



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y
LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE DOS PROTOTIPOS DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA (COBRE, ALUMINIO), FABRICADOS SEGÚN DOS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS (ACANALADO Y SOLDADO)”.

**TESIS DE GRADO PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

AUTORES:

Pedro José Tapia Escalante

Anderson Rigoberto Cuenca Satama

1859

DIRECTOR:

Ing. Milton Amable León Tapia

Loja - Ecuador

2010

CERTIFICACIÓN

Ing. Milton Amable León tapia, Director de la Tesis, cuyo tema versa en “**Análisis de la eficiencia energética de dos prototipos de colectores solares de placa plana (Cobre, Aluminio), fabricados según dos técnicas constructivas (Acanalado y Soldado)**” de la carrera de *Ingeniería Electromecánica* de la *Universidad Nacional de Loja*, a petición de la parte interesada;

CERTIFICA:

Que el presente *Proyecto de Investigación* fue elaborado bajo mi dirección, y una vez que ha sido culminado, autorizo la presentación del mismo para los fines legales pertinentes.

Loja, 03 de Marzo del 2010

.....
Ing. Milton Amable León Tapia
DIRECTOR DE TESIS.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Las ideas, hechos, principios, conceptos y resultados vertidos en el presente proyecto de tesis, son de exclusivo responsabilidad de los autores que firman a continuación, quienes a su vez, autorizamos al Área de la Energía, las Industrias y Recursos Naturales no Renovables; hacer uso del presente documento en lo conveniente.

.....

Anderson Rigoberto Cuenca Satama
Egdo. Ingeniería Electromecánica

.....

Pedro José Tapia Escalante
Egdo. Ingeniería Electromecánica

AGRADECIMIENTOS

Es necesario dejar constancia de nuestro agradecimiento a la *Universidad Nacional de Loja*, al *Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables*, representada en cada uno de los docentes que en su momento nos brindaron sus conocimientos y apoyo para la formación como futuros profesionales. De manera especial:

Al *Ing. Milton Amable León Tapia*, Director de Tesis, por haber colaborado en la realización del presente proyecto.

A nuestros familiares, compañeros y amigos que con su apoyo y ánimo nos impulsaron a la culminación de nuestro Proyecto de Tesis.

DEDICATORIA

A Dios sostén de mi vida, a mi querida esposa Pauly que me dio ánimo en todo momento y me brindo siempre su apoyo incondicional, a mi pequeña Domy motor y sustento de nuestras vidas. Zoilita, Rosita y Antoliano mis mentores, quienes supieron cuidarme y guiarme por el buen camino. A mi Padre en el cielo, y a mi madre Olguita por su cariño, a mis amados hermanos, tíos, primos y a toda mi querida familia, que siempre estuvieron a mi lado, apoyándome en lo que necesité.

Anderson

*Este logro lo dedico con todo mi
cariño en primer lugar a dos
personas fundamentales en mi
vida; mi madre y mi padre que
desinteresadamente me han
brindado su cariño y apoyo
absoluto en instantes buenos y
malos durante todos los días de mi
existencia. Además a mis
hermanos(as), que cerca a mí y a
la distancia han colaborado a cada
momento para alcanzar el triunfo
que hoy obtengo.*

Pedro José

1. RESUMEN

Cada día, es más apremiante la necesidad de buscar nuevas tecnologías que permitan aprovechar la energía de fuentes renovables en sustitución de combustibles fósiles, las razones son diversas, tales como el alto costo de la energía convencional, la escasez de electricidad en sitios alejados de las zonas urbanas, así como los problemas ambientales que acarrea la producción de este tipo de energía basada en carburantes.

Además, nuestro País Ecuador es geográficamente privilegiado para el uso de fuentes no convencionales de energía, especialmente la energía solar, pues es un recurso que está presente en todo el transcurso del año en gran cantidad y poca variabilidad. Esto nos impulsa a revisar y optimizar el diseño de los sistemas actualmente utilizados para la captación de la energía solar térmica.

La factibilidad técnica y económica de estos sistemas solares para uso en el hogar o industrial depende fuertemente de su eficiencia térmica, y por lo general se evalúa sobre periodos largos de tiempo de operación.

Ante tal situación, en esta tesis se propone analizar la eficiencia energética, desarrollando un banco de colectores solares de placa plana, de cobre y aluminio, fabricados según dos técnicas constructivas diferentes acanalado y soldado; y que funcionan por circulación natural o termosifón.

ABSTRACT

Every day, it is more urgent the necessity to look for new technologies that allow to take advantage of the energy of renewable sources in substitution of fossil fuels, the reasons is diverse, such as the high cost of the conventional energy, the electricity shortage in places far from the urban areas, as well as the environmental problems that it carries the production of this energy type based on fuels.

Also, our Country Ecuador is privileged geographically for the use of non conventional sources of energy, especially the solar energy, because it is a resource that is present in the whole course of the year in great quantity and little variability. This impels us to revise and to optimize the design of the systems at the moment used for the reception of the thermal solar energy.

The technical and economic feasibility of these solar systems for use in the home or industrial it depends strongly on their thermal efficiency, and in general it is evaluated on long periods of time of operation.

Before such a situation, in this thesis its intends to analyze the energy efficiency, developing a bank of solar collectors of badge page, of copper and aluminum, manufactured according to two techniques constructive different grooved and soldier; and that they work for natural circulation or boiler.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| CERTIFICACIÓN | 1 |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | 2 |
| AGRADECIMIENTOS | 3 |
| DEDICATORIA..... | 3 |
| 1. RESUMEN | 6 |
| ÍNDICE GENERAL..... | 8 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 10 |
| ÍNDICE DE GRÁFICAS..... | 10 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 11 |
| SIMBOLOGÍA..... | 12 |
| CARATERES GRIEGOS..... | 12 |
| 2. INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 3. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 16 |
| CAPÍTULO I: ENERGÍA SOLAR..... | 16 |
| 1.1 Introducción a la Termodinámica..... | 16 |
| 1.1.1 <i>La radiación solar</i> | 16 |
| 1.1.1 <i>Primera Ley de la Termodinámica</i> | 17 |
| 1.1.2 <i>Segunda Ley de la Termodinámica</i> | 17 |
| 1.2 Transferencia de calor..... | 18 |
| 1.2.1 <i>Conducción</i> | 19 |
| 1.2.2 <i>Convección</i> | 20 |
| 1.2.3 <i>Radiación</i> | 21 |
| 1.3 Fluido..... | 23 |
| 1.4 Naturaleza de la energía solar..... | 24 |
| 1.4.1 <i>La radiación solar</i> | 24 |
| 1.4.2 <i>Flujos solares</i> | 24 |
| 1.4.3 <i>Altitud, Zenit y Azimut solar</i> | 26 |
| 1.4.4 <i>La constante solar</i> | 26 |
| 1.5 Instrumentos utilizados..... | 28 |
| 1.5.1 <i>Piranómetro</i> | 28 |
| 1.5.2 <i>Termómetro digital</i> | 29 |
| 1.5.3 <i>Anemómetro</i> | 30 |
| CAPÍTULO II: COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA..... | 31 |
| 2.1 Descripción de sistemas típicos..... | 31 |
| 2.1.1 <i>Por convección natural (Termosifón)</i> | 31 |
| 2.1.2 <i>Por circulación forzada</i> | 31 |
| 2.2 Colector solar de placa plana..... | 33 |
| 2.2.1 <i>Caja aislada</i> | 34 |
| 2.2.2 <i>Placa de absorción</i> | 34 |
| 2.2.3 <i>Cubierta transparente</i> | 34 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 2.2.4 | <i>Tubos</i> | 34 |
| 2.3 | Diseño del colector solar | 35 |
| 2.3.1 | <i>Ancho del colector</i> | 35 |
| 2.3.2 | <i>Largo del colector</i> | 36 |
| 2.3.3 | <i>Diámetro de los tubos</i> | 36 |
| 2.3.4 | <i>Material y número de tubos</i> | 37 |
| 2.3.5 | <i>Número de cubiertas de vidrio</i> | 37 |
| 2.3.6 | <i>Espesor de aislamiento</i> | 38 |
| 2.4 | Dimensionamiento del colector solar | 39 |
| | CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS COLECTORES DE PLACA PLANA | 40 |
| 3.1 | Colector solar de placa plana | 40 |
| 3.1.1 | <i>Cálculo de las pérdidas térmicas</i> | 40 |
| 3.1.2 | <i>Pérdidas térmicas</i> | 41 |
| 3.1.3 | <i>Pérdidas de energía a través de la base del colector</i> | 41 |
| 3.1.4 | <i>Conductancia térmica debido a la convección</i> | 42 |
| 3.1.5 | <i>Conductancia térmica debido a la radiación</i> | 43 |
| 3.1.6 | <i>Coficiente para la radiación de la cubierta superior al ambiente</i> | 44 |
| 3.1.7 | <i>Coficiente global de pérdidas</i> | 45 |
| 3.1.8 | <i>Cálculo de la eficiencia</i> | 45 |
| 3.1.9 | <i>Flujo de agua por termosifón</i> | 46 |
| | CAPÍTULO IV: FASE DE EXPERIMENTACIÓN | 47 |
| 4.1 | Forma y descripción de las pruebas experimentales | 47 |
| 4.2 | Parámetros característicos de los colectores construidos | 48 |
| 4.3 | Semana de experimentación | 48 |
| | CAPÍTULO V: VALORACIÓN ECONÓMICA | 89 |
| 5.1 | Energía ganada por el agua en el colector convencional | 89 |
| 5.2 | Ahorro anual acumulativo | 91 |
| 5.3 | Materiales | 92 |
| 5.4 | Instrumentación | 93 |
| 5.5 | Equipos | 94 |
| 5.6 | Logística | 94 |
| 4. | DISCUSIÓN | 98 |
| 5. | CONCLUSIONES | 100 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 101 |
| 7. | BIBLIOGRAFÍA | 102 |
| 8. | ANEXOS | 104 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1: Esquema de varillade material conductor con una area transversal A y una longiud L..... | 19 |
| Fig. 2: Orbita terrestre | 25 |
| Fig. 3: Declinación solar..... | 25 |
| Fig.4: Altitud, Zenit y azimut solar..... | 26 |
| Fig. 5: Balance de radiación solar | 27 |
| Fig. 6: Balance de radiación terrestre | 27 |
| Fig. 7: Piranómetro de Kipp y Zonen | 28 |
| Fig. 8: Diagrama electrónico de termómetro digital..... | 29 |
| Fig. 9: Anemómetro de cazoletas digital..... | 30 |
| Fig. 10: Esquema de un sistemá típico de calentamiento de agua por termosifón..... | 31 |
| Fig. 11: Esquema típico de calentamiento de agua por circulación forzada | 32 |
| Fig. 12: Esquema típico de calentamiento de agua por circulación forzada e intercambiador | 32 |
| Fig. 13: Componentes de un colector solar de placa plana | 34 |
| Fig. 14: Colector solar de placa plana y sus componentes..... | 39 |
| Fig. 15: Esquema del colector solar de simple exposición | 40 |
| Fig. 16: Circuito térmico para el coloector de placa plana | 41 |
| Fig. 17: Circuito térmico equivalente para el colector solar de placa plana | 42 |
| Fig. 18: Ahorro anual acumulativo de un sistema de energía solar | 92 |
| Fig. 19: Ahorro anual acumulativo para el colector de cobre rolado | 95 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| Graf. 1: Ancho del colector v. eficiencia | 35 |
| Graf. 2: Largo del colector v. eficiencia | 36 |
| Graf. 3: Diámetro de los tubos..... | 36 |
| Graf. 4: Material del tubo vs. eficiencia | 37 |
| Graf. 5: Número de cubiertas de vidrio vs. eficiencia | 38 |
| Graf. 6: Espesor de aislamiento vs. eficiencia..... | 38 |

GRAFICAS DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN CADA COLECTOR

Semana del 23 al 27 de diciembre de 2009

| | |
|----------------------------|----|
| Gráfica 7: Prueba 1 | 65 |
| Gráfica 8: Prueba 2 | 66 |
| Gráfica 9: Prueba 3 | 67 |
| Gráfica 10: Prueba 4 | 68 |

