el día seis el menor, con 44.09 °C. Además, las temperaturas promedio del aire, superiores al promedio general (42.46 °C), acontecieron entre las 10:00 y las 16:00 horas.

**CUADRO XXV. PROMEDIOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE ESCAPE (Hrea) A LO LARGO DEL DIA (°C) PARA EL MODO C.**

HORA	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	PROMEDIO
08:00 - 09:00	57.75	55.75	67.50	71.75	52.00	60.95
09:00 - 10:00	28.75	26.50	32.00	34.50	28.25	30.00
10:00 - 11:00	16.00	28.50	15.75	30.00	16.00	21.25
11:00 - 12:00	13.00	17.00	12.50	13.00	10.50	13.20
12:00 - 13:00	24.75	17.00	14.50	15.75	10.00	16.40
13:00 - 14:00	21.50	30.00	10.00	19.25	12.75	18.70
14:00 - 15:00	27.75	43.50	15.00	10.00	17.75	22.80
15:00 - 16:00	59.50	58.50	38.00	24.50	25.75	41.25
16:00 - 17:00	81.00	79.67	-----	61.00	36.00	64.42
17:00 - 18:00	-----	-----	-----	84.00	59.00	71.50
<b>PROMEDIO</b>	<b>36.67</b>	<b>39.60</b>	<b>25.66</b>	<b>36.38</b>	<b>26.80</b>	<b>36.05</b>

- Periodo con valores de Hrea inferiores al promedio general.

El menor valor de humedad relativa del aire de escape (Hrea) fue de 10%; y se registró el día doce entre las 14:00 y las 15:00 horas y el día quince entre las 12:00 y 13:00 horas. También se observa que el día quince presentó el menor valor promedio, con 26.80%, mientras que el mayor promedio ocurrió el día seis, con 39.60%.

Los valores inferiores al promedio general de Hrea (36.05%), se presentaron entre las 9:00 y las 15:00 horas.

**CUADRO XXVI. PROMEDIOS DEL CAUDAL DEL AIRE DE ESCAPE ( $Q_{ea}$ ) A LO LARGO DEL DÍA ( $m^3/min$ ) PARA EL MODO C.**

HORA	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	PROMEDIO
08:00 - 09:00	0.87	0.87	0.85	0.81	0.86	0.85
09:00 - 10:00	0.92	0.90	0.89	0.88	0.91	0.90
10:00 - 11:00	0.91	0.89	0.93	0.88	0.93	0.91
11:00 - 12:00	0.91	0.91	0.91	0.88	0.93	0.91
12:00 - 13:00	0.94	0.98	0.96	0.91	0.95	0.95
13:00 - 14:00	0.98	0.93	0.94	0.89	0.90	0.93
14:00 - 15:00	0.99	0.77	0.92	0.90	0.91	0.90
15:00 - 16:00	0.62	0.72	0.49	0.80	0.86	0.70
16:00 - 17:00	0.00	0.55	-----	0.25	0.81	0.40
17:00 - 18:00	-----	-----	-----	0.00	0.35	0.18
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.79</b>	<b>0.84</b>	<b>0.86</b>	<b>0.72</b>	<b>0.84</b>	<b>0.76</b>

- Periodo con valores de  $Q_{ea}$  superiores al promedio general.

Durante el ensayo, el mayor caudal del aire de escape ( $Q_{ea}$ ), se produjo el día tres entre las 14:00 y las 15:00 horas, con un valor de  $0.99 m^3/min$ ; y el menor valor se registró el día doce con  $0.25 m^3/min$ , entre las 16:00 y las 17:00 horas. De igual forma, el mayor  $\bar{Q}_{ea}$  sucedió el día nueve con  $0.86 m^3/min$  y el menor promedio sucedió el día doce, con  $0.72 m^3/min$ . Además, los promedios de  $Q_{ea}$  superiores al promedio general ( $\bar{Q}_{ea} = 0.76 m^3/min$ ), ocurrieron entre las 8:00 y las 15:00 horas.

### 4.3. Análisis gráfico

Para llevar a cabo un análisis del comportamiento del prototipo de colector solar plano bifluidos bajo los modos A, B y C, se realizaron las siguientes gráficas:

- **Modo A. (Ambos fluidos)**

1. Promedios de la temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), la temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ) y la temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ) en función de la hora y la radiación solar.
2. Promedios de la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ) en función de la hora y la radiación solar.
3. Promedios de la humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ) y la humedad relativa de aire de escape ( $H_{rea}$ ) en función de la hora y la radiación solar.

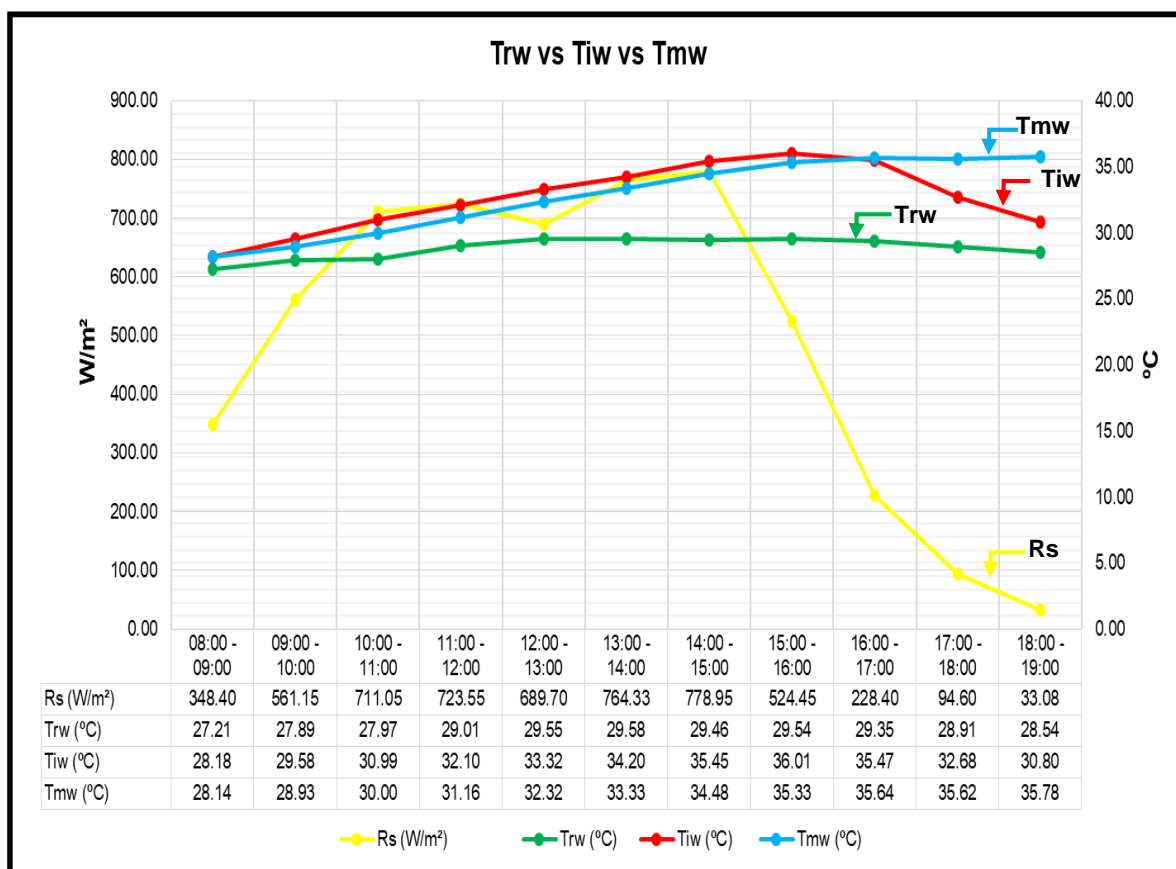
- **Modo B. (Solo agua precalentada)**

4. Promedios de la temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), la temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ) y la temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ) en función de la hora y la radiación solar.

- **Modo C. (Solo aire precalentado)**

5. Promedios de la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ) en función de la hora y la radiación solar.
6. Promedios de la humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ) y la humedad relativa de aire de escape ( $H_{rea}$ ) en función de la hora y la radiación solar.

## ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS GENERADAS EN EL MODO A (AGUA Y AIRE PRECALENTADOS).



Modo A.

Rs= Radiación solar

Trw= Temperatura del agua de red

Tiw= Temperatura del agua de ingreso

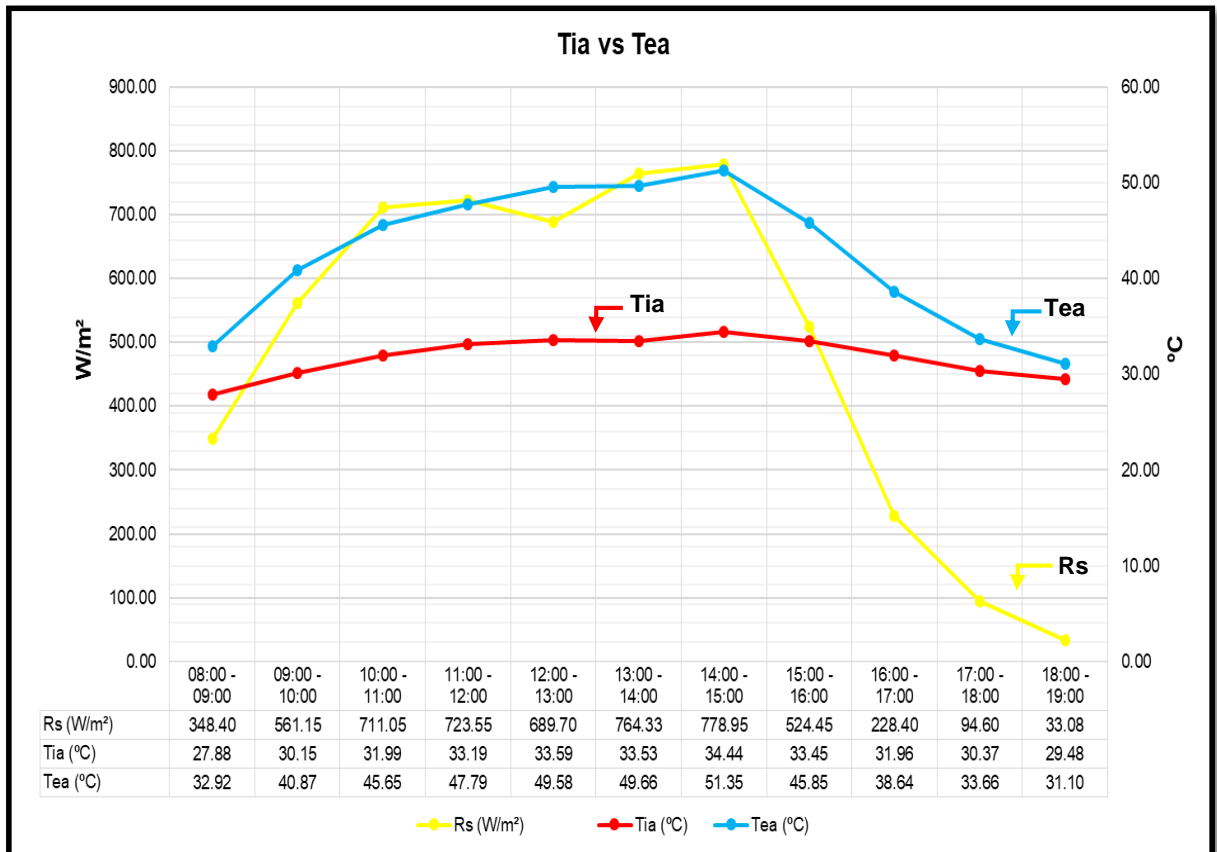
Tmw= Temperatura del agua en el punto medio

**Figura 7.** Promedios de la temperatura del agua de red (Trw), la temperatura del agua de ingreso (Tiw) y la temperatura del agua en el punto medio (Tmw).

Los promedios diarios registrados fueron de 496.15 vatios por metro cuadrado de radiación solar (Rs); 28.82 grados Celsius de temperatura del agua de red (Trw); 32.61 grados Celsius de temperatura del agua de ingreso (Tiw) y 32.79 grados Celsius de temperatura del agua en el punto medio (Tmw).

La gráfica muestra que la mayor diferencia entre Tiw y Tmw fue de -4.98 grados Celsius; entre las 18:00 y las 19:00 horas; y que la menor diferencia fue de 0.04 grados Celsius; entre las 08:00 y las 09:00 horas. Por otro lado, se

observa que  $T_{rw}$  se mantuvo casi constante, mientras que las curvas  $T_{iw}$  y  $T_{mw}$  conservaron un comportamiento bastante similar ( $T_{iw}$  fue levemente superior) hasta las 16:00 horas; momento desde el cual  $T_{iw}$  descendió.



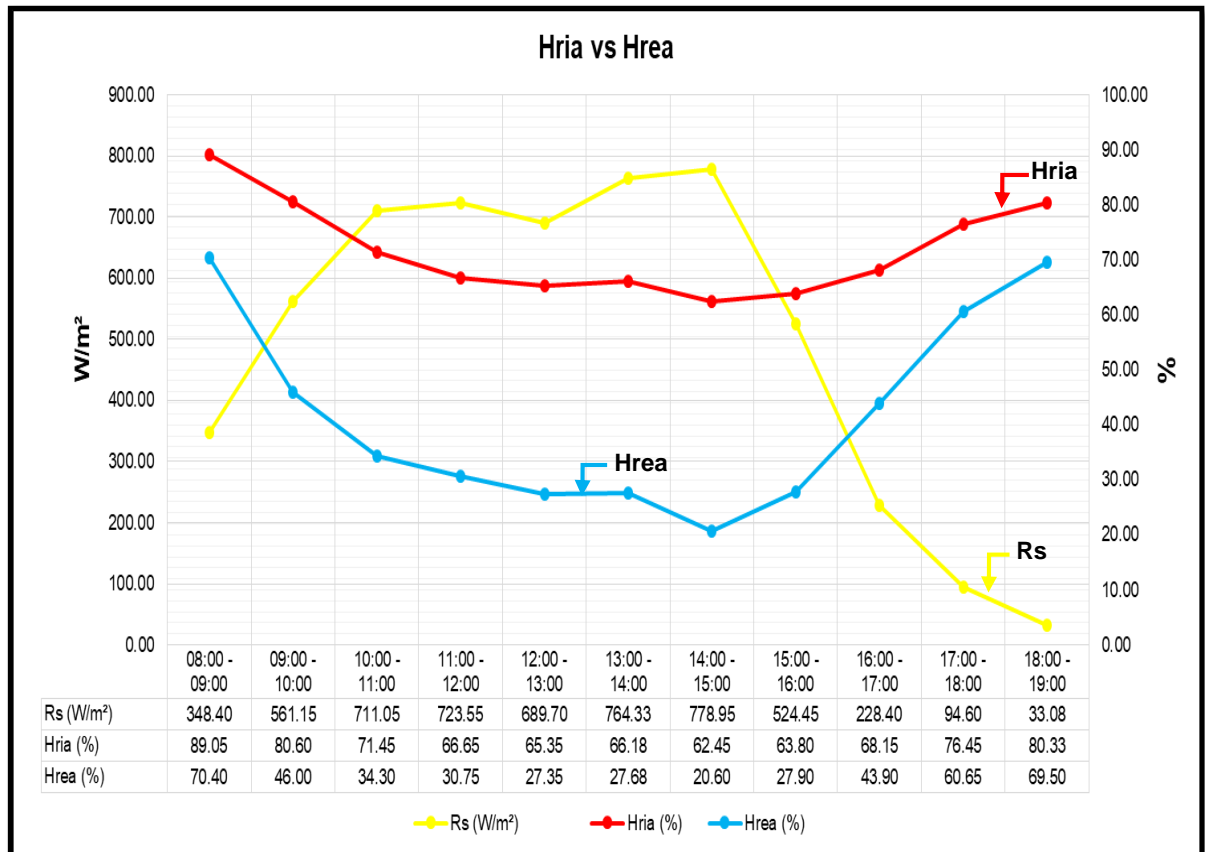
Modo A.  
 Rs= Radiación solar  
 Tia= Temperatura del aire de ingreso  
 Tea= Temperatura del aire de escape

**Figura 8.** Promedios de la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ).

El valor diario promedio de radiación solar ( $R_s$ ) fue de 496.15 vatios por metro cuadrado; el de temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) fue de 31.82 grados Celsius y el de temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ) fue de 42.46 grados Celsius.