Semana del 7 al 12 de enero de 2010

| | |
|----------------------------|----|
| Gráfica 11: Prueba 1 | 69 |
| Gráfica 12: Prueba 2 | 70 |
| Gráfica 13: Prueba 3 | 71 |

| | |
|--|----|
| Gráfica 14: Prueba 4 | 72 |
| Semana del 21 al 25 de enero de 2010 | |
| Gráfica 15: Prueba 1 | 73 |
| Gráfica 16: Prueba 2 | 74 |
| Gráfica 17: Prueba 3 | 75 |
| Gráfica 18: Prueba 4 | 76 |
| Semana del 25 al 29 de diciembre de 2009 | |
| Gráfica 19: Prueba 1 | 77 |
| Gráfica 20: Prueba 2 | 78 |
| Gráfica 21: Prueba 3 | 79 |
| Gráfica 22: Prueba 4 | 80 |
| | |
| GRÁFICAS DE CONTRASTACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE COLECTORES | |
| Gráfica 23: Semana del 23 al 27 de diciembre de 2009 | 81 |
| Gráfica 24: Semana del 7 al 12 de enero de 2010 | 82 |
| Gráfica 25: Semana del 21 al 25 de enero de 2010 | 83 |
| Gráfica 26: Semana del 25 al 29 de diciembre de 2009 | 84 |
| | |
| GRÁFICAS DE CONTRASTACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LOS TANQUES | |
| Gráfica 27: Semana del 23 al 27 de diciembre de 2009 | 85 |
| Gráfica 28: Semana del 7 al 12 de enero de 2010 | 86 |
| Gráfica 29: Semana del 21 al 25 de enero de 2010 | 87 |
| Gráfica 30: Semana del 25 al 29 de diciembre de 2009 | 88 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Semana del 23 al 27 de diciembre de 2009 | |
| Tabla 1: Prueba 1 | 49 |
| Tabla 2: Prueba 2 | 50 |
| Tabla 3: Prueba 3 | 51 |
| Tabla 4: Prueba 4 | 52 |
| Semana del 7 al 12 de enero de 2010 | |
| Tabla 5: Prueba 1 | 53 |
| Tabla 6: Prueba 2 | 54 |
| Tabla 7: Prueba 3 | 55 |
| Tabla 8: Prueba 4 | 56 |
| Semana del 21 al 25 de enero de 2010 | |
| Tabla 9: Prueba 1 | 57 |
| Tabla 10: Prueba 2 | 58 |
| Tabla 11: Prueba 3 | 59 |
| Tabla 12: Prueba 4 | 60 |
| Semana del 25 al 29 de diciembre de 2009 | |
| Tabla 13: Prueba 1 | 61 |
| Tabla 14: Prueba 2 | 62 |
| Tabla 15: Prueba 3 | 63 |
| Tabla 16: Prueba 4 | 64 |
| Tabla 17: Ganancia y pérdida de energía colector de cobre rolado | 89 |
| Tabla 18: Ganancia y pérdida de energía colector de cobre soldado | 90 |

| | |
|--|----|
| Tabla 19: Ganancia y pérdida de energía colector de aluminio rolado..... | 90 |
| Tabla 20: Ganancia y pérdida de energía colector de aluminio soldado | 91 |
| Tabla 21: Ahorro anual acumulativo de cada colector solar | 95 |

SIMBOLOGÍA

A

| | |
|----------|-------------------------------------|
| A_{a1} | Área del absorbedor en el colector. |
| A_L | Área lateral. |
| A_{mp} | Amperios. |

C

| | |
|-------------|---|
| C | Capacidad calorífica equivalente del agua del tanque. |
| $^{\circ}C$ | Grados centígrados. |
| cm | Centímetros. |
| C_p | Calor específico del agua. |

E

| | |
|-------|------------------------------------|
| E | Energía. |
| e_t | Espesor del tanque de aislamiento. |
| e_a | Espesor del aislamiento. |

G

| | |
|-----|--------------------------|
| G | Irradiación solar total. |
|-----|--------------------------|

H

| | |
|-----------|--|
| H_r | Hora. |
| h_{p-c} | Coefficiente de convección del absorbedor a la cubierta superior en el colector. |
| h_{rc} | Coefficiente de radiación de la cubierta al ambiente en el colector. |
| h_{rp} | Coefficiente de radiación del absorbedor a la cubierta en el colector. |
| h_v | Coefficiente de transferencia de calor por convección a través del viento. |

J

| | |
|-----|--------|
| J | Joule. |
|-----|--------|

K

| | |
|-------|--------------------------------|
| K | Kelvin. |
| K_A | Conductividad del aire. |
| K_g | Kilogramo. |
| K_w | Kilovatio. |
| K_a | Conductividad del aislamiento. |
| K_t | Conductividad del tanque. |

L

| | |
|-----|---|
| l | Distancia del absorbedor a la cubierta de vidrio. |
|-----|---|

M

| | |
|------|-------------|
| m | Metros. |
| mm | Milímetros. |

m_1 Razón del flujo de agua por termosifón.

P

P Potencia.

Q

Q_{a1} Calor ganado por el absorbedor en el colector.

Q_u Energía útil ganada por el agua.

Q_p Pérdidas totales de energía del absorbedor.

R

R_{1-5} Resistencias térmicas.

T

T Temperatura.

t_c Temperatura de la cubierta en el colector.

t_{e1} Temperatura del agua a la entrada del colector.

t_{n1} Temperatura media del absorbedor en el colector.

t_{s1} Temperatura del agua en la salida del colector.

t Tiempo.

U

U_{a1} Coeficiente total de transferencia de calor en el colector.

$U_{1,2,3}$ Coeficiente de pérdidas hacia la parte superior, hacia la parte inferior y hacia los costados.

W

w Vatios.

CARACTERES GRIEGOS

α Absortancia del absorbedor

ϵ_c Emisividad de la cubierta de vidrio.

ϵ_p Emisividad del absorbedor.

η Eficiencia del colector.

θ Ángulo de inclinación del colector

ρ Reflectividad de la pantalla protectora.

σ Constante de radiación de Stefan-Boltzmann.

τ Transmisividad de la cubierta de vidrio.

2. INTRODUCCIÓN

Existen muchas aplicaciones de la energía solar. En países de clima cálido como el nuestro, una de las más prácticas aplicaciones del uso de este tipo de energía es el calentamiento de agua y otros fluidos, el secado de productos agrícolas e industriales y la producción de electricidad en lugares aislados; a través de calentadores o colectores solares.

Un calentador solar es un dispositivo técnico que emplea la energía proveniente del sol para calentar agua. Con ello se reduce la cantidad de energía fósil necesaria normalmente para este fin, reduciéndose, a su vez, la emisión de gases de efecto invernadero. El uso de calentadores solares ayuda a conservar el medio ambiente.

Si bien existen diferentes tipos de calentadores solares, todos se basan en el mismo principio básico de operación: un cuerpo oscuro absorbe la luz solar y pasa el calor absorbido a un líquido en un tanque de almacenamiento.

En nuestro caso nos hemos dedicado al análisis de la eficiencia de colectores solares de placa plana, que pueden emplearse para proveer de agua caliente a un hogar, también, para climatización de piscinas, grandes aplicaciones industriales (procesamiento de agua), para calefacción en lugares de clima frío con días soleados, y calefacción pública.

Por las bondades que nos ofrecen este tipo de colectores solares nos hemos planteado los siguientes objetivos:

- Recopilar y sistematizar información respecto a los colectores solares de placa plana.

- Realizar los cálculos y diseño que permita la construcción de dos prototipos de colectores solares de placa plana según dos técnicas constructivas, aplicando criterios técnicos.

- Recopilar datos para realizar el análisis de la eficiencia de los prototipos de colectores solares de placa plana.

- Socializar los resultados obtenidos.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

CAPÍTULO I: Energía Solar

1.1 Introducción a la Termodinámica

La palabra termodinámica se deriva de dos voces griegas *thermos* que significa “calor” y *dynamis*, que significa “fuerza” o “poder”, particularmente en su relación con el movimiento. Por ello, “termodinámica” significa literalmente “fuerza del calor”, lo cual podría denotar cosas tales como la transformación que se produce al quemar madera, carbón o petróleo. En realidad si utilizamos en vez de la palabra “calor” la palabra energía se establecerán con mayor precisión el significado y el campo de esta disciplina. Se trata de una ciencia que se ocupa en general de las transformaciones de la energía; por ejemplo, la conversión del calor en trabajo, o de la energía química en energía eléctrica. Ambas son transformaciones energéticas, y la Termodinámica proporciona los medios para su análisis.

1.1.1 Primera Ley de la Termodinámica

La energía interna es uno de los más importantes conceptos de la termodinámica. Cuando hablamos de los cambios de energía de un cuerpo que se desliza con fricción, dijimos que calentar un cuerpo aumentaba su energía interna y que enfriarlo la disminuía. La energía interna podemos verla de varios modos. La materia consiste en átomos y moléculas, y estas se componen de partículas que tienen energía cinética y potencial. Definimos tentativamente la energía interna de un sistema como la suma de las energías cinéticas de todas sus partículas constituyentes, más la suma de todas las energías potenciales de interacción entre ellas.

La energía interna no incluye la energía potencial debido a la interacción entre el sistema y su entorno. Si el sistema es un vaso de agua, el colocarlo en una repisa alta aumenta su energía potencial gravitatoria debido a la interacción entre el vaso y la tierra, pero esto no afecta a la interacción entre las moléculas del agua, por lo que la energía interna del agua no cambia.

Usando el símbolo U para la energía interna, Usamos el símbolo para la energía potencial en mecánica. Tenga presente que U tiene un significado distinto en

termodinámica. Durante un cambio de estado del sistema, la energía interna puede cambiar de un valor inicial U_1 a uno final U_2 . Denotamos el cambio con:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (1) \text{ Ref. [5], pág.11.}$$

Sabemos que la transferencia de calor es transferencia de energía. Si agregamos cierta cantidad de calor Q a un sistema y éste no realiza trabajo, la energía interna aumenta en una cantidad igual a $\Delta U = Q$. Si el sistema efectúa un trabajo W , expandiéndose contra su entorno y no se agrega calor, sale la energía del sistema y U disminuye. Es decir, si W es positivo, ΔU es negativo, y viceversa: $\Delta U = -W$. Si ocurren tanto transferencia de calor como trabajo, el cambio total de energía interna es:

$$U_1 - U_2 = \Delta U = Q - P \quad \text{Primera ley de la Termodinámica (2) Ref. [5], pág.11.}$$

$$Q = \Delta U + W \quad (3) \text{ Ref. [5], pág.12.}$$

En general cuando se agrega calor Q a un sistema, parte de esa energía agregada permanece en el sistema, cambiando su energía interna en una cantidad ΔU ; el resto sale del sistema cuando este efectúa un trabajo W contra su entorno. Puesto que W y Q pueden ser positivos o negativos o, ΔU puede ser positiva, negativa o para diferentes procesos.

La ecuación anterior es la primera Ley de la Termodinámica, una generalización del principio de conservación de la energía para incluir la transferencia de energía como calor y como trabajo mecánico; pero este principio puede extenderse a clases de fenómenos aún más amplias identificando formas adicionales de energía y transferencia de energía

1.1.2 Segunda Ley de la termodinámica

La base de la segunda Ley de la termodinámica es la diferencia entre la naturaleza de la energía interna y la de la energía mecánica macroscópica. En un cuerpo que se mueve, las moléculas tienen movimiento aleatorio, al que se superpone un movimiento coordinado de todas las moléculas en la dirección de la velocidad del cuerpo.

La energía cinética asociada a este, movimiento macroscópico coordinado es lo que llamamos energía cinética del cuerpo en movimiento. Las energías cinéticas y potenciales asociadas al movimiento aleatorio constituyen la energía interna.

Si un cuerpo que se desliza sobre una superficie se detiene a causa de la fricción, el movimiento organizado del cuerpo se convierte en movimiento aleatorio de las moléculas en el cuerpo y en la superficie.

No se puede controlar los movimientos de las moléculas individuales, no se puede convertir todo en movimiento aleatorio otra vez en movimiento organizado.

Se convierte una parte, y esto es lo que hace una máquina de calor.

Si la segunda ley no se cumpliera, podríamos impulsar un cohete u operar una planta de electricidad enfriando el aire circundante, pues ninguna de estas imposibilidades viola la primera ley de la termodinámica. La segunda, por tanto no se deduce de la primera sino que es una ley independiente de la Naturaleza.

La primera Ley niega la posibilidad de crear o destruir energía; la segunda limita la disponibilidad de la energía y las formas en que puede usarse o convenirse.

La conversión del trabajo en calor, como en la fricción o el flujo de fluidos viscosos, y el flujo de calor de caliente a frío por un gradiente de temperatura finito, son procesos irreversibles.

Los gases se filtran espontáneamente por una abertura de una región de alta presión a una de baja presión; los gases y líquidos miscibles sin ser sometidos a ninguna perturbación siempre tienden a mezclarse, no a separarse. La segunda ley de la termodinámica es una expresión del aspecto inherentemente unidireccional de estos y muchos otros procesos irreversibles.

La conversión de energía es un aspecto esencial de la vida y de la tecnología humana, así que la segunda ley tiene una importancia fundamental para el mundo en que vivimos.

1.2 Transferencia de calor

Si un cuerpo caliente se pone en contacto con uno frío la experiencia nos dice que el primero se enfría y el segundo se calienta hasta que ambos igualen sus temperaturas. Esto es debido a una transferencia de energía del cuerpo caliente al frío.

Esta energía, transferida a través de los límites de un sistema, en virtud de una diferencia de temperaturas, constituye el calor.

Es decir, el calor es un fenómeno transitorio. Si consideramos el cuerpo caliente como un sistema y el frío como otro, se llega a la conclusión de que originalmente ni uno ni otro contienen calor, pero sí energía. Al poner ambos sistemas en comunicación térmica el calor se transfiere del primero al segundo hasta que se establece el equilibrio de temperatura. Ninguno de los sistemas contiene calor al final del proceso.

Existen tres formas distintas según las cuales el calor puede pasar de un cuerpo a otro: Conducción, convección y radiación.

Los tres mecanismos de transferencia de calor son conducción, convección y radiación. Ocurre conducción dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos en contacto, la convección depende del movimiento de una masa de una región del espacio a otra. La radiación es la transferencia de calor por radiación electromagnética, como la luz del sol, sin que tenga que haber materia en el espacio entre los cuerpos.

1.2.1 Conducción

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, ver Fig. 1. de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

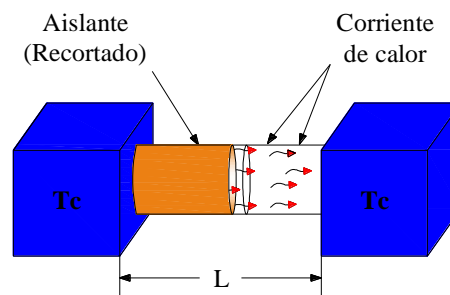


Fig. 1. Muestra una varilla de material conductor con un área transversal A y una longitud L . Ref. [5],

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

1.2.2 *Convección.*

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Supongamos, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior —que está más frío— desciende, mientras que al aire cercano al panel interior —más caliente— asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador. Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

1.2.3 Radiación

Es la transferencia de calor, en forma de energía electromagnética, por el espacio. La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas. La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación.

La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por

unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzman en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzman que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela.

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos, de alta longitud de onda. Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wilhelm, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, 2.878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos. La energía radiante del Sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se

transmite a través del vidrio y entra en el invernadero. En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de onda mayor, correspondiente al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neta hacia su interior.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la Tierra a velocidades muy altas están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula.

1.3 Fluido

Fluido es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos se clasifican en líquidos y gases.

Los líquidos a una presión y temperatura determinadas ocupan un volumen determinado. Introduciendo el líquido en un recipiente adopta la forma del mismo, pero llenando solo el volumen que le corresponde. Si sobre el líquido reina una presión uniforme, por ejemplo, la atmosférica, el líquido adopta, como veremos una superficie libre plana, como la superficie de un lago o la de un cubo de agua.

Los gases a una presión y temperatura determinada tienen también un volumen determinado, pero puestos en libertad se expansionan hasta ocupar el volumen completo del recipiente que lo contiene, y no presentan superficie libre. En resumen: Los sólidos ofrecen gran resistencia al cambio de forma y volumen; los líquidos ofrecen gran resistencia al cambio de volumen, pero no de forma; y los gases ofrecen poca resistencia al cambio de forma y volumen.

Por tanto el comportamiento de los líquidos y gases es análogo en conductos cerrados (tuberías); pero no en conductos abiertos (canales), porque solo los líquidos son capaces de crear una superficie libre. En general los sólidos y los líquidos son poco compresibles y los gases muy compresibles; pero ningún cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) es estrictamente incompresible.

1.4 Naturaleza de la energía solar

El sol es la estrella más próxima a la Tierra y se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros, distancia conocida como Unidad Astronómica (UA). El sol es la principal fuente primaria de luz y calor para la Tierra, proporciona el 99,7% de la energía usada para todos los procesos naturales. Un análisis de su composición en función de su masa establece que contiene un 71% de Hidrógeno, un 27% Helio, y un 2% de otros elementos más pesados.

La luz, no importa su origen (solar, foco incandescente o fluorescente) es el resultado de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia.

1.4.1 La radiación solar

La radiación de calor (no visible) corresponde a la radiación infrarroja (por debajo de la frecuencia del rojo). La radiación (no visible) del violeta corresponden a la radiación ultravioleta (por encima de la frecuencia del violeta).

1.4.2 Flujos solares

Para efecto de utilización de la energía solar, el Sol puede considerarse de manera simplificada como un cuerpo negro¹ que radia energía a la temperatura de 5762°K. A esta temperatura el Sol emite energía que se propaga por el espacio a la velocidad de la luz y recorriendo la distancia media Sol-Tierra en 8 minutos 18 segundos.

La energía transmitida por las ondas electromagnéticas no fluye en forma continua sino en forma de pequeños paquetes de energía. A estos conjuntos discretos de energía se les denominan fotones. La cantidad de energía de los fotones es menor o mayor según la longitud de la onda electromagnética. La energía de los fotones de las ondas largas, como

¹ El “cuerpo negro” se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie (absorbedor perfecto).

las de radio y televisión es muy pequeña. En cambio, la energía de los fotones de las ondas muy cortas, como los rayos X es grande.

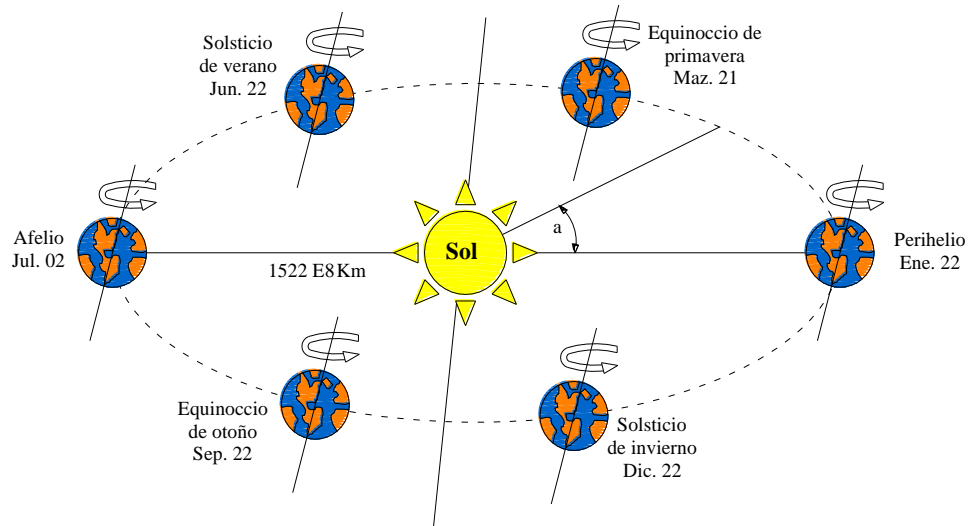


Fig.2. Órbita terrestre. Ref. [5], pág.27.

En la Fig. 2., se muestra la posición angular (a) de la Tierra en la órbita. Cuando $a=0^\circ$, la Tierra se encuentra más cerca del Sol (Perihelio), esto ocurre en enero; En julio, cuando $a = 180^\circ$, la Tierra se encuentra en la posición más alejada del Sol (Afelio).

Cuando se analiza el movimiento de rotación y translación de la Tierra se encuentra que su eje de rotación, con respecto al plano de translación alrededor del sol, tiene una inclinación de aproximadamente $23,45^\circ$. Los patrones climáticos de las estaciones se originan principalmente por la inclinación del eje de rotación. El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la Tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar (δ), ver Fig. 3. El signo de la declinación es positivo (+) cuando el sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur.

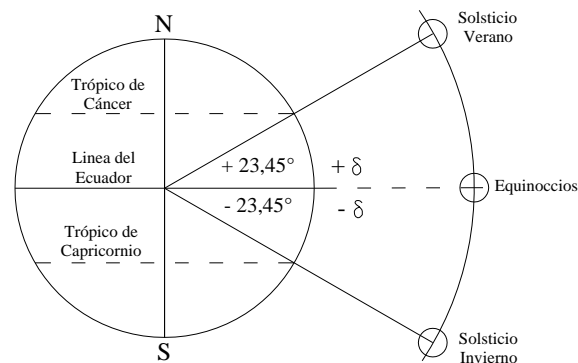


Fig. 3: Declinación solar

1.4.3 Altitud, zenit y azimuth solar

Si observamos la Fig. 4., la posición relativa del Sol en el firmamento respecto a un punto de la superficie terrestre se puede definir por dos ángulos: la **altitud solar** –que es el ángulo entre la línea que pasa por el punto y el Sol, y la línea tangente a la superficie terrestre– y el **azimut solar** –que es el ángulo entre la proyección del Sol en el horizonte y la línea norte-sur (toma valores positivos hacia el este y negativo hacia el oeste en ambos hemisferios). El ángulo complementario a la altitud solar se denomina **zenit solar**. La posición del Sol en el firmamento dependerá, pues, de la situación del punto en la Tierra, de la época del año y del momento del día.

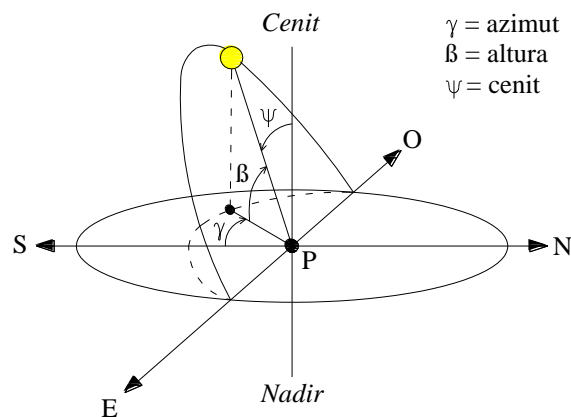


Fig. 4: Altitud, Zenit y azimuth solar. Ref. [6], pág.501.

Por todo ello, para vencer los efectos que la declinación tiene sobre el ángulo de incidencia de la radiación solar y conseguir interceptar esta radiación de la forma más perpendicularmente posible, los captadores solares tienen que estar inclinados un cierto ángulo respecto al suelo, y a la vez orientados lo más al sur posible cuando estamos en el hemisferio norte y hacia el norte cuando estamos en el hemisferio sur.

1.4.4 La constante solar

Desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de $5,6 \times 10^{35}$ GeV y de ella, la Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de $1,73 \times 10^{14}$ Kw, o sea 1353 Kw/m^2 , que se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa en un $\pm 3\%$ debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol.

La intensidad de la radiación solar se mide a través de dos parámetros físicos:

Insolación: Energía media diaria ($Kw Hr/m^2$ día)

Radiación térmica: Potencia instantánea sobre superficie horizontal (Kw/m^2)

En las Figs. 5. y 6. , que se encuentran a continuación, se representa la distribución de los $1,73 \times 10^{14}$ Kw de energía solar que inciden sobre la Tierra:

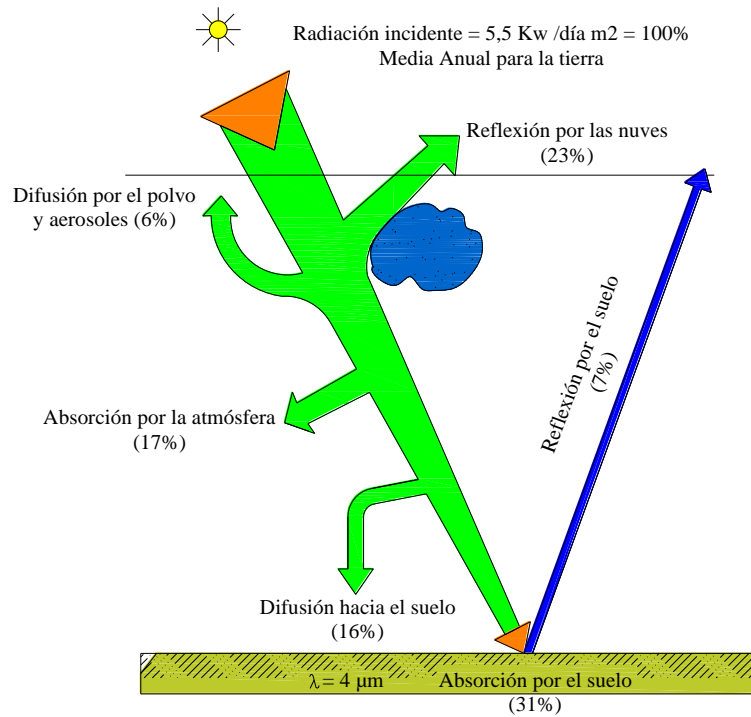


Fig. 5: Balance de radiación solar. Ref. [3], pág.2.