Por otra parte, en la gráfica se observa que la mayor diferencia entre  $T_{ia}$  y  $T_{ea}$  fue de 16.91 grados Celsius entre las 14:00 y las 15:00 horas. Mientras que la

menor diferencia fue de las 18:00 a las 19:00 horas, con 1.62 grados Celsius. Además, se aprecia que la curva de Tea bajó significativamente, después de las 15:00 horas, hasta llegar casi a rosar la curva de Tia.



Modo A.  
 Rs= Radiación solar  
 Hria= Humedad relativa del aire de ingreso  
 Hrea= Humedad relativa del aire de escape

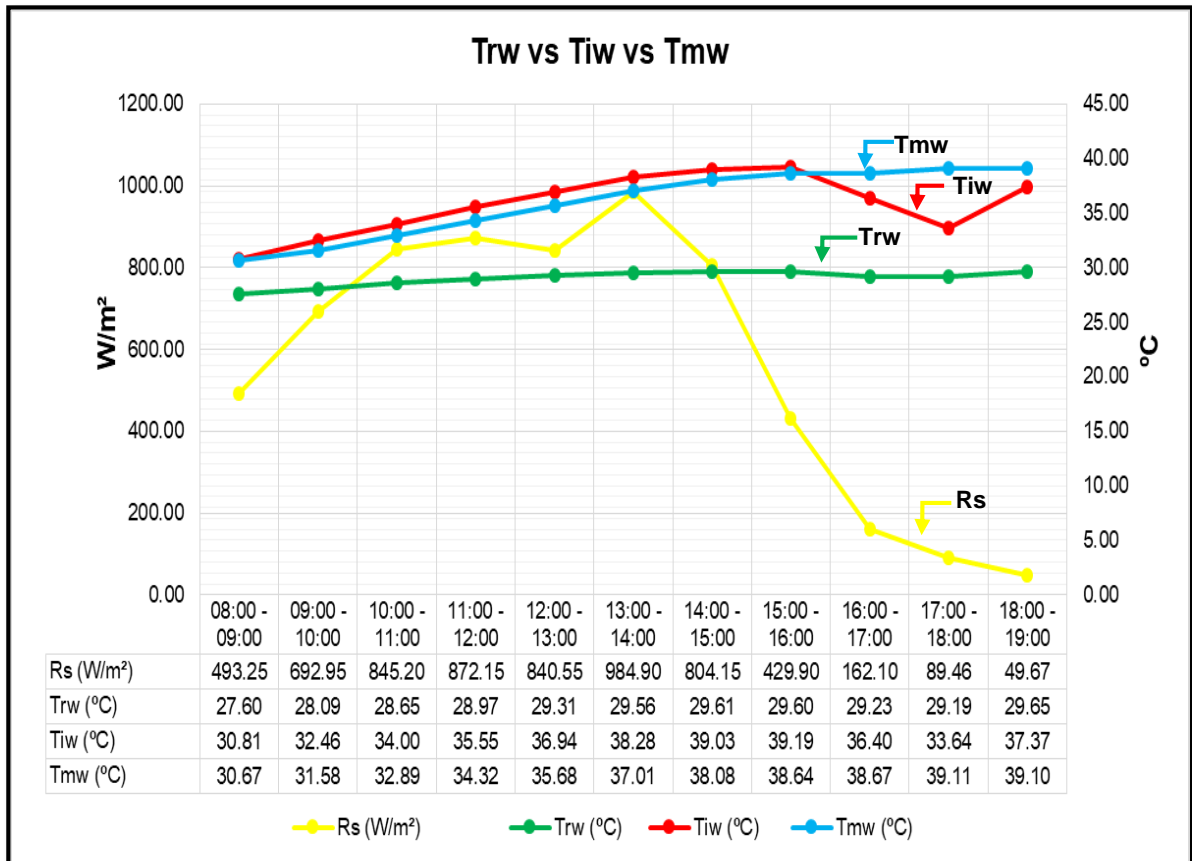
**Figura 9.** Promedios de la humedad relativa del aire de ingreso (Hria) y la humedad relativa de aire de escape (Hrea).

Durante el ensayo, el valor diario promedio de radiación solar (Rs) fue de 496.15 vatios por metro cuadrado; el de humedad relativa del aire de ingreso (Hria) fue 71.86 por ciento y el de humedad relativa del aire de escape (Hrea) fue de 41.73 por ciento.

En la figura, se muestra que la mayor diferencia entre Hria y Hrea ocurrió entre las 14:00 y las 15:00 horas, con un valor de 41.85 por ciento; y la menor

diferencia se dio entre las 18:00 y las 19:00 horas, con un valor de 10.83 por ciento. Por otra parte, Hrea se eleva significativamente a partir de las 16:00 horas.

**ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS GENERADAS EN EL MODO B (SOLO AGUA PRECALENTADA).**



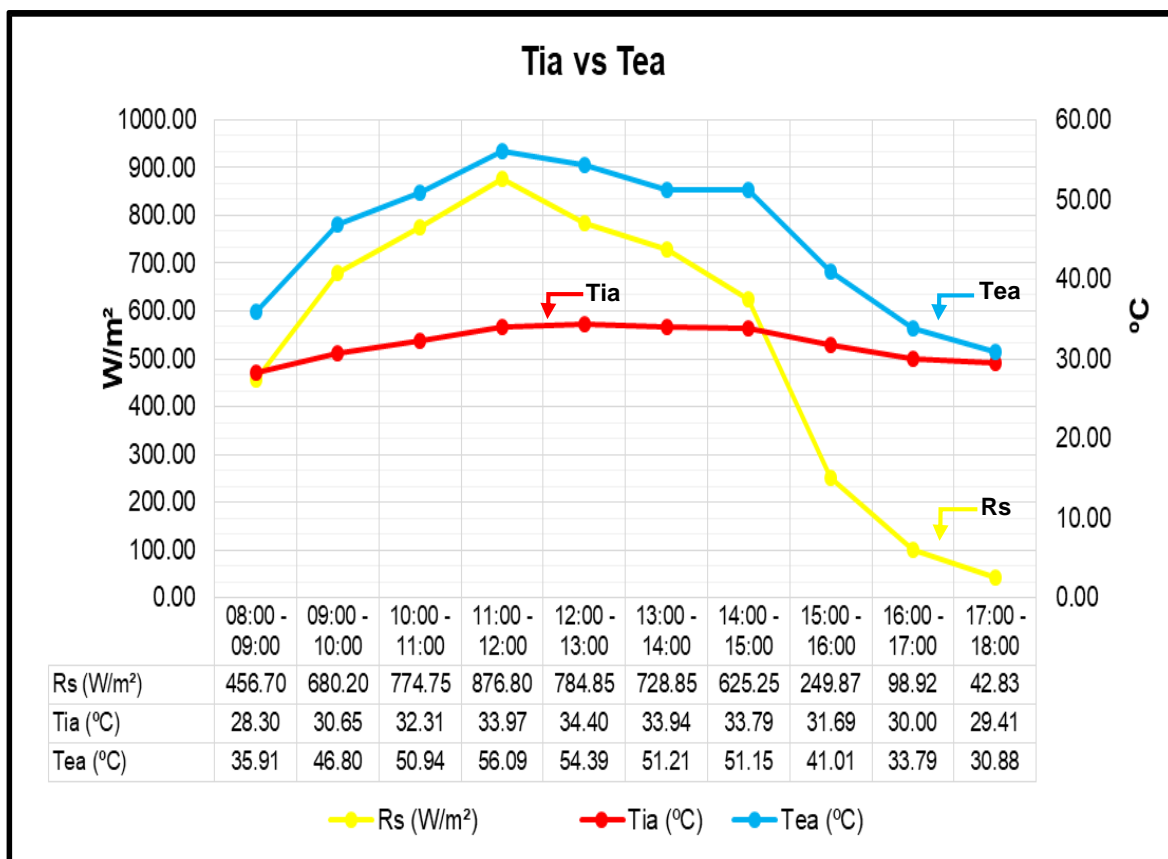
Modo B.  
 Rs= Radiación solar  
 Trw= Temperatura del agua de red  
 Tiw= Temperatura del agua de ingreso  
 Tmw= Temperatura del agua en el punto medio

**Figura 10.** Promedios de la temperatura del agua de red (Trw), la temperatura del agua de ingreso (Tiw) y la temperatura del agua en el punto medio (Tmw).

Los promedios diarios registrados fueron de 569.48 vatios por metro cuadrado de radiación solar (Rs); 29.04 grados Celsius de temperatura del agua de red (Trw); 35.79 grados Celsius de temperatura del agua de ingreso (Tiw) y 35.98 grados Celsius de temperatura del agua en el punto medio (Tmw).

En esta grafica se aprecia, que la mayor diferencia entre  $T_{iw}$  y  $T_{mw}$  fue de -5.48 grados Celsius; entre las 17:00 y las 18:00 horas; y que la menor diferencia fue de 0.14 grados Celsius; entre las 08:00 y las 09:00 horas. Además, se observa que  $T_{rw}$  no tuvo variaciones significativas, mientras que, la curva de  $T_{iw}$  mostró un comportamiento levemente superior a la curva de  $T_{mw}$  hasta las 16:00 horas; momento en el cual  $T_{iw}$  descendió y aumento posteriormente hasta las 18:00 horas. Sin embargo, no supero el valor de  $T_{mw}$ .

**ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS GENERADAS EN EL MODO C (SOLO AIRE PRECALENTADO).**



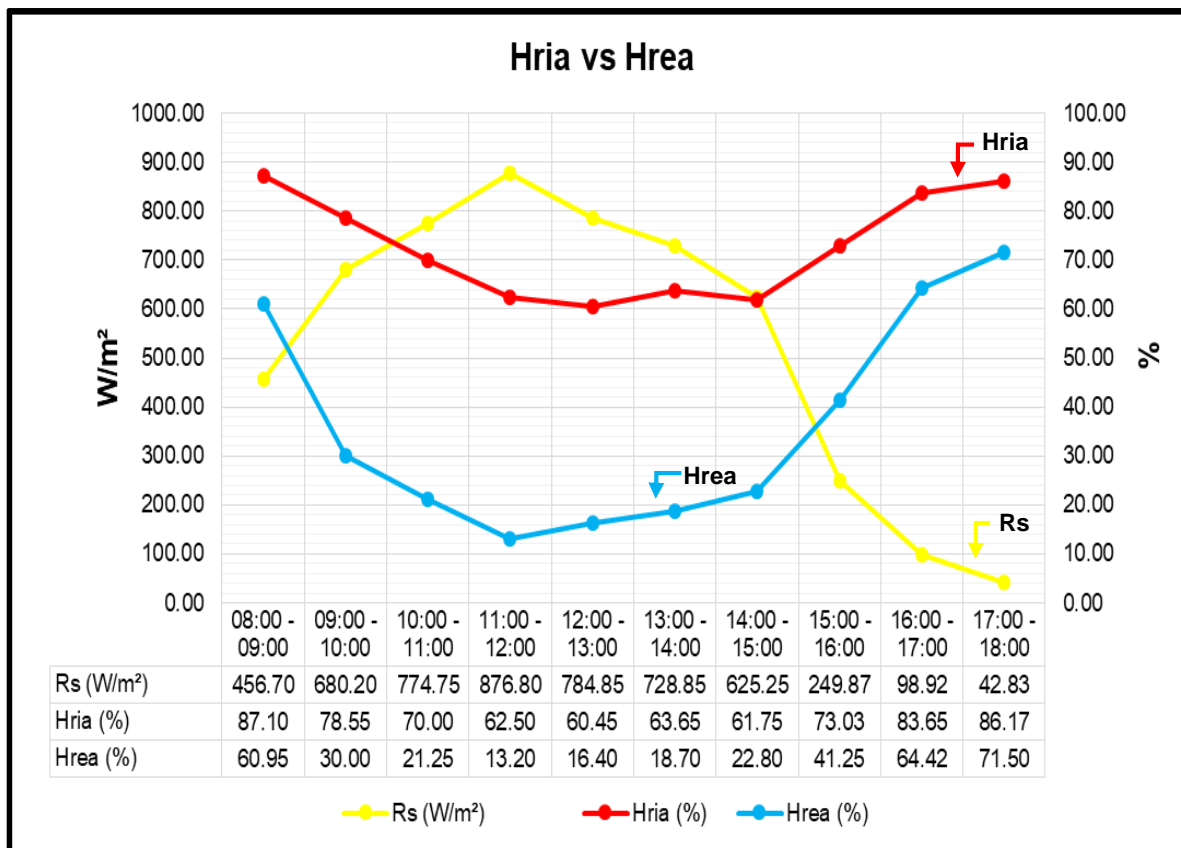
Modo C.  
 $R_s$ = Radiación solar  
 $T_{ia}$ = Temperatura del aire de ingreso  
 $T_{ea}$ = Temperatura del aire de escape

**Figura 11.** Promedios de la temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) y la temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ).