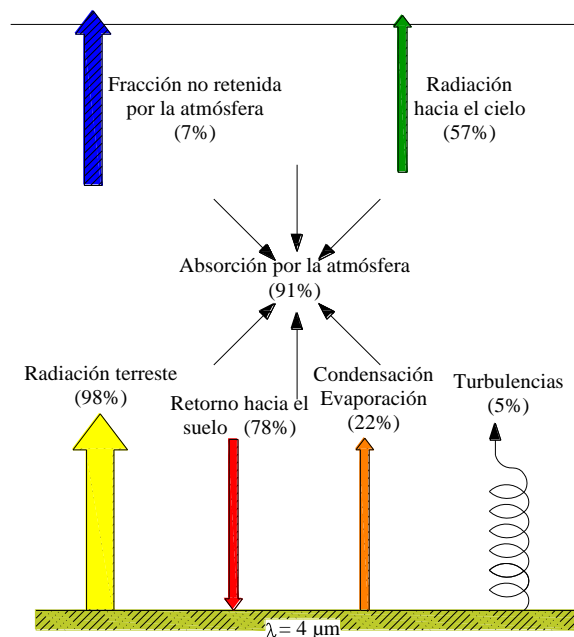


Fig.6: Balance de radiación terrestre. Ref. [3], pág.2.

1.5 Instrumentos utilizados

1.5.1 Piranómetro

Sirve para medir la radiación global, directa y difusa, que se recibe en todas direcciones, por lo que el instrumento tiene que descansar sobre una base horizontal. La banda de frecuencias medida por el piranómetro está comprendida entre $0,3 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$; si se protege de la radiación directa por un anillo protector desvanecedor, entonces mide sólo la radiación difusa.

Los piranómetros más usuales se basan en la determinación de la diferencia de temperaturas entre una superficie negra y una superficie blanca mediante termopilas o células fotoeléctricas, que deben estar protegidas del viento y compensadas para cambios de temperatura ambientales, mediante una doble semiesfera de vidrio, para suprimir los fenómenos de convección.

El piranómetro de Kipp y Zonen, Fig. 7., está constituido por una termopila contenida en una caja metálica cerrada en su parte superior por dos hemisferas de cristal de 3 a 5 cm de diámetro y 2 mm de espesor.

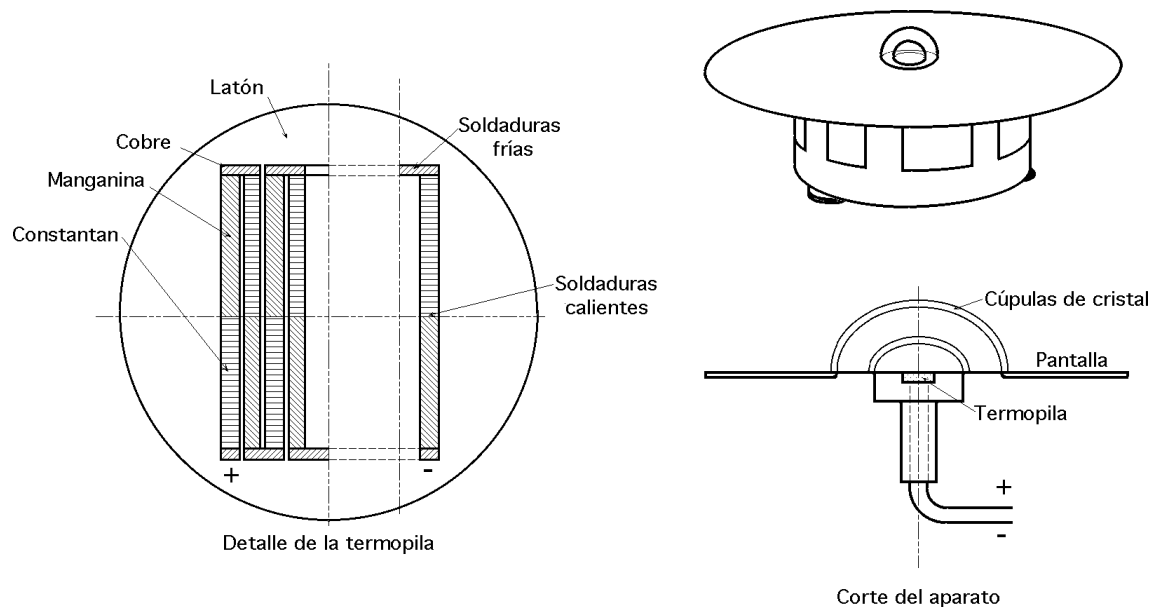


Fig. 7 Piranómetro de Kipp y Zonen. Ref. [3], pág.7.

La caja está fijada sobre un zócalo metálico y la pila está protegida de la radiación difundida por el suelo por una gran corona blanca horizontal circular que actúa también como pantalla térmica.

1.5.2 Termómetro digital

Sirve básicamente para registrar en una pantalla, la medida de 5 temperaturas de cada uno de los calentadores solares, así, temperatura de la placa absorbadora, temperatura de entrada de agua, temperatura de la salida de agua, temperatura del tanque de almacenamiento, temperatura del vidrio.

Para su construcción se utilizó lo siguiente, PIC 16F877A, Sensor de temperatura LM35, LCD 2x16, Cristal de cuarzo de 4MHz, 2 capacitores de 22pf, 7 resistencias de 330, 1 potenciómetro de 10K, Fuente de +5V, y su diagrama eléctrico lo apreciamos en la Fig. 8.

Criterio de conversión analógica digital. El sensor de temperatura LM35 es un sensor de temperatura de rango -55 a 150 grados con variaciones de voltaje de 10mV por grado es decir 0V son 0 grados y 1.5V son 150 grados en relación voltaje temperatura.

Se utilizó el conversor del microcontrolador en modalidad de 8 bits de información, usando además los 7 canales de entrada analógica disponibles, con un voltaje de referencia de +5V en la parte positiva y 0V en la referencia negativa, se configuró la escala de 0 a 150 grados con lo que

$$\text{sensibilidad} = \frac{5}{255} = \frac{V_{\text{referencia}}}{2^n - 1} = 0.0196 = 19.6mV \approx 20mV$$

En relación a la salida del sensor y la sensibilidad se tendrá un error en la lectura de +1 a -1 grados que es un error aceptable (formulación aceptada solo para este caso).

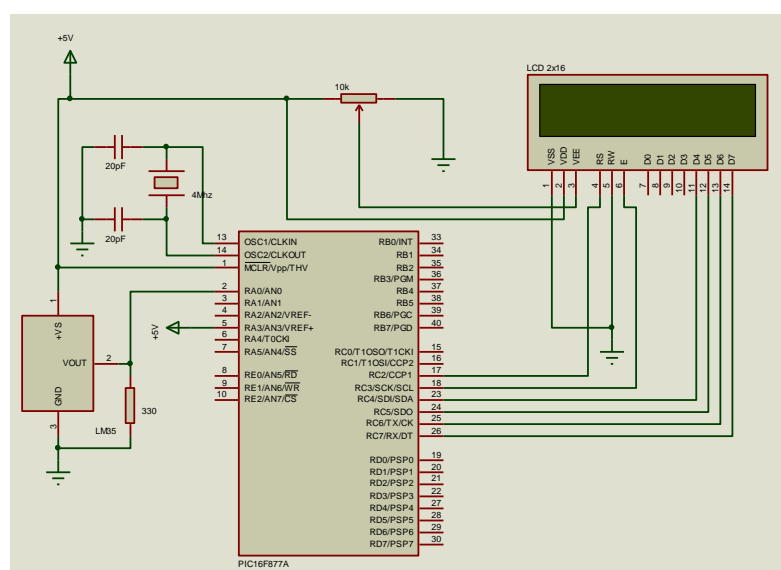


Fig. 8 Diagrama electrónico del termómetro digital

1.5.3 Anemómetro

Instrumento para medir la velocidad, dirección e intensidad del viento. Empleando para ello una veleta para medir la dirección y un pequeño generador impulsado por unas aspas para medir la intensidad. En los veleros son equipos fijos situados en lo alto del palo y conectados al equipo de viento, aunque también existen anemómetros portátiles. (No siempre son exactos a menos que sean anemómetros digitales)

El anemómetro de cazoletas Fig. 9., tiene un eje vertical y tres cazoletas que capturan el viento. El número de revoluciones por segundo son registradas electrónicamente. Normalmente, el anemómetro está provisto de una veleta para detectar la dirección del viento. En lugar de cazoletas el anemómetro puede estar equipado con hélices, aunque no es lo habitual.

Otros tipos de anemómetros incluyen ultrasonidos o anemómetros provistos de láser que detectan el desfase del sonido o la luz coherente reflejada por las moléculas de aire.

Los anemómetros de hilo electro calentado detectan la velocidad del viento mediante pequeñas diferencias de temperatura entre los cables situados en el viento y en la sombra del viento (cara a sotavento).

La ventaja de los anemómetros no mecánicos es que son menos sensibles a la formación de hielo. Sin embargo en la práctica los anemómetros de cazoletas son ampliamente utilizados, y modelos especiales con ejes y cazoletas eléctricamente calentados pueden ser usados en las zonas árticas.



Fig. 9 Anemómetro de cazoletas digital.

CAPÍTULO II: Colector Solar de Placa Plana

2.1 Descripción de sistemas típicos

Se describirán brevemente varios sistemas típicos de colectores solares planos para calentamiento de agua.

2.1.1 Por convección natural (Termosifón).

Uno de los primeros sistemas desarrollados en el Ecuador se encuentra esquematizado en la Fig. 10., El principio general de funcionamiento se basa en el movimiento del fluido del colector al tanque por la parte superior y del tanque al colector por la parte inferior, causado por termosifón.

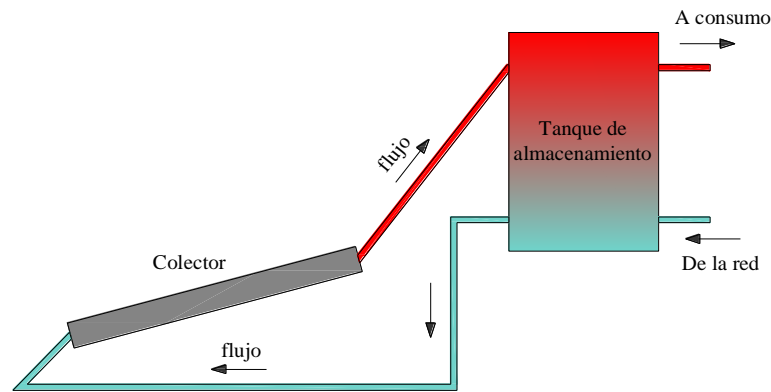


Fig. 10 Esquema de un sistema típico de calentamiento de agua en el cual el flujo se produce por efecto de convección natural o termosifón.

Para favorecer esto último, el tanque debe ir colocado a una altura mínima indispensable con respecto a la parte superior del colector (≈ 350 mm), y las cañerías que comunican al colector con el tan que deben tener también un diámetro mínimo (≈ 14 mm).

La ventaja de este sistema radica en el relativamente bajo costo de inversión y funcionamiento, la desventaja que presenta es de tener un bajo rendimiento.

2.1.2 Por circulación forzada.

El sistema mostrado en la Fig. 11., representa uno de circulación forzada. El agua es impulsada por una bomba del colector al tanque y viceversa, cuando las condiciones climáticas así lo aconsejan.

Del tanque se retira agua para el consumo según las necesidades.

En la Fig. 12., se representa un sistema similar, con la variante de incluir un intercambiador de calor. Este último componente es necesario si existe peligro de congelamiento y debe usarse otro líquido o mezclas de alcohol con agua como sustancia de trabajo a través de los colectores.

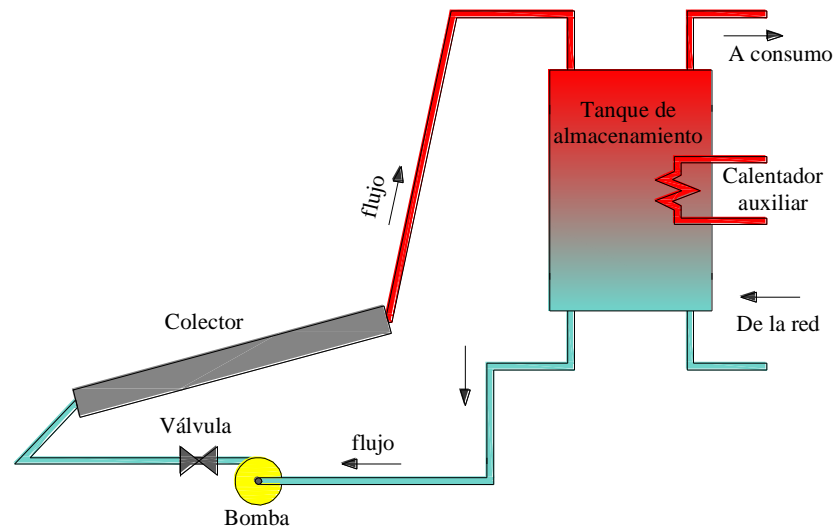


Fig. 11 Esquema típico de calentamiento de agua por circulación forzada.

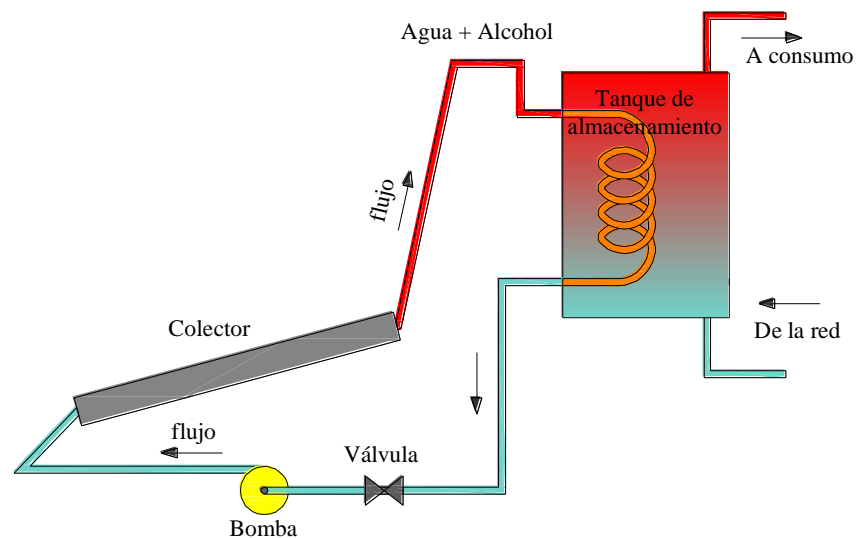


Fig. 12 Esquema típico de un sistema de calentamiento de agua por circulación forzada e intercambiador de calor.

En los tres sistemas representados el tanque de almacenamiento puede o no incluir un sistema auxiliar que permita calentar el agua cuando las condiciones climáticas han sido desfavorables y es necesaria una mayor energía que la entregada por el sol, o la demanda de agua caliente es mayor que la prevista.

2.2 Colector solar de placa plana.

Un colector solar transforma la energía solar incidente en otra forma de energía útil. Este tipo de colectores solares de placa plana captan la radiación solar en una placa ennegrecida. Esta placa es pintada o tratada químicamente para lograr una superficie “negra” de alta absorptividad.

El colector solar de placa plana trabaja, haciendo pasar un fluido a través de él, la placa por efecto de la superficie negra, absorbe la radiación solar y la transfiere al has de tubos y de este a un fluido, generalmente agua, aire, o solución anticongelante, pudiendo ser otros. Está lámina debe ser aislada del medio ambiente para reducir hasta donde sea posible las pérdidas de calor.

Este aislamiento se logra de la siguiente manera: Se coloca debajo y a los lados de la placa algún material aislante como lana de vidrio, espuma de poliuretano, etc. En la parte superior de la placa, o sea por el lado del sol se colocan una o varias cubiertas transparentes, vidrio o plástico, con el fin de permitir el paso de la radiación solar y formar cámaras de aire estacionario, reduciendo así las pérdidas de calor por convección. Todo esto, placa negra y aislamiento, va contenido en una caja de poca profundidad.

Los colectores solares de placa plana se han usado de forma eficaz para calentar agua y para calefacción. Los sistemas típicos para casa-habitación emplean colectores fijos sobre el tejado. En el hemisferio norte se orientan hacia el Sur y en el hemisferio sur hacia el Norte. El ángulo de inclinación óptimo para montar los colectores depende de la latitud. En general, para sistemas que se usan todo el año, como los que producen agua caliente, los colectores se inclinan (respecto al plano horizontal) un ángulo igual a los 15° de latitud y se orientan unos 20° de latitud S o 20° de latitud N.

El colector solar de placa plana está diseñado para suministrar energía a temperaturas hasta de 65°C aproximadamente sobre la temperatura ambiente. Sus temperaturas máximas de operación en condiciones de flujo son del orden de $65,5^\circ\text{C}$ a $115,5^\circ\text{C}$, y obtener entre el 40 y 80 % de eficiencia. Correctamente diseñado y construido, el colector plano puede durar de 20 a 25 años o más, dependiendo del diseño.

En la Fig. 13. se muestra un colector solar de placa plana y sus componentes:

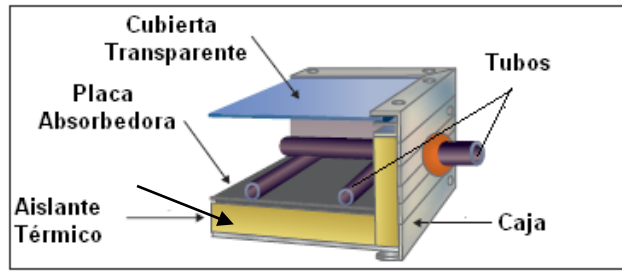


Fig. 13 Componentes de un colector solar de placa plana Ref. [7], pág.9.

2.2.1 Caja aislada

La caja aislada provee aislamiento hacia la parte de atrás y a los lados del colector. La caja puede ser hecha de aluminio, acero inoxidable, latón o madera. El aislamiento previene las pérdidas de calor hacia el exterior del colector. La caja también provee la estructura al colector.

2.2.2 Placa de absorción

La placa de absorción es el elemento principal del colector. La placa de absorción debe cubrir la apertura total de colector. Tiene tres funciones principales:

- Absorber la máxima cantidad de irradiación solar.
- Transferir este calor hacia el interior del fluido.
- Emitir la menor cantidad de calor posible hacia sus alrededores.

2.2.3 Cubierta Transparente

Para reducir las pérdidas de calor por convección desde placa de absorción, se emplea una cubierta transparente. Esta cubierta tiene dos funciones principales: la primera es que el viento desde el exterior no enfríe la cubierta, la otra es permitir que la radiación pase a través de esta hacia la placa de absorción y reflejar la radiación térmica emitida por la placa.

2.2.4 Tubos

Los pequeños tubos es por donde circula el agua mientras se calienta. Suelen estar soldados sobre una placa metálica negra o en su defecto tienen aletas soldadas sobre sus bordes.

2.3 Diseño del colector solar

El diseño de nuestros colectores solares lo vamos a realizar a partir de un proceso de optimización, empleando un programa de cálculo desarrollado por la OPS/CEPIS. A partir del programa, se generan distintos tipos de curvas para distintas condiciones de trabajo, tal como la radiación. Por ejemplo, para optimizar el número de cubiertas de vidrio, se trazan curvas 300, 500, 700 y 900 w/m²; sin embargo, se asume el valor de 700 w/m², como un valor promedio para el diseño. Siguiendo este mismo criterio pueden evaluarse: ancho y largo del colector, diámetro de los tubos, material y número de tubos, número de cubiertas de vidrio y espesor del aislamiento, los mismos que se presentan a continuación.

2.3.1 Ancho del colector

Como se observa en el Gráfico 1, la eficiencia del colector se incrementa significativamente hasta que el ancho del colector se aproxime a 1 m. Sin embargo, para valores mayores a 1,5 m la eficiencia empieza a decrecer paulatinamente. Es oportuno anotar que el ancho del colector depende también del número de tubos.

A continuación se presenta un breve análisis de los materiales que se usan en el diseño de colectores solares de placa plana.

De esta tabla vemos que en nuestro colector se asumirá un ancho de 0,65 m con una eficiencia del 54%

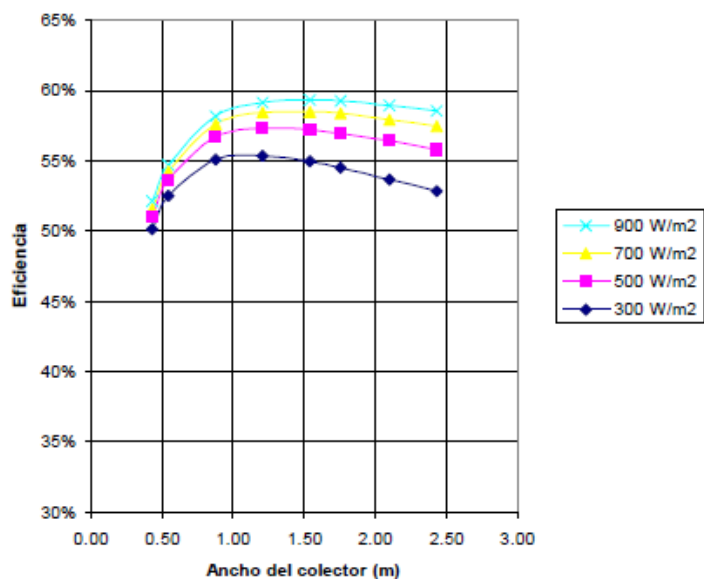


Gráfico 1. Ancho del colector vs. Eficiencia Ref. [8], pág.5.

2.3.2 Largo del colector

Como se muestra en el Gráfico 2, la eficiencia del colector se incrementa rápidamente hasta que el largo del colector se aproxime a un valor de 1 m. La selección de 2 m para el largo es óptima por cuanto a menor longitud aumentan los costos de construcción, ya que en un proceso de producción en serie los costos por mano de obra se incrementan considerablemente.

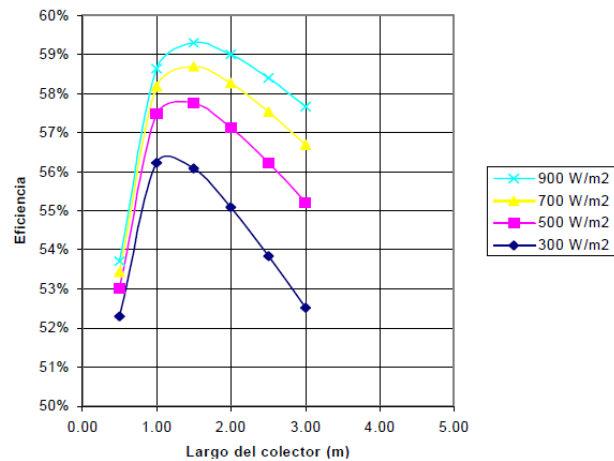


Gráfico 2. Largo del colector vs. Eficiencia Ref. [8], pág.6.

De esta tabla asumiremos el largo que tendrá el colector a construir, y será de 1,10 m con una eficiencia del 58%, pese a que los costos se elevarán por su menor tamaño.

2.3.3 Diámetro de los tubos

En el Gráfico 3 se muestra la tendencia de la eficiencia en función del diámetro interno de los tubos para distintos números de ellos. A partir de este gráfico puede seleccionarse un diámetro interior de 1,6 cm por ser el más comercial y económico.

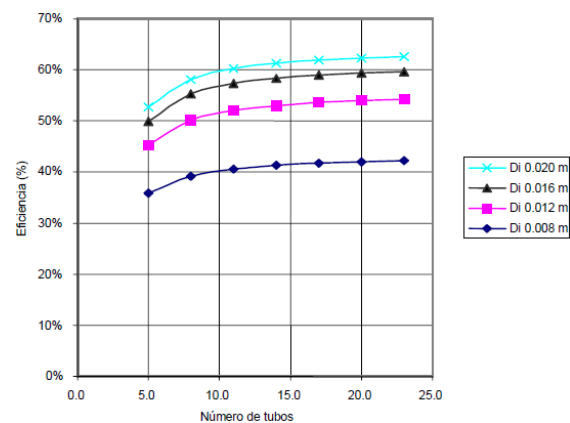


Gráfico 3. Diámetro interior del tubo vs. Eficiencia Ref. [8], pág.6.