El valor diario promedio de radiación solar ( $R_s$ ) fue de 531.90 vatios por metro cuadrado; el de temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ) fue de 31.84 grados Celsius y el de temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ) fue de 45.21 grados Celsius.

En la figura, se observa que la mayor diferencia entre  $T_{ia}$  y  $T_{ea}$  fue de 22.13 grados Celsius. Además, la menor diferencia ocurrió entre las 17:00 y las 18:00 horas, con 1.47 grados Celsius.

Entretanto, se logra apreciar que la curva de comportamiento de  $T_{ea}$ , tuvo dos periodos de descenso. El primer periodo ocurrió entre las 12:00 y las 15:00 horas, en el cual mostró un descenso gradual. Mientras que el segundo, se produjo pasadas las 15:00 horas, en el cual los valores de  $T_{ea}$  cayeron significativamente, hasta terminar alcanzando valores similares a  $T_{ia}$ .



Modo C.

Rs= Radiación solar

HRia= Humedad relativa del aire de ingreso

HRea= Humedad relativa del aire de escape

**Figura 12.** Promedios de la humedad relativa del aire de ingreso (Hria) y la humedad relativa de aire de escape (Hrea).

Durante el estudio, el valor diario promedio de radiación solar (Rs) fue de 531.90 vatios por metro cuadrado; el de humedad relativa del aire de ingreso (Hria) fue 72.68 por ciento y el de humedad relativa del aire de escape (Hrea) fue de 36.05 por ciento.

En la gráfica de la figura doce, se muestra que la mayor diferencia entre Hria y Hrea, ocurrió entre las 11:00 y las 12:00 horas, con un valor de 49.30 por ciento; y que la menor diferencia se dio entre las 17:00 y las 18:00 horas, con un valor de 14.67 por ciento. Por otra parte, se muestra un gran aumento en la curva de comportamiento de Hrea, desde las 14:00 horas.

#### 4.4. Análisis estadístico

A continuación, se presentan los resultados de correlación lineal y regresión lineal de los modos A (ambos fluidos), B (solo agua precalentada) y C (solo aire precalentado), los cuales fueron trabajados con el programa estadístico SAS.

##### Modo A. Agua precalentada y aire precalentado

El cuadro XXVII resume los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, bajo el modo A, generado por matriz, mediante SAS.

**CUADRO XXVII. CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS DEL MODO A.**

Variables	Coefficiente de Correlación (r)	Significancia
$\Delta Tw_1 - R_s$	0.1905	0.5746
$\Delta Tw_2 - R_s$	-0.5824	0.0601
$\Delta Tw_3 - R_s$	0.8702	0.0005**
$\Delta Q_{iw} - R_s$	0.8486	0.0010**
$\Delta Ta - R_s$	0.9723	< 0.0001**
$\Delta H_{ra} - R_s$	-0.9572	< 0.0001**
$\Delta Q_{ea} - R_s$	0.8629	0.0006**

\*\* = indica una correlación altamente significativa

$\Delta Tw_1$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta Tw_2$ = Valor de la diferencia de  $T_{mw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta Tw_3$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{mw}$

$Q_{iw}$ = Caudal del agua de ingreso

$\Delta Ta$ = Valor de la diferencia de  $T_{ia}$  -  $T_{ea}$

$\Delta H_{ra}$ = Valor de la diferencia de  $H_{rea}$  -  $H_{ria}$

$Q_{ea}$ = Caudal del aire de escape

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), Temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), Temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ), Temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ), Temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ), Humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ), Humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ).

El cuadro XXVII indica que las variables  $\Delta Tw_1$  y  $\Delta Tw_2$  poseen una correlación no significativa con  $R_s$ . Mientras que las variables  $\Delta Tw_3$ ,  $Q_w$ ,  $\Delta Ta$ ,  $Hra$  y  $Qa$  poseen una correlación altamente significativa con  $R_s$  ( $p \leq 0.01$ ). Por otra parte, también se aprecia que las variables  $\Delta Tw_1$ ,  $\Delta Tw_3$ ,  $Q_w$ ,  $\Delta Ta$  y  $Qa$  correlacionaron positivamente. Además, las variables  $\Delta Tw_2$  y  $\Delta Hra$  correlacionaron en forma negativa. Esto indica que a mayor  $R_s$ , las variables  $\Delta Tw_1$ ,  $\Delta Tw_3$ ,  $Q_w$ ,  $\Delta Ta$  y  $Qa$  aumentan; y las variables  $\Delta Tw_2$  y  $\Delta Hra$  disminuyen (la simbología de las variables se describe en el cuadro XXVII).

A continuación, el cuadro XXVIII presenta los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, bajo el modo A (ambos fluidos), generado por una matriz del SAS.

**CUADRO XXVIII. ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE CON RADIACION SOLAR (Rs) COMO VARIABLE INDEPENDIENTE, BAJO EL MODO A.**

Ecuación de Regresión	Coefficiente de determinación (r <sup>2</sup> )	Evaluación del ajuste del modelo
$\Delta Tw_1 = 3.1652 + 0.0012 (Rs)$	0.0363	Bajo
$\Delta Tw_2 = 6.4147 - 0.0049 (Rs)$	0.3393	Regular
$\Delta Tw_3 = - 3.2502 + 0.0062 (Rs)$	0.7573	Satisfactorio
$Q_{iw} = 0.0037 + 0.0004 (Rs)$	0.7202	Satisfactorio
$\Delta Ta = 0.9349 + 0.0195 (Rs)$	0.9454	Excelente
$\Delta Hra = - 11.6783 - 0.0372 (Rs)$	0.9163	Excelente
$Q_{ea} = 0.2763 + 0.0008 (Rs)$	0.7446	Satisfactorio

$\Delta Tw_1$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $Trw$

$\Delta Tw_2$ = Valor de la diferencia de  $T_{mw}$  -  $Trw$

$\Delta Tw_3$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{mw}$

$Q_{iw}$ = Caudal del agua de ingreso

$\Delta Ta$ = Valor de la diferencia de  $T_{ia}$  -  $Tea$

$\Delta Hra$ = Valor de la diferencia de  $H_{rea}$  -  $H_{ria}$

$Q_{ea}$ = Caudal del aire de escape

$Rs$ = Radiación solar

Temperatura del agua de red ( $Trw$ ), Temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), Temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ), Temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ), Temperatura del aire de escape ( $Tea$ ), Humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ), Humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ).

El cuadro XVIII señala en términos generales que los modelos de regresión lineal sometidos a prueba revelaron un ajuste satisfactorio, debido a que la mayoría de valores  $r$  cuadrado, estuvieron por encima de la media (0.50).

**La interpretación de los modelos de regresión se muestra a continuación:**

Variable Independiente	Variables Dependientes	Resultados	Cantidad	Unidad
Por el aumento de un vatio por metro cuadrado de radiación solar	$\Delta Tw_1$	Aumenta	0.0012	Grados Celsius
	$\Delta Tw_2$	Desciende	0.0049	Grados Celsius
	$\Delta Tw_3$	Aumenta	0.0062	Grados Celsius
	$Q_{iw}$	Aumenta	0.0004	Metros cúbicos por minuto
	$\Delta Ta$	Aumenta	0.0195	Grados Celsius
	$\Delta Hra$	Desciende	0.0372	Porcentaje
	$Q_{ea}$	Aumenta	0.0008	Metros cúbicos por minuto

**Figura 13.** Interpretación de los modelos de regresión del modo A

A continuación, se presentan los resultados de las correlaciones y regresiones del modo B.

### Modo B. Agua precalentada.

El cuadro XXIX resume los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, bajo el modo B, generado por matriz mediante SAS.

**CUADRO XXIX. CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS DEL MODO B.**

Variables	Coefficiente de Correlación (r)	Significancia
$\Delta T_{w1} - R_s$	0.1697	0.6178
$\Delta T_{w2} - R_s$	-0.5686	0.0679
$\Delta T_{w3} - R_s$	0.8516	0.0009**
$\Delta Q_{iw} - R_s$	0.7937	0.0035**

\*\* = indica una correlación altamente significativa

$\Delta T_{w1}$ = valor de la diferencia de  $T_{iw} - T_{rw}$

$\Delta T_{w2}$ = Valor de la diferencia de  $T_{mw} - T_{rw}$

$\Delta T_{w3}$ = valor de la diferencia de  $T_{iw} - T_{mw}$

$Q_{iw}$ = Caudal del agua de ingreso

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), Temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), Temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ).

El cuadro XXIX, muestra que las variables  $\Delta T_{w1}$  y  $\Delta T_{w2}$  poseen una correlación no significativa con  $R_s$ . Mientras, que las variables  $\Delta T_{w3}$  y  $Q_w$  poseen una correlación altamente significativa con la radiación solar ( $p \leq 0.01$ ). Además, se aprecia que las variables  $\Delta T_{w1}$ ,  $\Delta T_{w3}$  y  $Q_w$  correlacionaron positivamente, y que  $\Delta T_{w3}$  correlacionó negativamente.

Esto indica que a mayor  $R_s$ , las variables  $\Delta T_{w1}$ ,  $\Delta T_{w3}$  y  $Q_{iw}$  aumentan; y la variable  $\Delta T_{w2}$  disminuye.

A continuación, el cuadro XXX presenta los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, bajo el modo B (solo agua precalentada), generado por una matriz del SAS.

**CUADRO XXX. ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE CON RADIACION SOLAR (Rs) COMO VARIABLE INDEPENDIENTE, BAJO EL MODO B.**

Ecuación de Regresión	Coefficiente de determinación (r <sup>2</sup> )	Evaluación del ajuste del modelo
$\Delta Tw_1 = 6.1388 + 0.0010 (Rs)$	0.0288	Bajo
$\Delta Tw_2 = 9.3593 - 0.0042 (Rs)$	0.3234	Regular
$\Delta Tw_3 = - 3.2163 + 0.0053 (Rs)$	0.7254	Satisfactorio
$Q_{iw} = 0.0039 + 0.0003 Rs$	0.6300	Satisfactorio

$\Delta Tw_1$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta Tw_2$ = Valor de la diferencia de  $T_{mw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta Tw_3$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{mw}$

$Q_{iw}$ = Caudal del agua de ingreso

$Rs$ = Radiación solar

Temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), Temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), Temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ).

El cuadro XXX señala en términos generales que los modelos de regresión lineal sometidos a prueba revelaron un ajuste positivo, debido a que la mayoría de valores r cuadrado, estuvieron cercanos y por encima de la media (0.50).

**La interpretación de los modelos de regresión se muestra a continuación:**

Variable Independiente	Variables Dependientes	Resultados	Cantidad	Unidad
Por el aumento de un vatio por metro cuadrado de radiación solar.	$\Delta Tw_1$	Aumenta	0.0010	Grados Celsius
	$\Delta Tw_2$	Desciende	0.0042	Grados Celsius
	$\Delta Tw_3$	Aumenta	0.0053	Grados Celsius
	$Q_{iw}$	Aumenta	0.0003	Metros cúbicos por minuto

**Figura 14.** Interpretación de los modelos de regresión del modo B.

A continuación, se presentan los resultados de las correlaciones y regresiones del modo C.

### Modo C. Aire precalentado.

El cuadro XXXI resume los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, bajo el modo C, generado por matriz, mediante SAS.

**CUADRO XXXI. CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS DEL MODO C.**

Variables	Coefficiente de Correlación (r)	Significancia
$\Delta T_a - R_s$	0.96939	< 0.0001**
$\Delta H_{ra} - R_s$	-0.9468	< 0.0001**
$\Delta Q_{ea} - R_s$	0.9093	0.0003**

\*\* = indica una correlación altamente significativa

$\Delta T_a$ = Valor de la diferencia de  $T_{ia}$  -  $T_{ea}$

$\Delta H_{ra}$ = Valor de la diferencia de  $H_{rea}$  -  $H_{ria}$

$Q_{ea}$ = Caudal del aire de escape

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ), Temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ), Humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ), Humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ).

El cuadro XXXI muestra que todas las correlaciones resultaron altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ). Las variables  $\Delta T_a$  y  $Q_a$  correlacionaron positivamente con  $R_s$ . Mientras, que la variable  $\Delta H_{ra}$  correlacionó negativamente con  $R_s$ .

Esto indica que a mayor  $R_s$ , las variables  $\Delta T_a$  y  $Q_a$  tienden a aumentar; y la variable  $\Delta H_{ra}$  a disminuir.

A continuación, el cuadro XXXII presenta los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, bajo el modo C (solo aire caliente), generado por una matriz del SAS.

**CUADRO XXXII. ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE CON RADIACION SOLAR (Rs) COMO VARIABLE INDEPENDIENTE, BAJO EL MODO C.**

Ecuación de Regresión	Coefficiente de determinación (r <sup>2</sup> )	Evaluación del ajuste del modelo
$\Delta T_a = 1.0510 + 0.0231 (R_s)$	0.9397	Excelente
$\Delta H_{ra} = - 15.1603 - 0.0403 (R_s)$	0.8964	Excelente
$\Delta Q_{ea} = 0.3409 + 0.0007 (R_s)$	0.8269	Excelente

$\Delta T_a$ = Valor de la diferencia de  $T_{ia}$  -  $T_{ea}$

$\Delta H_{ra}$ = Valor de la diferencia de  $H_{rea}$  -  $H_{ria}$

$Q_{ea}$ = Caudal del aire de escape

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ), Temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ), Humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ), Humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ).

El cuadro XXXII señala en términos generales que los modelos de regresión lineal sometidos a prueba revelaron un ajuste excelente, debido a que todos los valores r cuadrado se acercan a 1.0.

**La interpretación de los modelos de regresión se muestra a continuación:**

Variable Independiente	Variables Dependientes	Resultados	Cantidad	Unidad
Por el aumento de un vatio por metro cuadrado de radiación solar.	$\Delta T_a$	Aumenta	0.0231	Grados Celsius
	$\Delta H_{ra}$	Desciende	0.0403	Porcentaje
	$Q_{ea}$	Aumenta	0.0007	Metros cúbicos por minuto

**Figura 15.** Interpretación de los modelos de regresión del modo C.

## 5. DISCUSION

Durante la investigación se desarrolló un prototipo de colector solar plano bifluidos (CSPB) para la producción de agua y aire precalentado, siguiendo ciertos lineamientos de otros autores; se puede señalar que su construcción es inédita, pues no se encontraron antecedentes de colectores similares.

Este colector se construyó utilizando métodos comunes y permitió desarrollar una serie de pasos, fáciles de replicar por potenciales usuarios. También permitió la creación de herramientas innovadoras, como lo es el **estampador de esquinas**; la creación de técnicas para encontrar fallas en el prototipo, como lo es **la prueba de fugas**; y el desarrollo de una **base de datos** de los materiales utilizados; así como el **presupuesto de gastos** el cual no excede los B/. 227.00, sin considerar la mano de obra.