2.3.4 Material y número de tubos

Este es uno de los parámetros más importantes. En el Gráfico 4 se muestra una relación entre la eficiencia y el material del tubo. A partir de este gráfico se observa que tanto con ocho tubos de cobre como con 13 tubos de hierro galvanizado se obtienen una eficiencia aceptable; estos materiales son los más comerciales. Cierto es que los tubos de aluminio tienen buenas características de conductividad térmica pero, su alta corrosividad limita su aplicación.

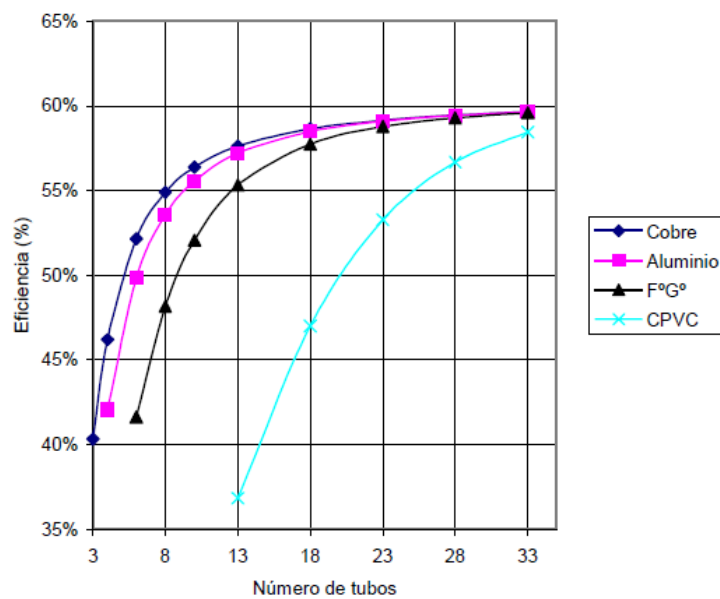


Gráfico 4. Material del tubo vs. Eficiencia Ref. [8], pág.7.

De esta tabla para nuestros colectores asumiremos 5 tubos de cobre con una eficiencia del 53%, y 5 tubos de aluminio que corresponde al 46% de eficiencia.

2.3.5 Número de cubiertas de vidrio

Los resultados mostrados en el Gráfico 5 indican que la colocación de dos vidrios es una buena elección a pesar que con un mayor número se obtienen mejores eficiencias. No obstante, este mayor número de vidrios hace más difícil su construcción incrementando, además, su costo.

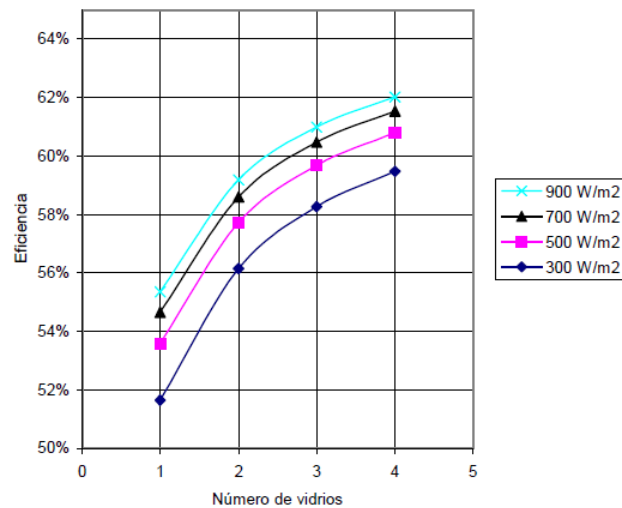


Gráfico 5. Número de cubiertas de vidrio vs. Eficiencia Ref. [8], pág.8.

Para nuestros colectores utilizaremos una cubierta de vidrio que corresponderá al 55% de eficiencia.

2.3.6 Espesor de aislamiento

En el Gráfico 6 se muestra la influencia del espesor del aislamiento en la eficiencia del colector. Puede verse que a partir de 1 cm a medida que aumenta el espesor la eficiencia aumenta en menor proporción. Puede elegirse un espesor de una pulgada (2,54 cm), por ser la más económica y fácil disponibilidad en el mercado.

Con 700 W/m^2 promedio, y utilizando lana de vidrio de 2, 54cm obtendremos una eficiencia en el colector del 55%.

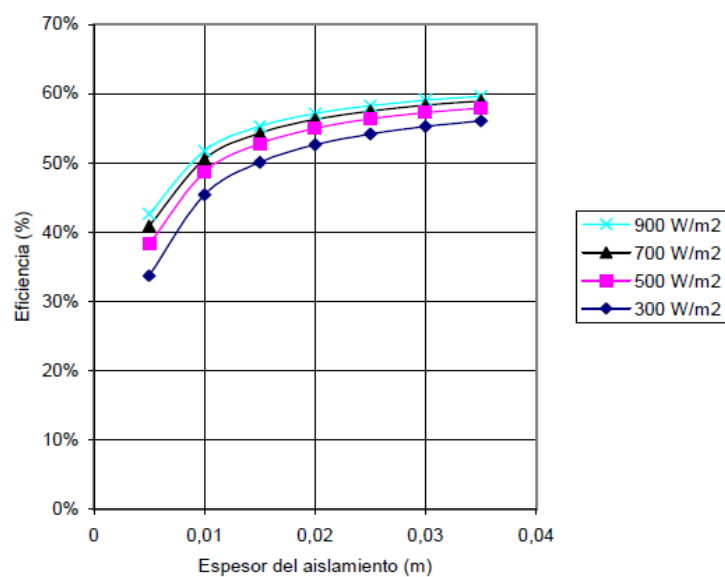


Gráfico 6. Espesor del aislamiento vs. Eficiencia Ref. [8], pág.8.

2.4 Dimensionamiento del colector solar

A continuación en la Fig. 14. se muestran el colector solar de placa plana y todos sus componentes, los planos detallados del mismo se encuentran en los anexos.

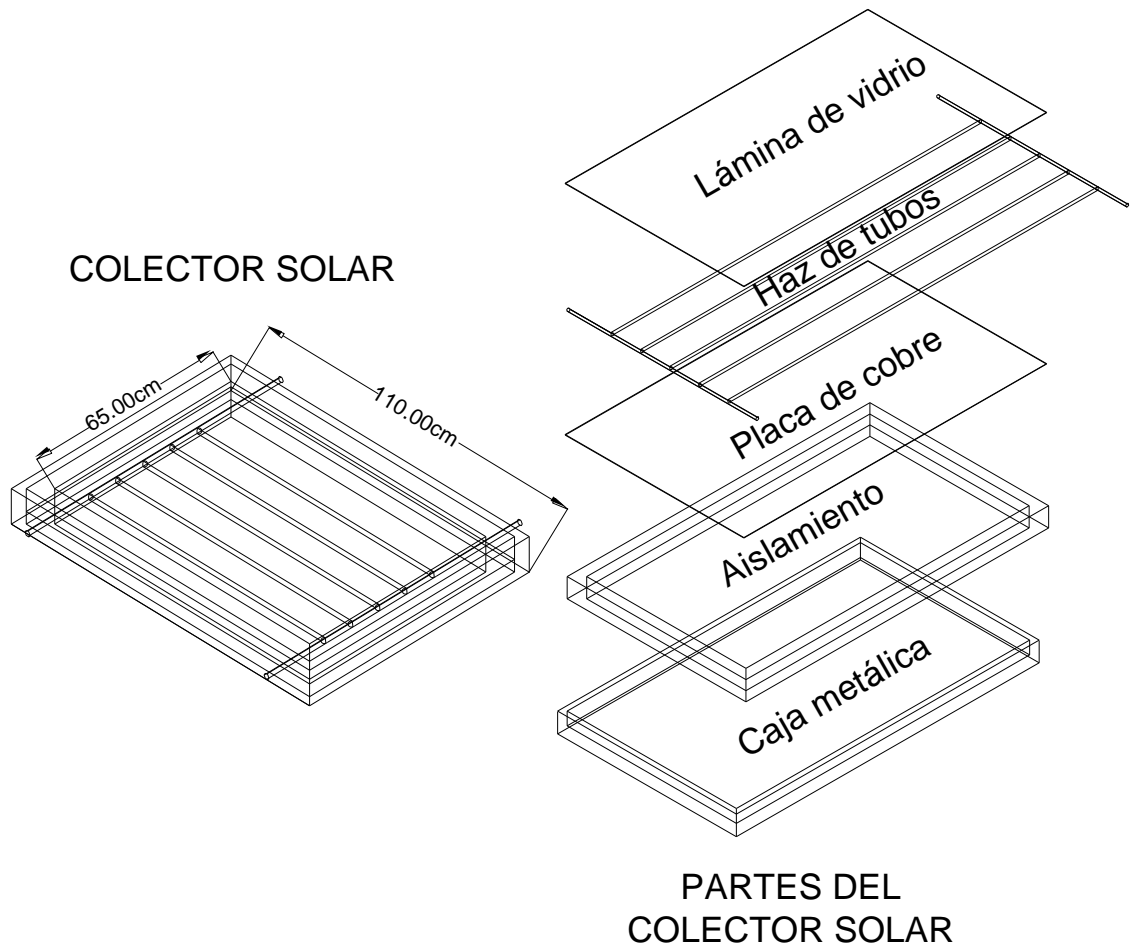


Fig. 14 Colector solar de placa plana y sus componentes

CAPÍTULO III: Análisis de los Colectores de Placa Plana

En este capítulo se procede a realizar al análisis de las ecuaciones que rigen el funcionamiento de los colectores solares de placa plana.

3.1 Colector solar de placa plana

3.1.1 Cálculo de las pérdidas térmicas

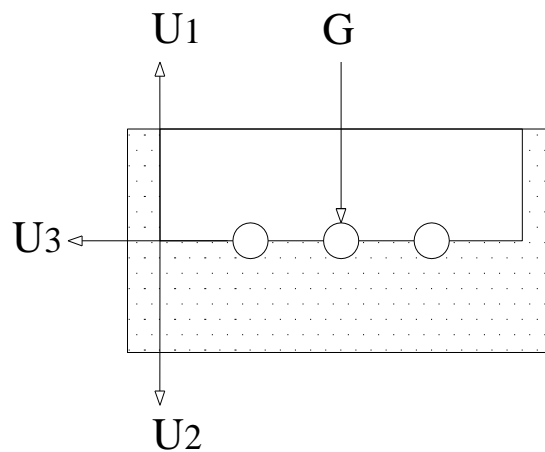


Fig. 15. Esquema del colector de simple exposición Ref. [4], pág.48.

Un balance de energía en el plato absorbedor da:

Calor ganado por el absorbedor = Pérdidas de calor del absorbedor + Calor ganado por el agua

$$q_{a1} = q_{pa1} + m_1 c_p (t_{s1} - t_{e1}) \quad (4) \text{ Ref. [4], pág.49.}$$

Siendo:

$$q_{pa1} = U_{a1} A_{a1} (t_{n1} - t_a) \quad (5) \text{ Ref. [4], pág.49.}$$

t_{n1} = Temperatura media del absorbedor. °C

t_a = Temperatura del aire ambiente. °C

m_1 = Razón de flujo de agua por termosifón. K_g/H_r

c_p = Calor específico. $J/Kg^\circ C$

El calor ganado por el absorbedor también puede expresarse como:

$$q_{a1} = \alpha \tau G \quad (6) \text{ Ref. [4], pág.50.}$$

α = Absortividad de la superficie absorbedora.

τ = Transmisividad de la cubierta de vidrio.

G = Irradiación solar. w/m^2

A_{a1} = Área del absorbedor en el colector. m^2

3.1.2 Pérdidas térmicas

De la Fig. 15., podemos ver que:

$$U_{a1} = U1 + U2 + U3 \quad (7) \text{ Ref. [1], pág.267.}$$

U_{a1} = Coeficiente total de pérdidas por el absorbedor en el colector de placa plana w/m^2C

$U1, U2, U3$ Pueden ser calculadas por medio de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción, convección o radiación.

3.1.3 Pérdidas térmicas a través de la base del colector

Estableciendo el circuito térmico para el colector tenemos la Fig. 16.

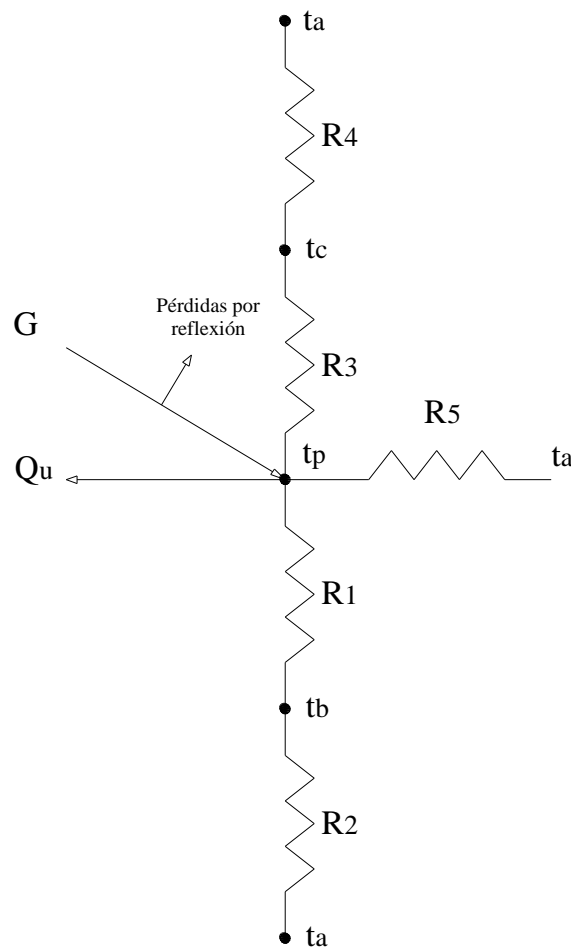


Fig. 16. Circuito térmico para el colector de placa plana.

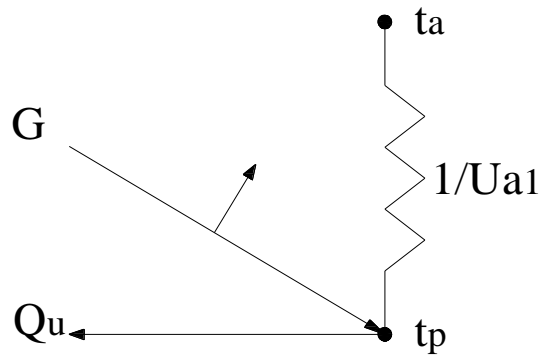


Fig. 17. Circuito térmico equivalente para el colector de placa plana.

Las pérdidas de energía a través de la base del colector son representadas por dos resistencias en serie, R1 y R2. R1 representa la resistencia al flujo de calor a través del aislamiento y R2 representa la resistencia al flujo de calor por convección y radiación.

Las magnitudes de R1 y R2 son tales que usualmente es posible asumir que R2 es igual a cero y que toda la resistencia al flujo de calor es debida al aislamiento.

Así; el coeficiente de pérdidas por la base es:

$$U_2 = \frac{1}{R_1}$$

$$U_2 = \frac{k_a}{e_a} \quad (8) \text{ Ref. [1], pág.265.}$$

k_a = Coeficiente de transferencia de calor por conducción. $w/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

e_a = Espesor de aislamiento. cm

Par a la mayoría de los colectores, la evaluación de las pérdidas a través de los costados es bastante complicada. Sin embargo, en un sistema bien diseñado las pérdidas por los costados pueden ser pequeñas. Tales así que no es necesario el predecirlas con mayor precisión. TABOR (1958) recomienda aislamiento lateral con un espesor aproximadamente igual al del la base del colector. Las pérdidas por los costados son entonces estimadas asumiendo un flujo unidimensional, alrededor del perímetro del colector.

El coeficiente de pérdidas hacia la parte superior del colector, es el resultado de convección y radiación entre placas planas paralelas e inclinadas.

3.1.4 Conductancia térmica debido a la convección

Una ecuación experimental para la conductancia térmica debida a la convección es:

$$h_{p.c} = [1 - 0,0018(\bar{t} - 10)] \left[1.14 \frac{\Delta_t^{0.31}}{10^{0.07}} \right] \quad (9) \text{ Ref. [4], pág.53.}$$

t = temperatura media entre el absorbedor y la cubierta. °C

$$\bar{t} = \frac{t_p + t_c}{2}$$

$$\Delta_t = t_p - t_c$$

l = Distancia entre el absorbedor y la cubierta de vidrio. cm

Todas las ecuaciones experimentales han sido obtenidas de la referencia [1] de la bibliografía.

3.1.5 Conductancia térmica debido a la radiación

Para la conductancia térmica debida a la radiación tenemos:

$$h_{rp} = \frac{\sigma(t_p+t_c)(t_p^2+t_c^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (10) \text{ Ref. [1], pág.256.}$$

h_{rp} = Coeficiente de radiación desde absorbedor a la cubierta. $w/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

ϵ_c = Emisividad de la cubierta.

ϵ_p = Emisividad de la placa absorbedora.

σ = Constante de Stefan – Boltzman.

t_p = Temperatura del absorbedor. K

t_c = Temperatura de la cubierta de vidrio. K

Por ende de la Fig. 16.

$$R_3 = \frac{1}{h_{p-c} + h_{rp}} \quad (11) \text{ Ref. [1], pág.256.}$$

La resistencia R_4 de la cubierta de vidrio al ambiente es de la misma forma de la ecuación (11) pero el coeficiente de transferencia de calor por convección es debido al viento que sopla sobre la superficie del colector.

Valores aproximados para este coeficiente están dados por la siguiente ecuación que fue desarrollada por Mc Adamas.

$$h_v = 5,7 + 3,8V \quad 0 < V < 5 \quad (12) \text{ Ref. [1], pág.175.}$$

Wattmuff propone que la siguiente relación es más precisa.

$$h_v = 2,8 + 3V \quad 0 < V < 7 \quad (13) \text{ Ref. [1], pág.175.}$$

V = Velocidad del viento. m/s

Ellos sugieren que la ecuación (12) incluye a la radiación como una componente de la convección, mientras que la ecuación (13) más propiamente se refiere solo a la convección. En nuestro caso utilizaremos la ecuación (13).

3.1.6 coeficiente para la radiación de la cubierta superior al ambiente

El coeficiente para la radiación de la cubierta superior al ambiente ocurre por intercambio de radiación con el cielo o firmamento a la temperatura del cielo.

Para simplicidad, podemos referirnos a este coeficiente a la temperatura del aire, de tal forma que la ecuación para la radiación puede ser escrita como:

$$h_{rc} = \epsilon_c \sigma (t_c + t_a)(t_c^2 + t_a^2) \quad (14) \text{ Ref. [1], pág.257.}$$

Luego:

$$R_4 = \frac{1}{h_v + h_{rc}}$$

$$U_1 = \frac{1}{R_3 + R_4}$$

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_{p_c} + h_{rp}} + \frac{1}{h_v + h_{rc}}}$$

$$U_1 = \left[\frac{1}{h_{p_c} + h_{rp}} + \frac{1}{h_v + h_{rc}} \right]^{-1} \quad (15) \text{ Ref. [1], pág.267.}$$

Considerando las pérdidas a través de los costados:

$$U_L A_L = \frac{K_a A_L}{e_a}$$

Si basamos las pérdidas por los costados sobre el área frontal del colector tenemos:

$$U_3 = \frac{U_L A_L}{A_{a1}}$$

$$U_3 = \frac{K_a A_L}{e_a A_{a1}} \quad (16) \text{ Ref. [4], pág.57.}$$

3.1.7 coeficiente global de pérdidas

El coeficiente global de pérdidas será:

$$U_{a1} = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_{a1} = \left[\frac{1}{h_{p,c} + h_{rp}} + \frac{1}{h_v + h_{rc}} \right]^{-1} + \frac{K_a}{e_a} + \frac{K_a A_L}{e_a A_{a1}} \quad (17) \text{ Ref. [4], pág.58.}$$

Para el tanque de almacenamiento, a sumiendo que no hay pérdidas en la tubería de conexión, el calor que gana el agua del tanque será igual al calor que gana el agua a la salida del colector menos las pérdidas de energía por convección en el tanque, es decir:

$$\begin{array}{l} \text{Calor ganado por el agua} \\ \text{del tanque} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Calor ganado por el agua} \\ \text{en el colector} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Pérdidas de calor en el} \\ \text{tanque} \end{array}$$

$$(mC)_t \frac{dt_m}{d\theta} = m_1 C_p (t_{s1} - t_{e1}) - q_{pt1} \quad (18) \text{ Ref. [4], pág.58.}$$

$$q_{pt1} = U_{t1} A_{t1} (t_m - t_a) \quad (19) \text{ Ref. [4], pág.58.}$$

$$U_t = \frac{k_t}{e_t} + \frac{k_a}{e_a} \quad (20) \text{ Ref. [4], pág.58.}$$

K_a = Conductividad del aislamiento $w/m \text{ } ^\circ\text{C}$

K_t = Conductividad del material del tanque $w/m \text{ } ^\circ\text{C}$

e_a = Espesor del aislamiento. cm

e_t = Espesor del tanque. cm

t_m = Temperatura media del tanque $^\circ\text{C}$

c_p = Capacidad calorífica equivalente del agua del tanque. $J/Kg. \text{ } ^\circ\text{C}$

U_t = Coeficiente total de pérdidas del tanque $w/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

A_{t1} = Área lateral del tanque m^2

3.1.8 Cálculo de la eficiencia

La eficiencia de un colector de placa plana se define como:

$$\eta = \frac{\text{Calor ganado por el agua}}{(\text{Irradiación solar})(\text{Area del absorbedor})}$$

El calor q_u ganado por el agua en el colector viene dado por:

$$q_u = m_1 c_p (t_{s1} - t_{e1})$$

De la ecuación (4)

$$m_1 c_p (t_{s1} - t_{e1}) = q_{a1} - q_{pa1}$$

De las ecuaciones (5) y (6)

$$q_u = \alpha \tau A_{a1} G - U_{a1} \cdot A_{a1} (t_{n1} - t_a)$$

$$\eta = \frac{\alpha \tau G A_{a1} - U_{a1} A_{a1} (t_{n1} - t_a)}{G \cdot A_{a1}}$$

$$\eta = \frac{\alpha \tau G - U_{a1} (t_{n1} - t_a)}{G} \quad (21) \text{ Ref. [4], pág.60.}$$

3.1.9 Flujo de agua por termosifón

La razón de flujo de agua por termosifón puede ser calculada de la siguiente forma:

Para el colector de placa plana tenemos de las ecuaciones (4), (5) Y (6).

$$q_{a1} = q_{pa1} + m_1 c_p (t_{s1} - t_{e1}) A_{a1}$$

$$q_{pa1} = U_{a1} A_{a1} (t_{n1} - t_a)$$

$$q_{a1} = \alpha \tau A_{a1} G$$

$$m_1 = \frac{q_{a1} - q_{pa1}}{c_p (t_{s1} - t_{e1}) A_{a1}}$$

$$m_1 = \frac{\alpha \tau A_{a1} G - U_{a1} A_{a1} (t_{n1} - t_a)}{c_p (t_{s1} - t_{e1}) A_{a1}}$$

$$m_1 = \frac{\alpha \tau G - U_{a1} (t_{n1} - t_a)}{c_p (t_{s1} - t_{e1})} \quad (22) \text{ Ref. [4], pág.75.}$$

c_p = Calor específico del agua. $J/Kg \cdot ^\circ C$

t_{s1} = Temperatura del agua a la salida del colector. $^\circ C$

t_{e1} = Temperatura del agua a la entrada del colector. $^\circ C$

t_{n1} = Temperatura media del absorbedor en el colector. $^\circ C$

CAPÍTULO IV: Fase de experimentación

4.1 Forma y descripción de las pruebas experimentales

Para la realización de las pruebas experimentales, se procedió a colocar sensores LM35 en diferentes sitios de nuestros cuatro sistemas de convección natural, así; se colocaron sensores para medir la temperatura de entrada y salida del agua en el colector; para medir la temperatura media del absorbedor se colocó tres sensores en forma diagonal ubicados en la parte superior, media y baja de este. Se tomo también la temperatura de la cubierta de vidrio, y la temperatura media del agua del tanque de almacenamiento.

Todas estas siete temperaturas en cada sistema fueron recogidas insertando la peineta en las ranuras de un termómetro digital, calibrado electrónicamente. Además se obtuvo los datos para la temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar total.

Nuestro colector fue abastecido de agua potable, y el tanque de almacenamiento operó con una capacidad de 50 litros.

Se tomaron mediciones de temperatura cada 10 minutos, es decir, para los promedios de cada hora se dispuso de seis datos experimentales para cada temperatura, las pruebas experimentales se realizaron a partir de las 9:00 horas y terminaron a las 16:00 horas cada día, considerando que en el lapso comprendido entre esas horas se obtiene en la superficie terrestre alrededor del 90 % de la radiación solar diaria. Se realizaron pruebas para 15 grados con respecto a la horizontal, y se efectuaron para diferentes condiciones atmosféricas tales como para días soleados, seminublados y completamente nublados.