Durante el análisis del mercado local, se encontraron materiales de construcción de mayor eficiencia, pero más caros. Por lo que se optó por materiales más baratos, pero que de igual forma cumplieran los objetivos.

Entre los materiales que presentaron cierta dificultad para ser trabajados se puede mencionar la tubería de cobre, la cual presentó problemas de fugas luego de soldarse; por lo que se recomienda no usar soldadura. Por otra parte, utilizar madera implica un esfuerzo extra; pudiera substituirse con playwood plastificado, para cubrir el fondo.

Durante la medición, al exponer el colector solar a tres modos diferentes permitió conocer sus alcances. Bajo el modo A (agua precalentada y aire precalentado), las diferencias caloportadoras de ambos fluidos provocaron una transmisión desigual de energía térmica; afectando primordialmente la

producción de agua precalentada. Este resultado pudiera mejorarse cambiando el material captador, aislando mejor el tanque reservorio o compactar arena en los espacios que no cubre la tubería; lo cual aumentaría la transmisión de calor al agua, pero provocaría un peso extra al colector.

Bajo el modo B (solamente agua precalentada), la ganancia de calor aumentó, debido a que se trabajó únicamente con el mismo caudal de agua del modo A, mientras se obstruyó el paso del aire ambiente. Pudiera también mejorarse el aislamiento térmico del colector.

Bajo el modo C (solamente aire precalentado), se obtuvo una mejor ganancia térmica. Este resultado, al igual que en el modo B, se debió a utilizar un único fluido de muy baja densidad.

Por otra parte, debe señalarse que los tres modos empleados fueron aplicados durante meses con alta nubosidad y lluvias, lo cual afectó el rendimiento del colector solar.

Por otro lado, se determinó que los mejores promedios de radiación solar están comprendidas entre las 10:00 y las 15:00 horas. Podrá aplicarse entonces el **régimen de oportunidad**, el cual consiste en seccionar el tiempo de trabajo en función del tipo de fluido, de actividad y del periodo diario de mejor radiación solar. Se puede utilizar las tres mejores horas de radiación solar para la producción de agua precalentada y el resto para la producción de aire precalentado; mejorando los resultados.

Otro modo aplicable a este periodo de horas, es trabajar el agua y el aire con mayor área de captación, lo que provocaría un mayor arrastre de calor por

parte de ambos fluidos. Pudiendo optar también por reducir el caudal de los fluidos, lo que aumentaría sus temperaturas.

## 6. CONCLUSIONES

Es factible la construcción del prototipo de colector solar plano bifluidos de un metro cuadrado de área de captación. Es de diseño sencillo, replicable y tanto materiales como herramientas utilizadas son localizables en el mercado local a precios accesibles. Sin embargo; el diseño, los materiales y herramientas podrán mejorarse para mayor eficiencia.

Se observó que al trabajar por separado el agua (Modo B) el colector duplicó la ganancia la temperatura del agua precalentada, en comparación con el modo A.

Analizando el modo C, se encontró que el aire precalentado presenta una considerable ganancia en comparación al modo A y alcanza parámetros apropiados para desarrollar procesos de secado, deshidratado y climatización.

En términos generales el colector solar plano bifluidos de un metro cuadrado, cumplió con las expectativas en la producción de aire precalentado, sin embargo, para producir agua precalentada a 65 grados Celsius, temperatura utilizada para sanitización en agroindustrias, será necesario aumentar el área de captación o reducir el caudal del agua bombeada.

Durante el análisis estadístico, se aplicaron correlaciones y regresiones sobre el colector de un metro cuadrado, lo que permitió desarrollar una base de datos extrapolables a diferentes demandas de consumo de agua precalentada y aire precalentado. Estos valores pueden utilizarse para estimar el dimensionado del área de captación solar en función de la demanda del proceso y de los niveles de radiación solar de una localidad en particular. Si bien uno de los objetivos

del presente trabajo fue evaluar el rendimiento del prototipo de colector, nótese que se llegó desarrollar un sistema que puede operar en cualquier punto geográfico donde brille el sol, sin depender de la energía eléctrica convencional.

El agua precalentada puede ser utilizado para el desarrollo de actividades domésticas (baños, duchas, fregado, lavado de suelos, etc.), industriales (climatización de piscinas, limpieza de botellas, etc.), agroindustriales (lavado de salas de ordeño, salas de parto) y otras. Por lo que la temperatura de consumo de dichas actividades, es un factor determinante. A efectos de diseño pueden aceptarse temperaturas de suministro de agua caliente sanitaria entre 45 y 50 grados Celsius, pero conviene ajustar estos valores siempre que sea posible (IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía s.f.).

Según la FAO (1991), los aumentos diarios de temperatura promedio del aire necesario para el secado de granos no pasan en general, de 3 grados Celsius; además, la humedad relativa debe ser inferior a 60 por ciento. Por otro lado, el rango de temperatura para deshidratado es de 50 a 60 grados Celsius. Mientras que a mayor caudal se aceleran los procesos, tanto de secado como de deshidratación, debido a que se mueve mayor caudal aire caliente sobre la superficie (Valdés 2008). Sin embargo, ambos autores concuerdan, que estos valores son generales, ya que, para poder referirse al rango de temperatura, humedad relativa y caudal de aire necesaria para el secado o deshidratado, se necesita considerarse las demandas individuales de cada rubro a procesarse.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar el área de captación y disminuir el caudal de agua y aire producido, para aumentar la ganancia térmica. De igual forma, se puede cambiar el fondo aislante del colector por lámina de playwood plastificado para mayor durabilidad y la captación de calor se podrá mejorar adicionando una cama de arena entre las láminas metálicas que cubren la tubería. Además, cambiar la lámina metálica absorbidora por una lámina de cobre o algún material con mayor rendimiento térmico.

Es prudente desarrollar un levantamiento de datos durante los meses de mayor radiación, empleando el régimen de oportunidad y modificando el diseño; para conocer el rendimiento del prototipo en condiciones óptimas.

Es ideal exponer el prototipo desarrollado a una demanda de trabajo, en diferentes ubicaciones geográficas. Utilizando este método, para la promoción y réplica del colector, ante usuarios en potencia.

Es recomendable que la Facultad de Ciencias Agropecuarias, siendo un pilar en el desarrollo de este tipo de investigaciones, invierta en la réplica de estas tecnologías, con fines de autoconsumo, docencia y extensión rural.

## 8. REFERENCIAS CITADAS

Abramovitz, JN; Bright, C; Brown, LR; Dunn, S; Flavin, C; French, HF; Gardner, G; McGinn, AP; Mitchell, J; Renner, M; Roodman; DM. 1998. La situación del mundo 1998: informe anual de Worldwatch Institute sobre medio ambiente y desarrollo (en línea). Chueca, F; Moyano, JA; Wang, B (trad(s)). Barcelona, ES, Icaria. 466 p. Consultado 11 jul. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=5K5ZBHJpqfsC&pg=PA466&dq=La+situacion+del+mundo+1998&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=La%20situacion%20del%20mundo%201998&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=5K5ZBHJpqfsC&pg=PA466&dq=La+situacion+del+mundo+1998&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=La%20situacion%20del%20mundo%201998&f=false)

Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías paraa la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (en línea). Roma, IT, FAO. Consultado 23 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=YJqytETfEnAC&pg=PA35&dq=medicion+de+la+humedad+relativa+del+aire&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=medicion%20de%20la%20humedad%20relativa%20del%20aire&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=YJqytETfEnAC&pg=PA35&dq=medicion+de+la+humedad+relativa+del+aire&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=medicion%20de%20la%20humedad%20relativa%20del%20aire&f=false)

Arcia, J. 2015. Exceso de hidroeléctricas ponen en riesgo seguridad alimentaria (en línea). La Estrella de Panamá, PA; 30 jul. Consultado 2 jun. 2016. Disponible en <http://laestrella.com.pa/panama/nacional/exceso-hidroelectricas-pone-riesgo-seguridad-alimentaria/23882295>

Ávila Gómez, AE; Beltrán Sarmiento, JF; Mendoza Fandiño, JM. 2010. Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta (en línea). Ingeniería y Desarrollo (27): 93 – 112. Consultado 20 jun. 2017. Disponible en <http://www.redalyc.org/html/852/85215207006/>

Ballesteros, M; Ferrando, F; García, G; Gonzales, A; Guerra, I; Heras, M; Lavandeira, J; López, C; Montes, M; Williart, A; Zarza, E. 2008. Fuentes de energía para el futuro (en línea). ES, MEPSYD. Consultado 15 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=EcpvEn3c8vcC&printsec=frontcover&q=fuentes+de+energia+para+el+futuro&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=EcpvEn3c8vcC&printsec=frontcover&q=fuentes+de+energia+para+el+futuro&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Bohn, M; Manglik, RM; Kreith, F. 2012. Principios de transferencia de calor (en línea). Trad. J León. 7 ed. México D.F., MX, CL. Consultado 17 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=xr4uAzjOquoC&printsec=frontcover&dq=transmision+de+calor&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=xr4uAzjOquoC&printsec=frontcover&dq=transmision+de+calor&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Bracamonte Baran, JH; Baritto Loreto, ML. 2013. Análisis de irreversibilidades en colectores solares de placas planas no isotérmicas para calentamiento de aire utilizando un modelo adimensional (en línea). Ingeniería Investigación y Tecnología 14(2): 237-247. Consultado 24 jun. 2017. Disponible en [http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplaresHTML/V14N2/V14N2\\_art08.php#citacion](http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplaresHTML/V14N2/V14N2_art08.php#citacion)

Brenes, A; Saborío VF. s.f. Elementos de climatología; su aplicación didáctica a Costa Rica (en línea). CR, EUED. Consultado 25 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=G-Bb7ovml3AC&pg=PA47&dq=medicion+de++de+la+velocidad+del+viento&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjl4\\_UkoXVAhVKTSYKHcwPB8MQ6AEIJDA#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=G-Bb7ovml3AC&pg=PA47&dq=medicion+de++de+la+velocidad+del+viento&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjl4_UkoXVAhVKTSYKHcwPB8MQ6AEIJDA#v=onepage&q&f=false)

Cabrera, J. 2011. Energía alternativa; captador solar plano (en línea). Consultado 2 abr. 2016. Disponible en <https://juanmacabrera.files.wordpress.com/2011/08/captador-solar-plano.pdf>

Cadena, C; Placco, C; Saravia, L. 2007. Colectores solares para agua caliente (en línea). Salta, AR, INENCO. Consultado 2 jun. 2016. Disponible en [http://www.inti.gob.ar/e-renova/pdf/colectores\\_solares\\_aguacaliente.pdf](http://www.inti.gob.ar/e-renova/pdf/colectores_solares_aguacaliente.pdf)

Castilla Prados, N. 2007. Invernaderos de plástico; tecnología y manejo (en línea). 2 ed. Madrid, ES, EMP. Consultado 7 jul. 2017. Disponible en <https://books.google.com.pa/books?id=paISAQAAQBAJ&pg=PA237&dq=estratificacion+del+aire&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiB-UiA4oDVAhUERYYKHbLAB9wQ6AEIIDA#v=onepage&q=estratificacion%20del%20aire&f=false>

Castillo, JR. 1994. Energía solar térmica: teoría y diseño de sistemas solares para el calentamiento de agua. Chiriquí, PA, UP. 29 p.

Corominas, J; Puig, J. 1990. La ruta de la energía (en línea). Barcelona, ES, Anthropos. Consultado 12 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=GMRZlZUfxGkC&pg=PA204&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=GMRZlZUfxGkC&pg=PA204&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Cortes Ibarra, L; Garibay Sánchez, R. s.f. Academia de bioinstrumentación; conceptos de sistemas dinámicos y estáticos (en línea). MX. Consultado 21 ago. 2017. Disponible en <http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Apuntes%20para%20la%20asignatura%20de%20instrumentaci%C3%B3n%20y%20control/cap2.pdf>

Costa, J; Cervera, M; Cunill, F; Esplugas, S; Mans, C; Mata, J. 2014. Curso de Ingeniería Química; introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte (en línea). Barcelona, ES, Reverté. Consultado 17 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=XZNYpvno\\_V8C&pg=PA55&dq=radiacion,+conduccion+y+conveccion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiwhrCN6drUAhXGXD4KHdMcApkQ6AEIJDA#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=XZNYpvno_V8C&pg=PA55&dq=radiacion,+conduccion+y+conveccion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiwhrCN6drUAhXGXD4KHdMcApkQ6AEIJDA#v=onepage&q&f=false)

Cuervo García, R; Méndez Muñiz, M. 2008. Energía Solar Térmica (en línea). Madrid, ES, FC. Consultado 13 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=9l2lOQTRe1UmuC&pg=PP4&dq=Cuervo+y+Mendez+2008&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj\\_m8zL0oXVAhUJrD4KHcljAucQ6AEILTAC#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=9l2lOQTRe1UmuC&pg=PP4&dq=Cuervo+y+Mendez+2008&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj_m8zL0oXVAhUJrD4KHcljAucQ6AEILTAC#v=onepage&q&f=false)

Dalpasquale, VA; De Queiroz DM; Marquez Pereira, JA; Sinicio R. 1991. Secado de granos; natural, solar y abajas temperaturas. Santiago, CL, FAO. Consultado 4 may. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058S00.htm>

De Llano Hernández, C. 1998. Física (en línea). 2 ed. México, D.F., MX, EP. Consultado 14 may. 2017. Disponible en <https://books.google.com.pa/books?id=xmOOAMBAFeEC&pg=PT209&dq=el+aire+transmite+calor&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwigt-OfoIPVAhUKOCYKHZMRBOEQuwUIIzAA#v=onepage&q&f=false>

De Witt, DP; Incropera, FP. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor (en línea). Trad. R Cruz. 4 ed. MX, PH. Consultado 18 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=QqfJw4tpljcC&printsec=frontcover&dq=conduccion+conveccion+y+radiacion&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=QqfJw4tpljcC&printsec=frontcover&dq=conduccion+conveccion+y+radiacion&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Definición de energía térmica o calorífica (en línea). s.f. Consultado 31 mar. 2016. Disponible en <http://energia-nuclear.net/definiciones/energia-calorifica.html>

Del Amo Sancho, A; Martínez Gracia, A. 2016. Instalaciones solares térmicas de baja temperatura (en línea). Zaragoza, ES, PUZ. Consultado 4 abr. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=7biQDQAAQBAJ&pg=PA13&dq=tipos+de+captadores+solares+aire&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=tipos%20de%20captadores%20solares%20aire&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=7biQDQAAQBAJ&pg=PA13&dq=tipos+de+captadores+solares+aire&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=tipos%20de%20captadores%20solares%20aire&f=false)

Díaz Velilla, JP. 2015. Sistemas de energías renovables (en línea). Madrid, ES, Paraninfo. Consultado 21 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=sKR9CAAQBAJ&pg=PA48&dq=captador+solar+termico+de+aire+caliente&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=sKR9CAAQBAJ&pg=PA48&dq=captador+solar+termico+de+aire+caliente&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Energía eléctrica colombiana es la sexta más cara de América Latina (en línea). 2014. El Heraldo, Bogotá, CO; 12 ago. Consultado 28 mar. 2016. Disponible en <http://www.elheraldo.co/economia/energia-electrica-colombiana-es-la-sexta-mas-cara-de-america-latina-162508>

FECMES (Federación Empresarial de Castilla-La Mancha de Economía Social). s.f. Luz verde; energía solar (en línea). Toledo, ES. Consultado 23 ene. 2017. Disponible en <http://www.fecmes.es/portal/Asociados/luzverde/actividad.asp?lang=eng>

FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido de México). 2012. Sistemas Térmicos Solares en Agronegocios (en línea). Consultado 23 jun. 2017. Disponible en <http://www.proyectedeenergiahrenovable.com/Descargas/SISTEMASTERMICOSSOLARESENAGRONEGOCIOS.pdf>

Flores Castro, E. 2008. El futuro energético de Panamá (en línea). Tecnociencia 10 (2): 128-129 p. Consultado 13 ago. 2017. Disponible en <http://biblioteca.clacso.edu.ar/Panama/cela/20120717103151/futuro.pdf>

Franco, P; Martínez, JC; Suarez, R. 2013. Manual Técnico de Energía Solar Térmica; Volumen II: Aspectos térmicos y normativos (en línea). UY. Consultado 20 jun. 2017. Disponible en [https://www.colibri.udelar.edu.uy/bitstream/123456789/7367/1/man-RTI\\_Vol2\\_v10.pdf](https://www.colibri.udelar.edu.uy/bitstream/123456789/7367/1/man-RTI_Vol2_v10.pdf)

Gliessman, SR. 2002. Agroecología; procesos ecológicos en agricultura sostenible (en línea). Turrialba, CR, CATIE. 359p. Consultado 11 ago. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=rnqan8BOVNAC&pg=PA73&dq=humedad+relativa&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=humedad%20relativa&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=rnqan8BOVNAC&pg=PA73&dq=humedad+relativa&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=humedad%20relativa&f=false)

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía, ES). Energía Solar térmica, cap. 4, Manuales de Energía Renovable (en línea) Consultado 12 Agosto 2016. Disponible en: [http://dl.idae.es/Publicaciones/10374\\_Energia\\_solar\\_termica\\_A2006.pdf](http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Energia_solar_termica_A2006.pdf)

Johnson WM; Whitman, WC. Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado (en línea). s.l., Paraninfo. Consultado 15 jul. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=9NZdB6eROI0C&pg=PA140&dq=colector+de+aire&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=9NZdB6eROI0C&pg=PA140&dq=colector+de+aire&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Jutglar, L. 2004. Energía Solar; energías alternativas y medio ambiente (en línea). Barcelona, ES, Ceac. Consultado 13 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=l0qPPTGMRUYC&printsec=frontcover&dq=energia+solar&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=l0qPPTGMRUYC&printsec=frontcover&dq=energia+solar&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Jutglar, L; Miranda, A; Villarubia, M. 2011. Manual de Calefacción (en línea). Barcelona, ES, Marcombo. Consultado 20 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=XAbSSfaTX54C&pg=PA294&dq=acumuladores+de+calor+de+aire&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=XAbSSfaTX54C&pg=PA294&dq=acumuladores+de+calor+de+aire&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Linares Gonzáles, V. 2017. Replanteo de instalaciones solares térmicas. ENAE02; montaje y mantenimiento de instalaciones solares térmicas (en línea). Málaga, ES, IC. Consultado 19 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=0homDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=sistemas+solares+termicos+de+baja,+media+y+alta+temperatura&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=0homDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=sistemas+solares+termicos+de+baja,+media+y+alta+temperatura&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Maestre, J.M. 2015. Domótica para ingenieros (en línea). Madrid, ES, Paraninfo. Consultado 23 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=BAHsBgAAQBAJ&pg=PA167&dq=cap+rador+solar+plano+para+aire+caliente&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=BAHsBgAAQBAJ&pg=PA167&dq=cap+rador+solar+plano+para+aire+caliente&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Marinkovic U, V. 2013. Panamá, un caso de crisis energética (en línea). El Día, PA; 15 may. Consultado 2 jun. 2016. Disponible en [https://www.eldia.com.bo/index.php?c=Opini%F3n&articulo=Panama,-un-caso-de-crisis-energetica&cat=162&pla=3&id\\_articulo=117279](https://www.eldia.com.bo/index.php?c=Opini%F3n&articulo=Panama,-un-caso-de-crisis-energetica&cat=162&pla=3&id_articulo=117279)

Mata Alcaraz, A. 2016. La radiación solar (en línea). s.l. Consultado 3 may. 2017. Disponible en <http://laradiacionsolar-alexis.blogspot.com/2016/05/>

Meinel, AB; Meinel MP. 1982. Aplicaciones de la energía solar (en línea). Barcelona, ES, Reverté. Consultado 16 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=pxEjgDdLlaoC&printsec=frontcover&dq=aplicacione+de+la+energia+solar&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=pxEjgDdLlaoC&printsec=frontcover&dq=aplicacione+de+la+energia+solar&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Millán Teja, S. 1998. Automatización mecánica y electromagnética (en línea). ES, Marcombo. Consultado 10 sep. 2017. 252p. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=pC\\_VJpPEMJ4C&pg=PA46&dq=que+es+el+caudal&hl=es-419&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=que%20es%20el%20caudal&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=pC_VJpPEMJ4C&pg=PA46&dq=que+es+el+caudal&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=que%20es%20el%20caudal&f=false)

Mujal, RM. 2003. Tecnología Eléctrica (en línea). 2 ed. Barcelona, ES, UPC. Consultado 18 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=tDzDoH5XLeIC&pg=PA302&dq=sistemas+fototermicos&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=tDzDoH5XLeIC&pg=PA302&dq=sistemas+fototermicos&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Peña, M. 2007. Termodinámica; manual de estudio de la universidad de El Salvador (en línea). Consultado 13 ago. 2017. Disponible en [https://academica.ues.edu.sv/uiu/elementos\\_estudio/ciencias\\_naturales/fisica/termodinamica/termodinamica.pdf](https://academica.ues.edu.sv/uiu/elementos_estudio/ciencias_naturales/fisica/termodinamica/termodinamica.pdf)

Rodríguez Galbarro, H. s.f. Instalaciones termosolares para la producción de agua caliente sanitaria (A.C.S.) (en línea). Sevilla, ES. Consultado 10 may. 2017. Disponible en <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn188.html>

Roldán Viloría, J. 2008. Fuentes de Energía (en línea). Ed. C De La Fuente. Madrid, ES, Paraninfo. Consultado 10 jun. 2016. Disponible en: [https://books.google.com.pa/books?id=1VSdl7o\\_t2kC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=1VSdl7o_t2kC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Roldán Viloría, J. 2012. Energías Renovables; lo que hay que saber (en línea). ES, Paraninfo. Consultado 12 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=KOMvRZVQOL8C&printsec=frontcover&dq=energias+renovables&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=KOMvRZVQOL8C&printsec=frontcover&dq=energias+renovables&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Romero Tous, M. 2009. Energía Solar Térmica (en línea). Barcelona, ES, Ceac. Consultado 16 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=K6Z\\_xtq9J0cC&pg=PA14&dq=lista+de+beneficios+de+la+energia+solar&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjE-oPS0e7UAhUELSYKHf4RBdkQ6AEIIDAA#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=K6Z_xtq9J0cC&pg=PA14&dq=lista+de+beneficios+de+la+energia+solar&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjE-oPS0e7UAhUELSYKHf4RBdkQ6AEIIDAA#v=onepage&q&f=false)

Rufes Martínez, P. 2010. Energía solar térmica: técnicas para su aprovechamiento; nuevas energías (en línea). Barcelona, ES, Marcombo. Consultado 12 jun. 2017. Disponible en [https://books.google.com.pa/books?id=Gu6FIQXKHmEC&pg=PT17&dq=origen+energias+no+renovables&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pa/books?id=Gu6FIQXKHmEC&pg=PT17&dq=origen+energias+no+renovables&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Ruiz de Elvira, A. 2014. ¿Por qué podría sustituir la energía solar a los combustibles fósiles? (en línea). El Mundo, ES, 29 jun. Consultado 15 jun. 2017. Disponible en <http://www.elmundo.es/blogs/elmundo/elporquedelascosas/2014/06/29/por-que-podria-sustituir-la-energia.html>

SAGARPA (Secretaría De Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación), 2007. Aprovechamiento de la energía solar térmica en el sector agropecuario (en línea) MX. Consultado 1 de abr. 2016. Disponible en <http://sigan.org/2010/pdf/calentadores.pdf>

Santamarta, J. 2004. Las energías renovables son el futuro: La edad de piedra no acabó por falta de piedras, y la era de los combustibles fósiles tampoco terminará por el agotamiento del petróleo, el gas natural y el carbón (En línea). World Watch (22): 34-40. Consultado 7 jul. 2017. Disponible en <https://www.nodo50.org/worldwatch/ww/pdf/Renovables.pdf>

Sawin, JL. 2015. Reporte de la situación mundial de las energías renovables (en línea). FR. REN21. Consultado 2 jun. 2016. Disponible en [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015\\_Key-Findings\\_SPANISH.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015_Key-Findings_SPANISH.pdf)

Trejos Castillo, N. 2011. Recursos hídricos Panamá (en línea). PA, CATALAC. Consultado 2 jun. 2016. Disponible en <http://www.libertadciudadana.org/archivos/Biblioteca%20Virtual/Documentos%20Informes%20Indigenas/Nacionales/Salud%20y%20Pobreza/Recurso%20Hidricos%20Panama%202011.pdf>

UV (Universidad del Valle). 2011. Energía renovable y desarrollo sostenible en Bolivia; La energía solar y su importancia (en línea). BO. Journal Boliviano de Ciencias. Consultado 2 abr. 2016. Disponible en <http://eerrbolivia.blogspot.com/2011/06/la-energia-solar-y-su-importancia.html>

Valdés Marín, P. 2008. Manual de deshidratación I (en línea). s.l. Consultado 3 oct. 2017. Disponible en <http://manualdeshidratacion2.blogspot.com/>

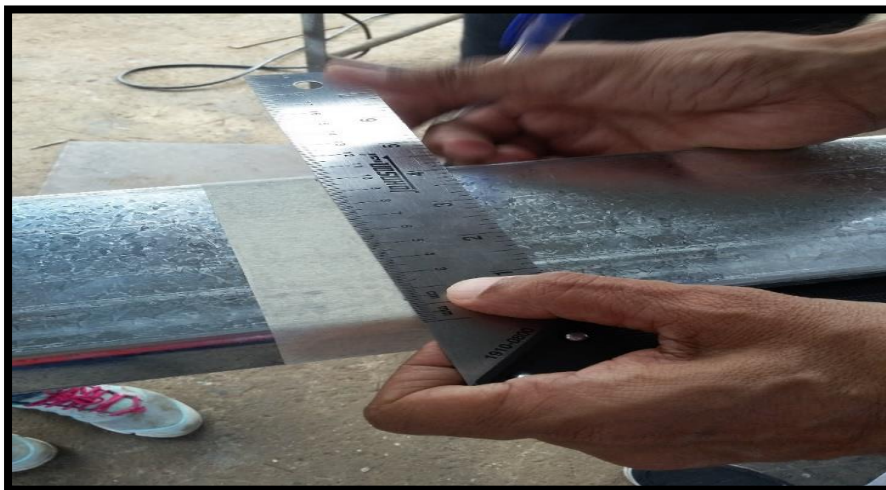
**ANEXOS**

**ANEXO 1.** Presupuesto de los materiales utilizados en la construcción del colector solar

<b>MATERIALES</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR PAGADO (B/.) POR UNIDAD</b>	<b>TOTAL (B/.)</b>
Fascia galvanizada	1	17.50	17.50
Tabla de pino	1	17.00	17.00
Lámina de zinc liso	1	9.00	9.00
Placa de vidrio	1	35.00	35.00
Tramo de tubo de cobre	1	50.00	50.00
Codos de cobre	13	0.25	3.25
tapones de cobre	9	0.20	1.80
Tornillos de acero inoxidable 4.8mm x 3.81 cm	9	0.35	3.15
Tornillos de acero inoxidable de 4.8mm x 2.54cm	44	0.25	11.00
Remaches	16	0.06	0.96
Grapas metálicas	15	0.35	5.25
Aislante térmico	2	10.00	20.00
Silicona	1	7.45	7.45
Spray	1	5.00	5.00
Barniz	1	8.50	8.50
Thinner	1	4.75	4.75
Pintura	1	11.95	11.95
<b>SUBTOTAL</b>			<b>211.56</b>
<b>IMPUESTOS (7%)</b>			<b>14.81</b>
<b>TOTAL</b>			<b>226.37</b>



**ANEXO 2.** Limpieza de la fascia



**ANEXO 3.** Marcación del límite en la parte externa de la fascia



**ANEXO 4.** Marcación de las intersecciones de la fascia con el centropunto



**ANEXO 5.** Perforación de intersecciones de la fascia



**ANEXO 6.** Estampador de esquinas



**ANEXO 7.** Corte de pestañas en la fascia



**ANEXO 8.** División de la fascia



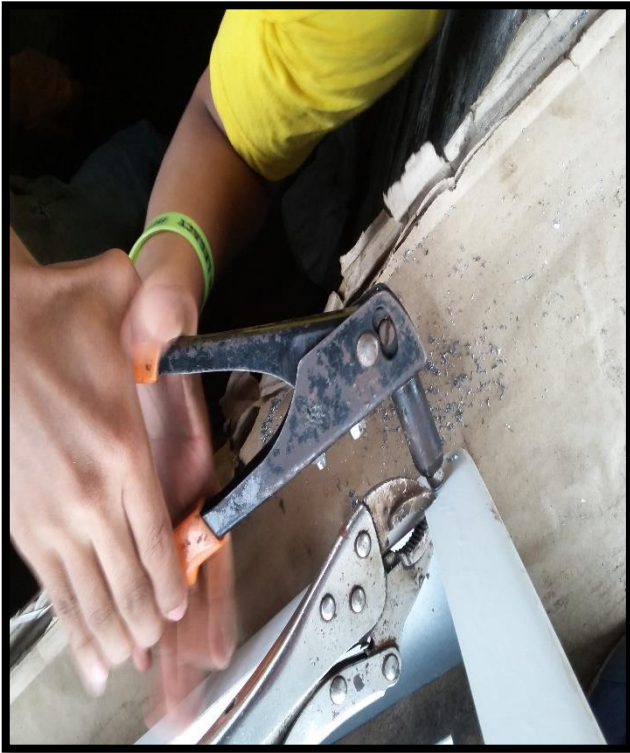
**ANEXO 9.** Desbaste del borde filoso de la fascia



**ANEXO 10.** Escuadre de la fascia



**ANEXO 11.** Pintado de la fascia



**ANEXO 12.** Remachado de la fascia



**ANEXO 13.** Fascia a escuadra



**ANEXO 14.** Aislamiento interno de la fascia



**ANEXO 15.** Limpieza de la tabla de madera



**ANEXO 16.** Barnizado de la madera



**ANEXO 17.** Seccionamiento de la madera



**ANEXO 18.** Centrado de la madera en el marco



**ANEXO 19.** Atornillado de la cubierta aislante



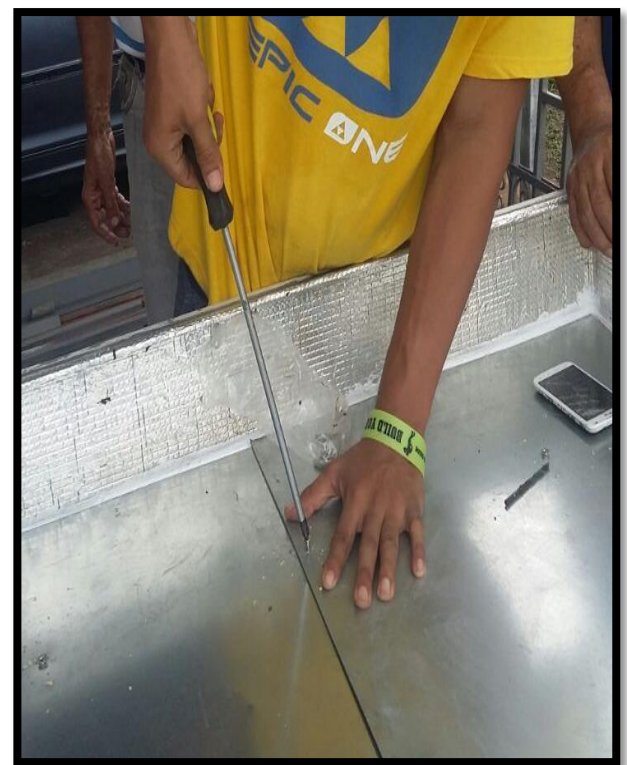
**ANEXO 20.** Cubierta aislante



**ANEXO 21.** Corte de láminas metálicas



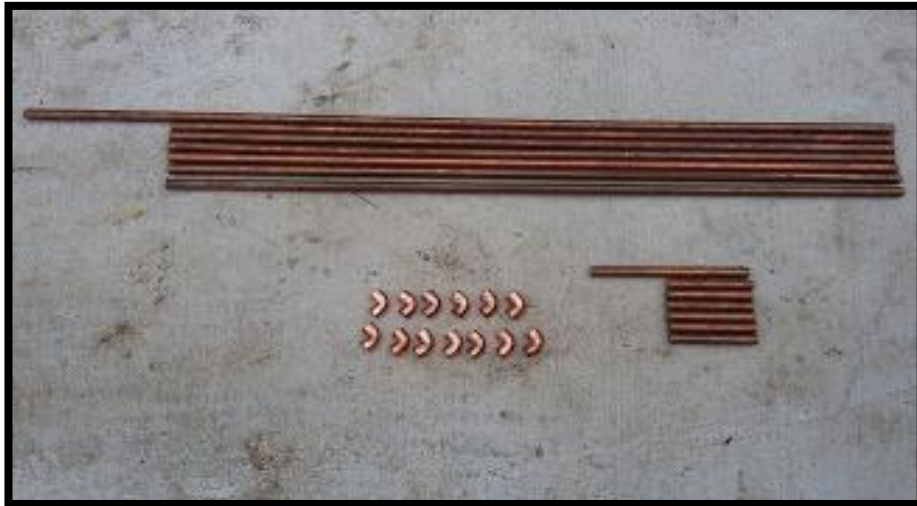
**ANEXO 22.** Perforación del fondo retenedor



**ANEXO 23.** Atornillado del fondo retenedor



**ANEXO 24.** Cortatubos



**ANEXO 25.** Secciones de tubería



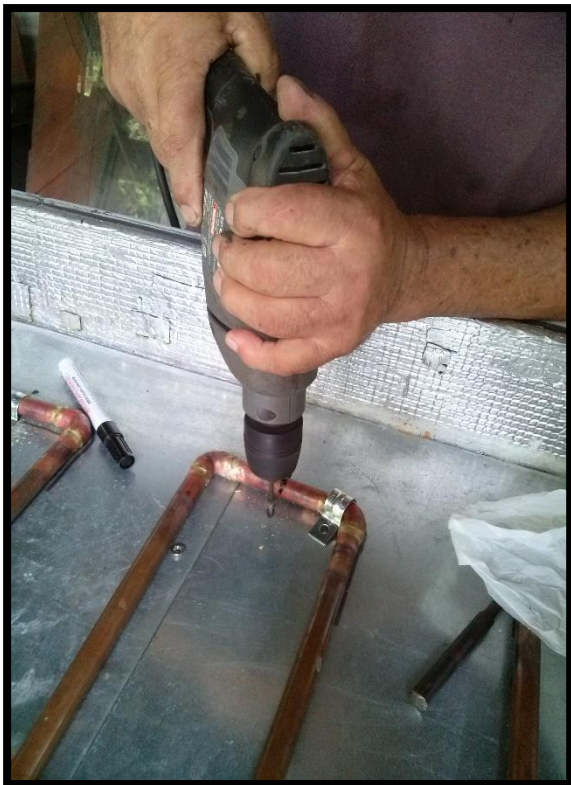
**ANEXO 26.** Tubería soldada en forma de parrilla



**ANEXO 27.** Prueba de fugas en la tubería



**ANEXO 28.** Colocación de la tubería dentro del marco del colector



**ANEXO 29.** Engrape de la tubería



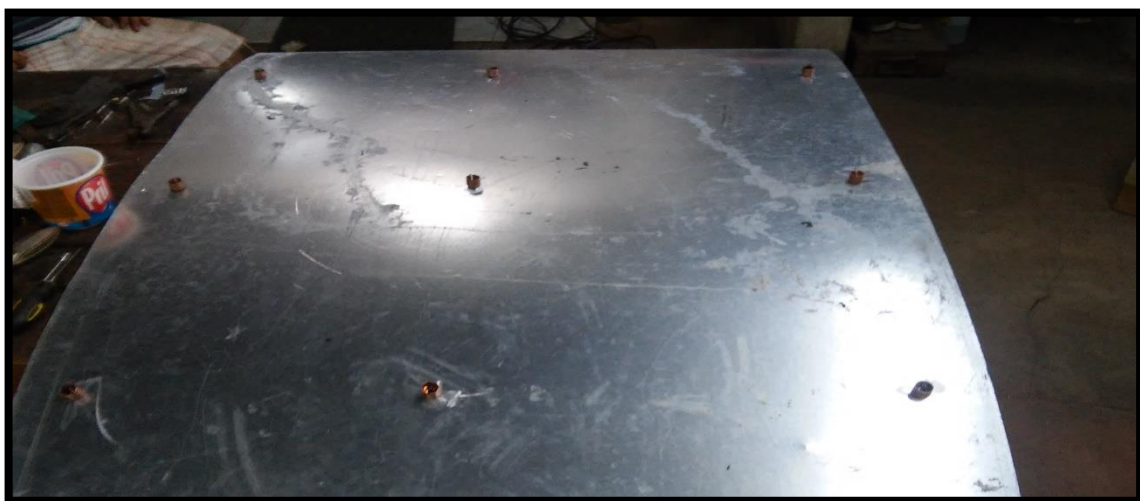
**ANEXO 30.** Tubería adaptada al colector



**ANEXO 31.** Pintado de la tubería y del fondo retenedor de calor



**ANEXO 32.** Distribución de tapones de cobre



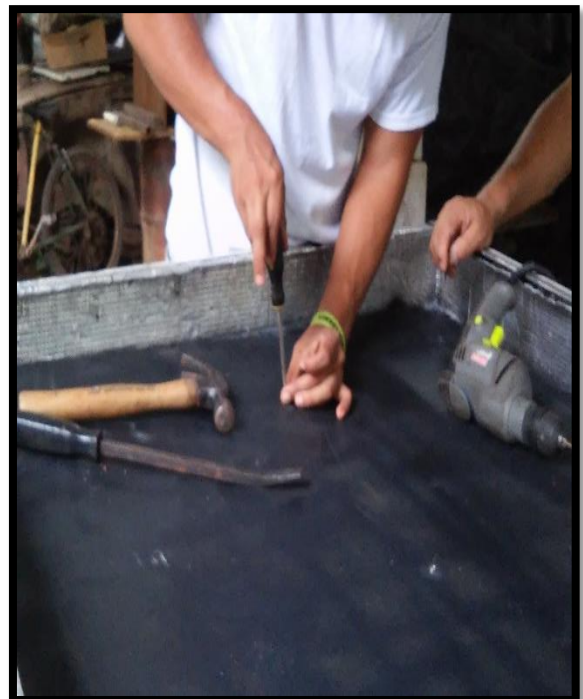
**ANEXO 33.** Tapones de cobre adaptados a la placa absorbadora de calor



**ANEXO 34.** Sobrepuesto de la placa captadora de calor



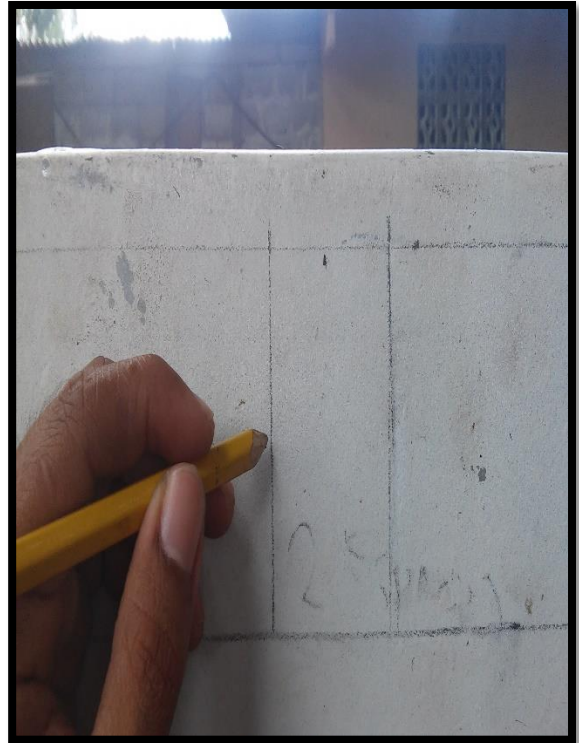
**ANEXO 35.** Instalación de la placa captadora



**ANEXO 36.** Adaptación de la placa captadora



**ANEXO 37.** Aislamiento del borde de la placa captadora



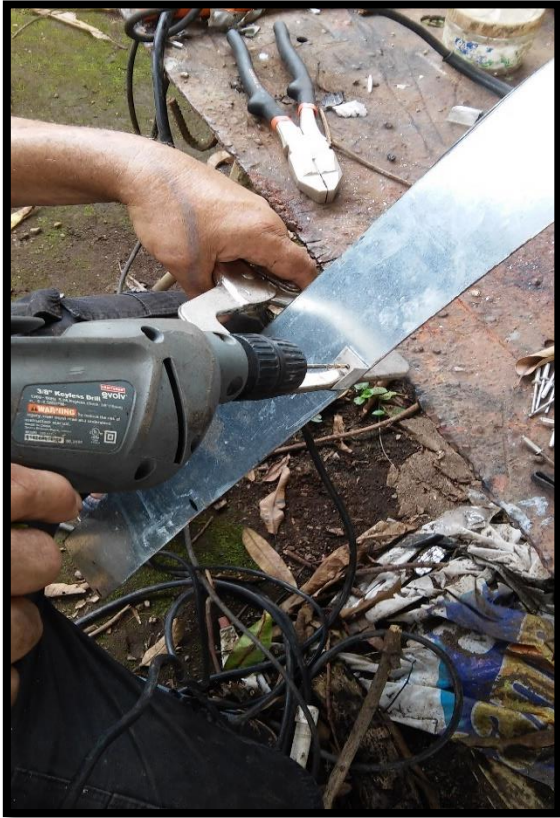
**ANEXO 38.** Medición de los espacios de entrada y salida del aire



**ANEXO 39.** Salidas de aire remarcadas



**ANEXO 40.** Abertura del área de paso de aire



**ANEXO 41.** Perforación del protector contra lluvias



**ANEXO 42.** Adaptación del protector contra lluvias



**ANEXO 43.** Protector contra lluvia adaptado al colector



**ANEXO 44.** Protector contra lluvia con aislante térmico



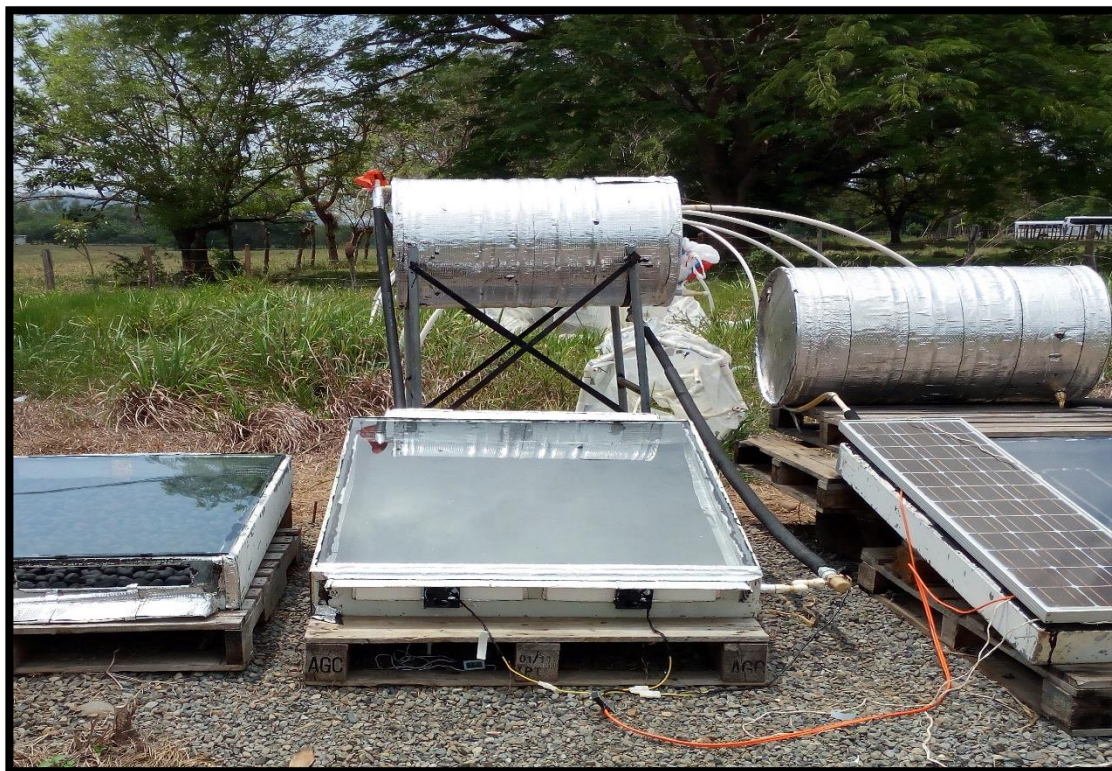
**ANEXO 45.** Cordón de adhesivo de poliuretano sobre el marco del colector



**ANEXO 46.** Instalación de la cubierta transparente



**ANEXO 47.** Prototipo de colector solar plano bifluidos



**ANEXO 48.** Colector adaptado al SST, funcionando durante un día soleado



**ANEXO 49.** Colector adaptado al SST, funcionando durante un día lluvioso



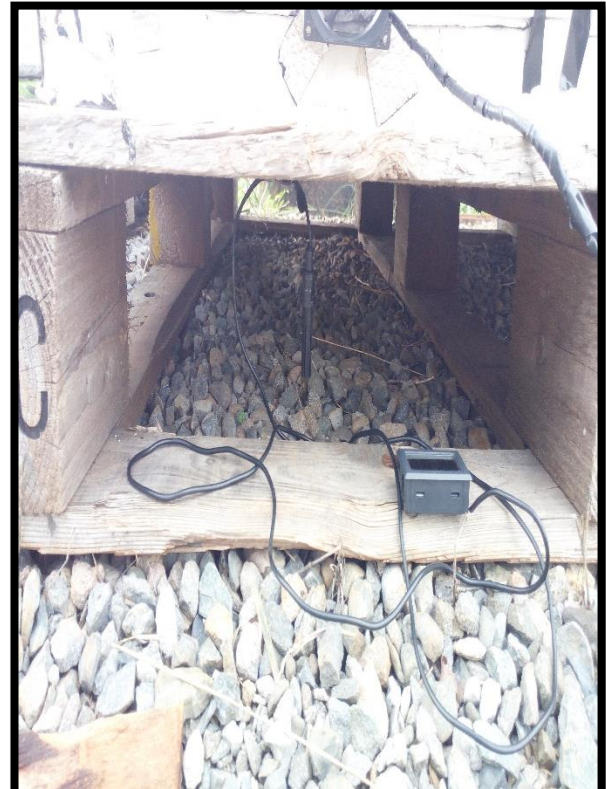
**ANEXO 50.** Termómetro de medición del agua de ingreso



**ANEXO 51.** Termómetro de medición del agua en el punto medio del colector



**ANEXO 52.** Termoanemómetro



**ANEXO 53.** Micro termohigrómetro



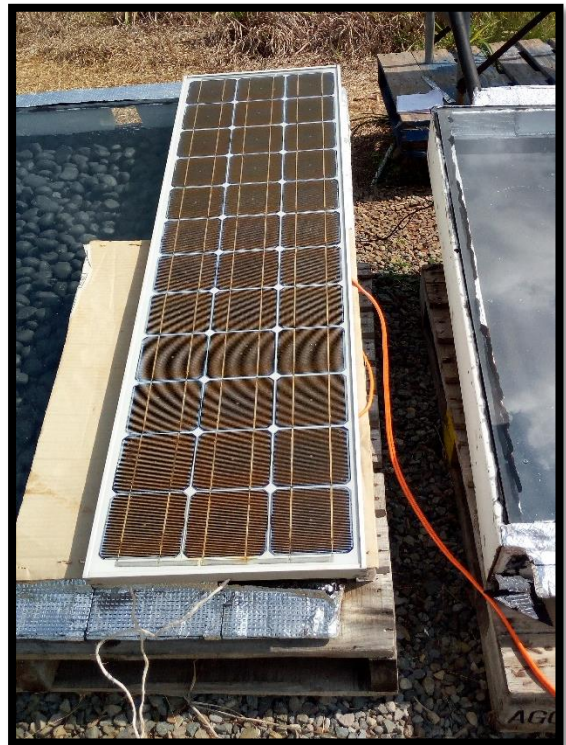
**ANEXO 54.** Regleta de conexión de componentes auxiliares



**ANEXO 55.** Bomba recirculadora



**ANEXO 56.** Ventiladores



**ANEXO 57.** Panel fotovoltaico



**ANEXO 58.** Medición de la temperatura del agua de ingreso con el termómetro de inmersión



**ANEXO 59.** Medición de la temperatura y humedad relativa del aire de escape con el micro termohigrómetro

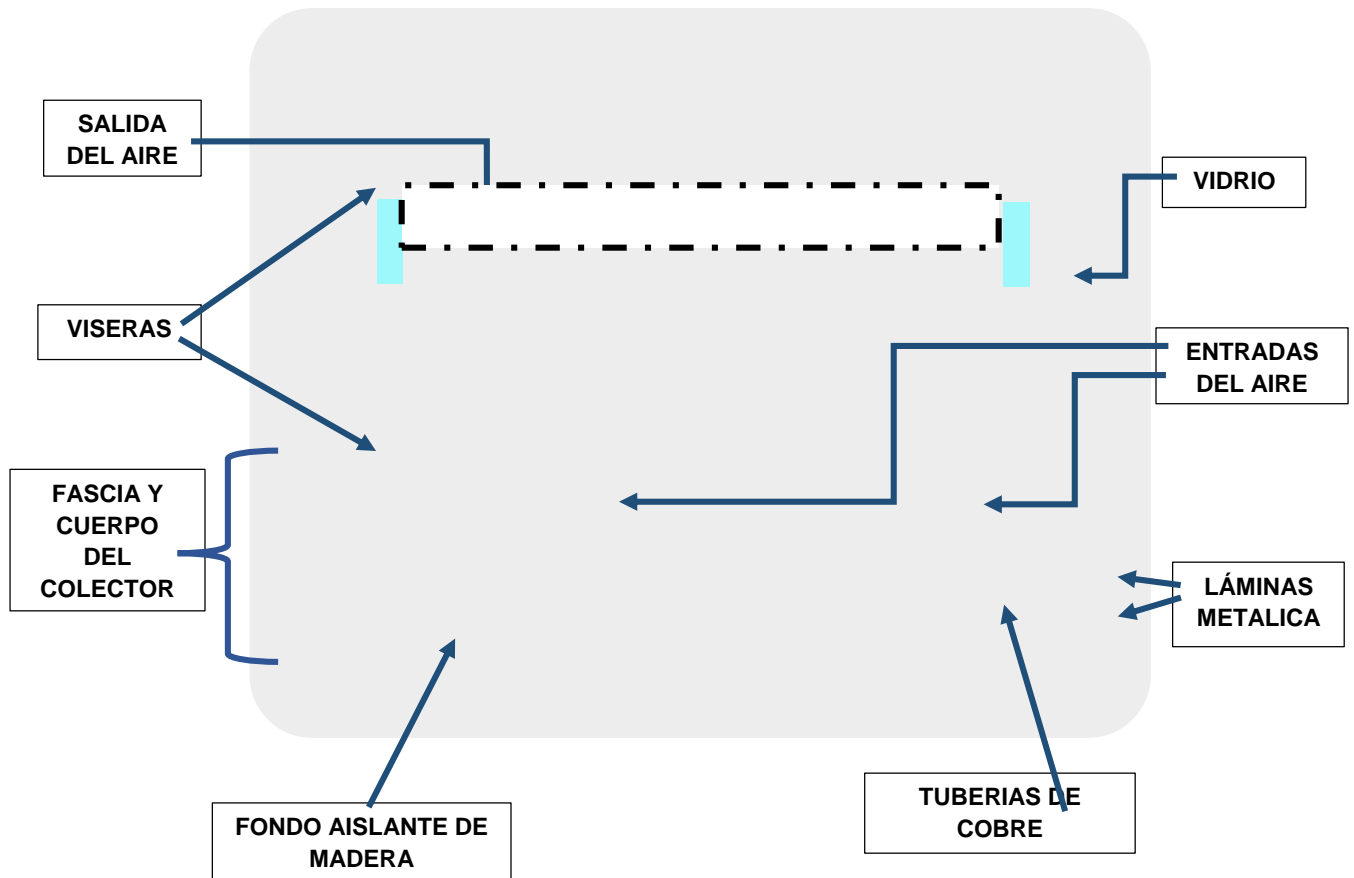


**ANEXO 60.** Medición del caudal del aire de escape con el termoanemómetro



**ANEXO 61.** Medición de la radiación solar con el actinógrafo

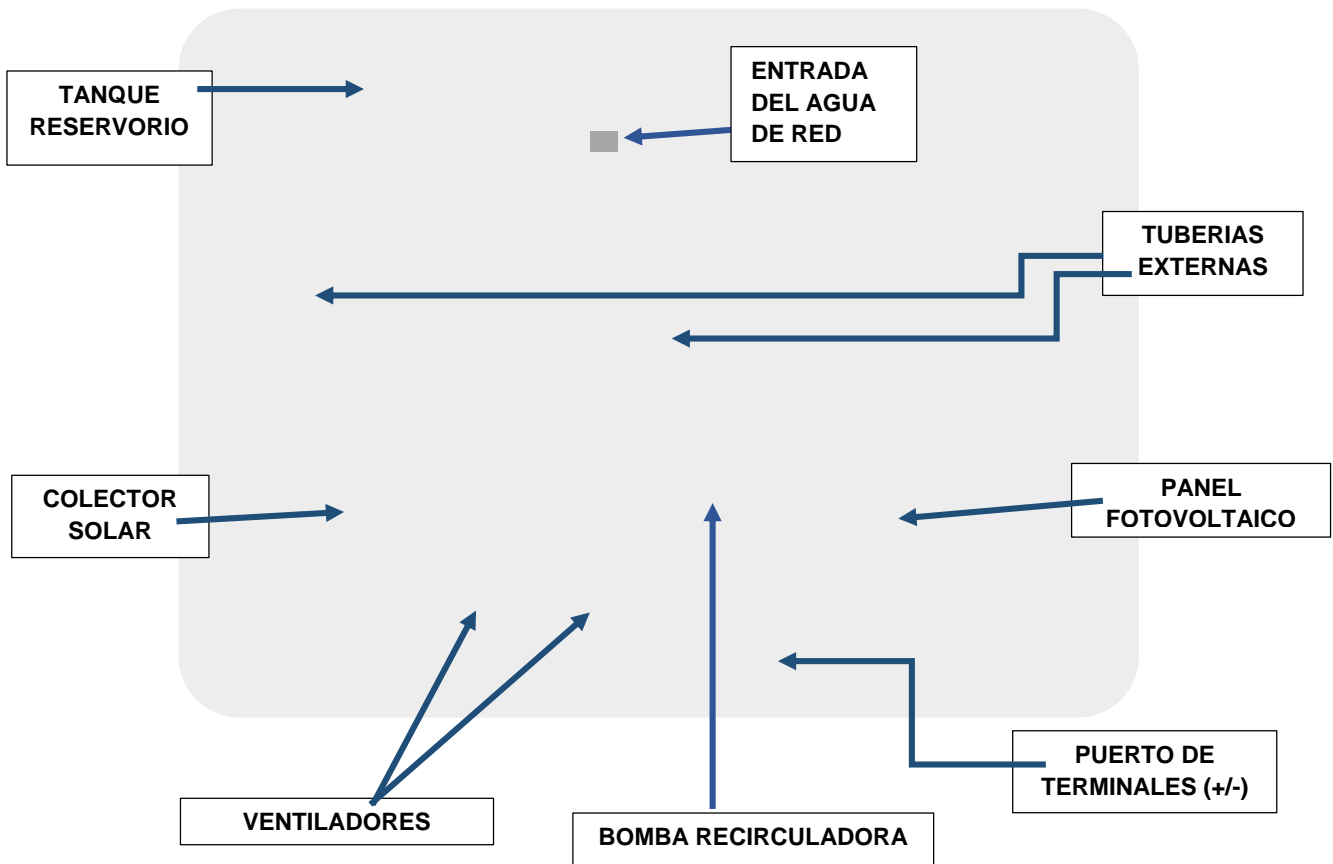
### ANEXO 62. Croquis de las partes del colector solar



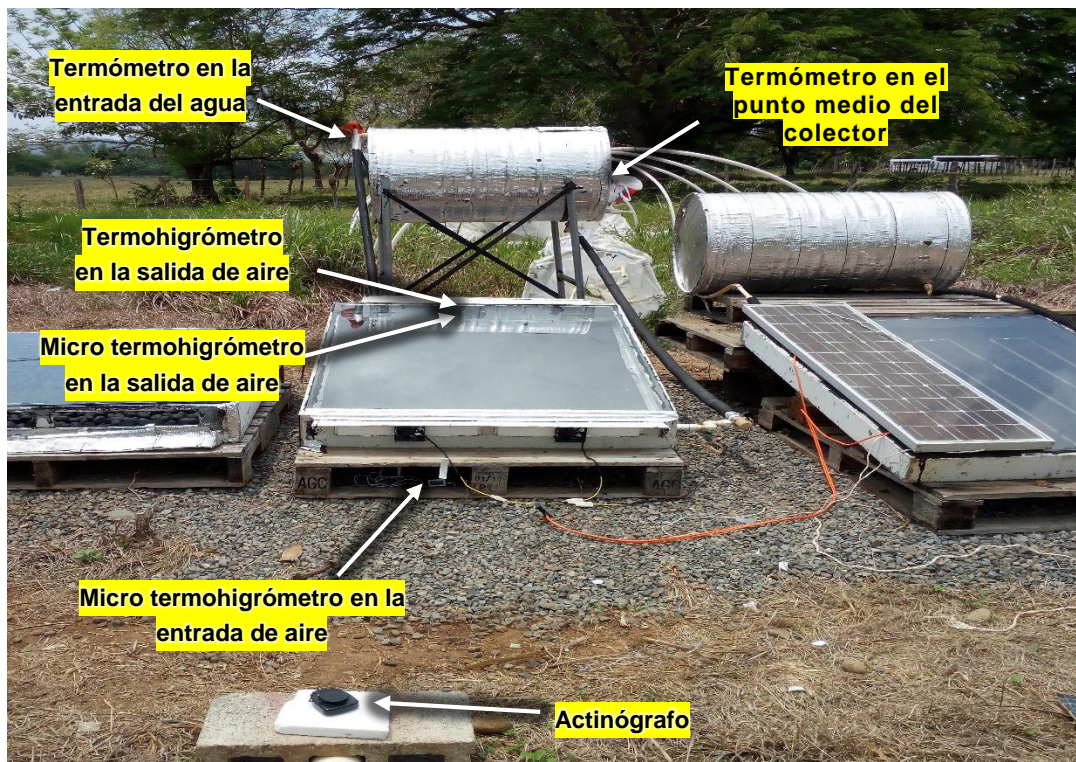
### ANEXO 63. Croquis de la tubería en forma de parrilla



### ANEXO 64. Croquis del colector solar con el SST



### ANEXO 65. Croquis del posicionamiento de los instrumentos de medición



**ANEXO 66.** Promedios por hora obtenidos bajo el modo de agua precalentada y aire precalentado

HORA	AGUA				AIRE					Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )
	Temperatura (°C)			Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Caudal (m <sup>3</sup> /min)	
	Trw	Tiw	Tmw	Qiw	Tia	Tea	Hria	Hrea	Qea	
<b>08:00 - 09:00</b>	27.21	28.18	28.14	0.0060	27.88	32.92	89.05	70.40	0.73	348.40
<b>09:00 - 10:00</b>	27.89	29.58	28.93	0.0062	30.15	40.87	80.60	46.00	0.80	561.15
<b>10:00 - 11:00</b>	27.97	30.99	30.00	0.0065	31.99	45.65	71.45	34.30	0.81	711.05
<b>11:00 - 12:00</b>	29.01	32.10	31.16	0.0065	33.19	47.79	66.65	30.75	0.82	723.55
<b>12:00 - 13:00</b>	29.55	33.32	32.32	0.0065	33.59	49.58	65.35	27.35	0.75	689.70
<b>13:00 - 14:00</b>	29.58	34.20	33.33	0.0065	33.53	49.66	66.18	27.68	0.85	764.33
<b>14:00 - 15:00</b>	29.46	35.45	34.48	0.0065	34.44	51.35	62.45	20.60	0.83	778.95
<b>15:00 - 16:00</b>	29.54	36.01	35.33	0.0062	33.45	45.85	63.80	27.90	0.84	524.45
<b>16:00 - 17:00</b>	29.35	35.47	35.64	0.0060	31.96	38.64	68.15	43.90	0.65	228.40
<b>17:00 - 18:00</b>	28.91	32.68	35.62	0.0038	30.37	33.66	76.45	60.65	0.30	94.60
<b>18:00 - 19:00</b>	28.54	30.80	35.78	0.0025	29.48	31.10	80.33	69.50	0.06	33.08
<b>PROMEDIO</b>	<b>28.82</b>	<b>32.61</b>	<b>32.79</b>	<b>0.0057</b>	<b>31.82</b>	<b>42.46</b>	<b>71.86</b>	<b>41.73</b>	<b>0.68</b>	<b>496.15</b>

Temperatura del agua de red (Trw), Temperatura del agua de ingreso (Tiw), Temperatura del agua en el punto medio (Tmw), Caudal del agua de ingreso (Qiw), Temperatura del aire de ingreso (Tiw), Temperatura del aire de escape (Tea), Humedad relativa del aire de ingreso (Hria), Humedad relativa del aire de escape (Hrea), Caudal del aire de escape (Qea), Radiación solar (Rs).

**ANEXO 67.** Promedios por hora obtenidos bajo el modo de agua precalentada

HORA	AGUA				Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )
	Temperatura (°C)		Caudal (m <sup>3</sup> /min)		
PROMEDIOS POR HORA OBTENIDOS BAJO EL MODO DE AGUA PRECALENTADA	T <sub>trw</sub>	T <sub>tiw</sub>	T <sub>tmw</sub>	Q <sub>iw</sub>	vs RADIACION SOLAR RECIBIDA
08:00 - 09:00	27.60	30.81	30.67	0.0060	493.25
09:00 - 10:00	28.09	32.46	31.58	0.0062	692.95
10:00 - 11:00	28.65	34.00	32.89	0.0065	845.20
11:00 - 12:00	28.97	35.55	34.32	0.0065	872.15
12:00 - 13:00	29.31	36.94	35.68	0.0065	840.55
13:00 - 14:00	29.56	38.28	37.01	0.0065	984.90
14:00 - 15:00	29.61	39.03	38.08	0.0065	804.15
15:00 - 16:00	29.60	39.19	38.64	0.0062	429.90
16:00 - 17:00	29.23	36.40	38.67	0.0060	162.10
17:00 - 18:00	29.19	33.64	39.11	0.0038	89.46
18:00 - 19:00	29.65	37.37	39.10	0.0025	49.67
<b>PROMEDIO</b>	<b>29.04</b>	<b>35.79</b>	<b>35.98</b>	<b>0.0057</b>	<b>569.48</b>

Temperatura del agua de red (T<sub>trw</sub>), Temperatura del agua de ingreso (T<sub>tiw</sub>), Temperatura del agua en el punto medio (T<sub>tmw</sub>), Caudal del agua de ingreso (Q<sub>iw</sub>), Radiación solar (R<sub>s</sub>).

**ANEXO 68.** Promedios por hora obtenidos bajo el modo de aire precalentado

HORA	AIRE				Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	
	Temperatura		Humedad relativa			Caudal
PROMEDIOS POR HORA OBTENIDOS BAJO EL MODO DE AGUA PRECALENTADA	T <sub>tiw</sub>	T <sub>tea</sub>	H <sub>ria</sub>	H <sub>rea</sub>	Q <sub>ea</sub>	vs RADIACION SOLAR RECIBIDA
08:00 - 09:00	28.30	35.91	87.10	60.95	0.85	456.70
09:00 - 10:00	30.65	46.80	78.55	30.00	0.90	680.20
10:00 - 11:00	32.31	50.94	70.00	21.25	0.91	774.75
11:00 - 12:00	33.97	56.09	62.50	13.20	0.91	876.80
12:00 - 13:00	34.40	54.39	60.45	16.40	0.95	784.85
13:00 - 14:00	33.94	51.21	63.65	18.70	0.93	728.85
14:00 - 15:00	33.79	51.15	61.75	22.80	0.90	625.25
15:00 - 16:00	31.69	41.01	73.03	41.25	0.70	249.87
16:00 - 17:00	30.00	33.79	83.65	64.42	0.40	98.92
17:00 - 18:00	29.41	30.88	86.17	71.50	0.18	42.83
<b>PROMEDIO</b>	<b>31.84</b>	<b>45.21</b>	<b>72.68</b>	<b>36.05</b>	<b>0.76</b>	<b>531.90</b>

Temperatura del aire de ingreso (T<sub>tiw</sub>), Temperatura del aire de escape (T<sub>tea</sub>), Humedad relativa del aire de ingreso (H<sub>ria</sub>), Humedad relativa del aire de escape (H<sub>rea</sub>), Caudal del aire de escape (Q<sub>ea</sub>), Radiación solar (R<sub>s</sub>).

**ANEXO 69.** Valores delta utilizados para el desarrollo del análisis estadístico del modo de agua precalentada y aire precalentado

HORA	AGUA				AIRE			Radiación Solar
	$\Delta Tw_1$	$\Delta Tw_2$	$\Delta Tw_3$	$\Delta Q_{iw}$	$\Delta Ta$	$\Delta H_{ra}$	$\Delta Q_{ea}$	
08:00 - 09:00	0.97	0.93	0.04	0.0060	5.04	-18.65	0.73	348.40
09:00 - 10:00	1.69	1.04	-0.65	0.0062	10.72	-34.60	0.80	561.15
10:00 - 11:00	3.02	2.03	0.99	0.0065	13.66	-37.15	0.81	711.05
11:00 - 12:00	3.09	2.15	0.95	0.0065	14.60	-35.90	0.82	723.55
12:00 - 13:00	3.77	2.77	1.00	0.0065	15.99	-38.00	0.75	689.70
13:00 - 14:00	4.62	3.75	0.87	0.0065	16.13	-38.50	0.85	764.33
14:00 - 15:00	5.99	5.02	0.97	0.0065	16.91	-41.85	0.83	778.95
15:00 - 16:00	6.46	5.79	0.68	0.0062	12.41	-35.90	0.84	524.45
16:00 - 17:00	6.11	6.29	-0.17	0.0060	6.68	-24.25	0.65	228.40
17:00 - 18:00	3.77	6.70	-2.94	0.0038	3.30	-15.80	0.30	94.60
18:00 - 19:00	2.26	7.24	-4.98	0.0025	1.62	-10.83	0.06	33.08

$\Delta Tw_1$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta Tw_2$ = Valor de la diferencia de  $T_{mw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta Tw_3$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{mw}$

$Q_{iw}$ = Caudal del agua de ingreso

$\Delta Ta$ = Valor de la diferencia de  $T_{ia}$  -  $T_{ea}$

$\Delta H_{ra}$ = Valor de la diferencia de  $H_{rea}$  -  $H_{ria}$

$Q_{ea}$ = Caudal del aire de escape

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), Temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), Temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ), Temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ), Temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ), Humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ), Humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ).

**ANEXO 70.** Valores delta utilizados para el desarrollo del análisis estadístico del modo de agua precalentada

HORA	AGUA				Radiación Solar
	$\Delta T_{w1}$	$\Delta T_{w2}$	$\Delta T_{w3}$	$\Delta Q_{iw}$	
08:00 - 09:00	3.21	3.07	0.14	0.0060	493.25
09:00 - 10:00	4.37	3.49	0.88	0.0062	692.95
<b>PROMEDIOS POR HORA OBTENIDOS BAJO EL MODO DE AGUA PRECALENTADA</b>	5.35	4.24	1.11	0.0065	845.20
<b>11:00 vs RADIACION SOLAR RECIBIDA</b>	5.35	1.23		0.0065	872.15
12:00 - 13:00	7.63	6.37	1.26	0.0065	840.55
13:00 - 14:00	8.72	7.45	1.27	0.0065	984.90
14:00 - 15:00	9.42	8.47	0.95	0.0065	804.15
15:00 - 16:00	9.59	9.04	0.56	0.0062	429.90
16:00 - 17:00	7.17	9.44	-2.28	0.0060	162.10
17:00 - 18:00	4.45	9.93	-5.48	0.0038	89.46
18:00 - 19:00	7.72	9.45	-1.73	0.0025	49.67

$\Delta T_{w1}$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta T_{w2}$ = Valor de la diferencia de  $T_{mw}$  -  $T_{rw}$

$\Delta T_{w3}$ = valor de la diferencia de  $T_{iw}$  -  $T_{mw}$

$Q_{iw}$ = Caudal del agua de ingreso

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del agua de red ( $T_{rw}$ ), Temperatura del agua de ingreso ( $T_{iw}$ ), Temperatura del agua en el punto medio ( $T_{mw}$ ).

**ANEXO 71.** Valores delta utilizados para el desarrollo del análisis estadístico del modo de aire precalentado

HORA	AIRE			Radiación Solar
	$\Delta T_a$	$\Delta H_{ra}$	$\Delta Q_{ea}$	
08:00 - 09:00	7.61	-26.15	0.85	456.70
09:00 - 10:00	16.15	-48.55	0.90	680.20
<b>PROMEDIOS POR HORA OBTENIDOS BAJO EL MODO DE AGUA PRECALENTADA</b>	18.64	-48.75	0.91	774.75
<b>11:00 vs RADIACION SOLAR RECIBIDA</b>	23.13	-49.30	0.91	876.80
12:00 - 13:00	19.99	-44.05	0.95	784.85
13:00 - 14:00	17.27	-44.95	0.93	728.85
14:00 - 15:00	17.36	-38.95	0.90	625.25
15:00 - 16:00	9.32	-31.78	0.70	249.87
16:00 - 17:00	3.79	-19.23	0.40	98.92
17:00 - 18:00	1.47	-14.67	0.18	42.83

$\Delta T_a$ = Valor de la diferencia de  $T_{ia}$  -  $T_{ea}$

$\Delta H_{ra}$ = Valor de la diferencia de  $H_{rea}$  -  $H_{ria}$

$Q_{ea}$ = Caudal del aire de escape

$R_s$ = Radiación solar

Temperatura del aire de ingreso ( $T_{ia}$ ), Temperatura del aire de escape ( $T_{ea}$ ), Humedad relativa del aire de ingreso ( $H_{ria}$ ), Humedad relativa del aire de escape ( $H_{rea}$ ).



### ANEXO 73. Formulario de medición para el modo B

FORMULARIO DE DATOS  
 PROTOTIPO COLECTOR SOLAR PLANO BIFLUIDOS  
 MODO B. AGUA PRECALENTADA

Día no. \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

PROMEDIOS POR HORA	OBTENIDOS BAJO EL MODO DE AGUA PRECALENTADA				Caudal (m <sup>3</sup> /min)	RADIACION SOLAR (W/m <sup>2</sup> )
	HORA	TEMPERATURA				
		Trw	Tiw	Tew		
	RADIACION SOLAR RECIBIDA (W/m <sup>2</sup> )					
8:00						
8:15						
8:30						
8:45						
9:00						
9:15						
9:30						
9:45						
10:00						
10:15						
10:30						
10:45						
11:00						
11:15						
11:30						
11:45						
12:00						
12:15						
12:30						
12:45						
13:00						
13:15						
13:30						
13:45						
14:00						
14:15						
14:30						
14:45						
15:00						
15:15						
15:30						
15:45						
16:00						
16:15						
16:30						
16:45						
17:00						
17:15						
17:30						
17:45						
18:00						
18:15						
18:30						

## ANEXO 74. Formulario de medición para el modo C

FORMULARIO DE DATOS  
 PROTOTIPO COLECTOR SOLAR PLANO BIFLUIDOS  
 MODO C. AIRE PRECALENTADO

PROMEDIOS POR HORA OBTENIDOS BAJO EL MODO DE AGUA PRECALENTADA

HORA	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Caudal (m <sup>3</sup> /min)	RADIACION SOLAR (W/m <sup>2</sup> )
	Tia	Tea	Hriw	Hrew		
	8:00					
8:15						
8:30						
8:45						
9:00						
9:15						
9:30						
9:45						
10:00						
10:15						
10:30						
10:45						
11:00						
11:15						
11:30						
11:45						
12:00						
12:15						
12:30						
12:45						
13:00						
13:15						
13:30						
13:45						
14:00						
14:15						
14:30						
14:45						
15:00						
15:15						
15:30						
15:45						
16:00						
16:15						
16:30						
16:45						
17:00						
17:15						
17:30						
17:45						
18:00						
18:15						
18:30						