Una vez obtenidos los datos experimentales, se realizaron los cálculos para obtener las diferentes eficiencias de nuestros colectores solares.

4.2 parámetros característicos de los colectores construidos

| Tipos de Colectores | Colector Cu Acanalado | Colector Cu Soldado | Colector Al Acanalado | Colector Al Soldado |
|-------------------------|---|---|---|---|
| Constantes | ABSORBEDOR | | | |
| Area | 0,6m ² | 0,6m ² | 0,6m ² | 0,6m ² |
| Espesor | 0,5 mm | 0,5 mm | 1 mm | 1 mm |
| Emisividad ϵ_p | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| Abortividad α | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Constantes | CUBIERTA | | | |
| Transmitancia τ | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| Emisividad ϵ_c | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| Constantes | AISLAMIENTO | | | |
| Coef. Tras. K_a | 0,038 w/m ² °C | 0,038 w/m ² °C | 0,038 w/m ² °C | 0,038 w/m ² °C |
| Espesor base | 40 mm | 40 mm | 40 mm | 40 mm |
| Espesor lateral | 20 mm | 20 mm | 20 mm | 20 mm |
| Dist. Abso-cubi. | 60 mm | 60 mm | 60 mm | 60 mm |
| Área lateral | 0,36 m ² | 0,36 m ² | 0,36 m ² | 0,36 m ² |
| Stefan-Boltzman | 5,67E ⁻⁸ w/m ² K ⁴ | 5,67E ⁻⁸ w/m ² K ⁴ | 5,67E ⁻⁸ w/m ² K ⁴ | 5,67E ⁻⁸ w/m ² K ⁴ |

4.3 Semanas de experimentación

Las tablas de pruebas 1 a 4 están comprendidas para cada tipo de colector, es decir Cobre y Aluminio y sus dos técnicas constructivas acanalado y soldado y representan los datos experimentales recogidos y los cálculos respectivos realizados para cada uno.

La simbología para estas tablas es la siguiente:

t_{n1} = Temperatura media del absorbedor en el colector convencional °C

t_c = Temperatura media de la cubierta en el colector convencional °C

t_{e1} = Temperatura del agua a la entrada del colector convencional °C

t_{s1} = Temperatura del agua a la salida del colector convencional °C

t_a = Temperatura del aire °C

V = Velocidad del viento m/s

G = Irradiación solar total w/m²

$\alpha\tau G$ = Irradiación solar incidente sobre el absorbedor en el colector convencional w/m²

θ = Ángulo de inclinación del colector

TABLA1. Prueba1: Semana del 23 al 27 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------|--------|-----------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | ατG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 38,00 | 17,00 | 23,00 | 30,00 | 16,00 | 2,10 | 741,00 | 619,48 | 28,00 |
| 10am - 11am | 45,00 | 20,00 | 27,30 | 35,67 | 17,00 | 1,80 | 817,00 | 683,01 | 33,30 |
| 11am -12pm | 52,00 | 25,00 | 31,21 | 39,00 | 17,67 | 1,50 | 440,00 | 367,84 | 38,00 |
| 12pm -13pm | 59,71 | 27,00 | 36,14 | 47,14 | 21,67 | 2,56 | 899,00 | 751,56 | 44,00 |
| 13pm -14pm | 67,85 | 34,00 | 41,00 | 53,00 | 23,67 | 2,43 | 900,00 | 752,40 | 50,00 |
| 14pm -15pm | 76,00 | 40,00 | 46,00 | 58,00 | 25,00 | 0,76 | 804,50 | 672,56 | 56,00 |
| 15pm -16pm | 88,21 | 48,00 | 53,33 | 69,64 | 26,00 | 0,76 | 765,00 | 639,54 | 65,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|-------|----------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|-------|-----------|--------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Cobre | Tipo de fabricación: | | | | | Acanalado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | U _{a1} | q _u / A _{a1} | q _{pa1} / A _{a1} | m1 | % ηHora | % ηDia |
| 09am - 10am | 2,50 | 4,95 | 9,10 | 4,85 | 4,86 | 0,95 | 0,33 | 6,14 | 484,48 | 135,00 | 57,68 | 65,38 | 48,72 |
| 10am - 11am | 2,62 | 5,20 | 8,20 | 4,95 | 4,90 | 0,95 | 0,33 | 6,18 | 509,89 | 173,12 | 50,77 | 62,41 | |
| 11am -12pm | 2,65 | 5,51 | 7,30 | 5,10 | 4,92 | 0,95 | 0,33 | 6,20 | 154,91 | 212,93 | 16,57 | 35,21 | |
| 12pm -13pm | 2,79 | 5,78 | 10,48 | 5,25 | 5,55 | 0,95 | 0,33 | 6,83 | 491,88 | 259,69 | 52,62 | 54,71 | |
| 13pm -14pm | 2,78 | 6,20 | 10,09 | 5,50 | 5,70 | 0,95 | 0,33 | 6,98 | 444,12 | 308,28 | 30,84 | 49,35 | |
| 14pm -15pm | 2,79 | 6,62 | 5,08 | 5,70 | 5,03 | 0,95 | 0,33 | 6,31 | 350,99 | 321,57 | 24,37 | 43,63 | |
| 15pm -16pm | 2,83 | 7,25 | 5,08 | 5,96 | 5,27 | 0,95 | 0,33 | 6,55 | 232,09 | 407,45 | 11,86 | 30,34 | |

TABLA2. Prueba2: Semana del 23 al 27 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|--------|---------|---------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | | Tipo de fabricación: | | Soldado | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | ατG | Ttanque |
| 09am - 10am | 49,00 | 20,00 | 24,00 | 30,00 | 16,00 | 2,10 | 741,00 | 619,48 | 28,00 |
| 10am - 11am | 56,00 | 21,00 | 26,57 | 33,21 | 17,00 | 1,80 | 817,00 | 683,01 | 31,00 |
| 11am -12pm | 64,00 | 28,00 | 28,28 | 35,35 | 17,67 | 1,50 | 440,00 | 367,84 | 33,00 |
| 12pm -13pm | 69,00 | 32,00 | 31,71 | 39,64 | 21,67 | 2,56 | 899,00 | 751,56 | 37,00 |
| 13pm -14pm | 77,00 | 38,00 | 36,85 | 46,00 | 23,67 | 2,43 | 900,00 | 752,40 | 43,00 |
| 14pm -15pm | 80,50 | 48,00 | 39,43 | 49,29 | 25,00 | 0,76 | 804,50 | 672,56 | 46,00 |
| 15pm -16pm | 91,00 | 54,00 | 44,57 | 55,71 | 26,00 | 0,76 | 765,00 | 639,54 | 52,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|------|-------|------|----------------------|------------------------|-------|----------------------|--------|---------|--|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | | Cobre | | | | | Tipo de fabricación: | | Soldado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q _u / Aa1 | q _{pa1} / Aa1 | m1 | % ηHora | % ηDia | | |
| 09am - 10am | 2,73 | 5,31 | 9,10 | 4,93 | 5,11 | 0,95 | 0,33 | 6,39 | 408,64 | 210,83 | 56,76 | 55,15 | 39,72 | | |
| 10am - 11am | 2,87 | 5,52 | 8,20 | 4,98 | 5,13 | 0,95 | 0,33 | 6,41 | 433,13 | 249,88 | 54,36 | 53,02 | | | |
| 11am -12pm | 2,86 | 5,93 | 7,30 | 5,18 | 5,16 | 0,95 | 0,33 | 6,44 | 69,69 | 298,15 | 8,21 | 15,84 | | | |
| 12pm -13pm | 2,86 | 6,18 | 10,48 | 5,39 | 5,76 | 0,95 | 0,33 | 7,04 | 418,41 | 333,16 | 43,97 | 46,54 | | | |
| 13pm -14pm | 2,86 | 6,60 | 10,09 | 5,61 | 5,90 | 0,95 | 0,33 | 7,18 | 369,36 | 383,04 | 33,64 | 41,04 | | | |
| 14pm -15pm | 2,67 | 7,00 | 5,08 | 5,93 | 5,15 | 0,95 | 0,33 | 6,43 | 315,76 | 356,80 | 26,69 | 39,25 | | | |
| 15pm -16pm | 2,73 | 7,53 | 5,08 | 6,14 | 5,36 | 0,95 | 0,33 | 6,64 | 207,91 | 431,63 | 15,55 | 27,18 | | | |

TABLA3. Prueba3: Semana del 23 al 27 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|------|----------------------|--------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | | | Tipo de fabricación: | | Soldado |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | αTG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 47,00 | 17,00 | 24,00 | 27,00 | 16,00 | 2,10 | 741,00 | 619,48 | 26,00 |
| 10am - 11am | 54,00 | 20,00 | 25,61 | 32,19 | 17,00 | 1,80 | 817,00 | 683,01 | 31,00 |
| 11am -12pm | 63,00 | 26,60 | 27,68 | 34,26 | 17,67 | 1,50 | 440,00 | 367,84 | 33,00 |
| 12pm -13pm | 68,00 | 29,00 | 30,15 | 38,42 | 21,67 | 2,56 | 899,00 | 751,56 | 37,00 |
| 13pm -14pm | 75,00 | 33,00 | 34,69 | 44,65 | 23,67 | 2,43 | 900,00 | 752,40 | 43,00 |
| 14pm -15pm | 78,00 | 37,00 | 36,46 | 47,77 | 25,00 | 0,76 | 804,50 | 672,56 | 46,00 |
| 15pm -16pm | 89,00 | 33,91 | 47,99 | 54,00 | 26,00 | 0,76 | 765,00 | 639,54 | 45,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|----------|------|------|----------------------|------------------------|----------------------|---------|---------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Aluminio | | | | | Tipo de fabricación: | | Soldado |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q _u / Aa1 | q _{pa1} / Aa1 | m1 | % ηHora | % ηDia |
| 09am -10am | 2,77 | 5,18 | 9,10 | 4,85 | 5,06 | 0,95 | 0,33 | 6,34 | 422,80 | 196,67 | 94,22 | 52,92 | 33,60 |
| 10am -11am | 2,85 | 5,44 | 8,20 | 4,95 | 5,09 | 0,95 | 0,33 | 6,37 | 447,44 | 235,57 | 20,78 | 34,32 | |
| 11am -12pm | 2,87 | 5,86 | 7,30 | 5,14 | 5,13 | 0,95 | 0,33 | 6,41 | 77,19 | 290,65 | 9,78 | 17,54 | |
| 12pm -13pm | 2,91 | 6,07 | 10,48 | 5,31 | 5,73 | 0,95 | 0,33 | 7,01 | 426,94 | 324,62 | 29,40 | 34,86 | |
| 13pm -14pm | 2,95 | 6,39 | 10,09 | 5,47 | 5,84 | 0,95 | 0,33 | 7,12 | 387,06 | 365,34 | 25,39 | 37,93 | |
| 14pm -15pm | 2,91 | 6,60 | 5,08 | 5,62 | 5,03 | 0,95 | 0,33 | 6,31 | 337,96 | 334,60 | 16,92 | 34,03 | |
| 15pm -16pm | 3,16 | 6,86 | 5,08 | 5,56 | 5,16 | 0,95 | 0,33 | 6,44 | 233,83 | 405,71 | 22,11 | 23,58 | |

TABLA4. Prueba4: Semana del 23 al 27 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------|--------|-----------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | ατG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 38,00 | 17,00 | 21,00 | 28,00 | 16,00 | 2,10 | 741,00 | 619,48 | 26,00 |
| 10am - 11am | 43,00 | 19,00 | 24,23 | 32,30 | 17,00 | 1,80 | 817,00 | 683,01 | 30,00 |
| 11am -12pm | 50,00 | 22,88 | 28,26 | 37,69 | 17,67 | 1,50 | 440,00 | 367,84 | 35,00 |
| 12pm -13pm | 56,80 | 26,00 | 31,50 | 42,00 | 21,67 | 2,56 | 899,00 | 751,56 | 39,00 |
| 13pm -14pm | 66,90 | 30,00 | 37,15 | 49,53 | 23,67 | 2,43 | 900,00 | 752,40 | 46,00 |
| 14pm -15pm | 77,48 | 33,33 | 41,11 | 54,92 | 25,00 | 0,76 | 804,50 | 672,56 | 51,00 |
| 15pm -16pm | 85,55 | 36,00 | 44,42 | 59,00 | 26,00 | 0,76 | 765,00 | 639,54 | 55,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|----------|----------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|-------|-----------|--------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Aluminio | Tipo de fabricación: | | | | | Acanalado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | U _{a1} | q _u / A _{a1} | q _{pa1} / A _{a1} | m1 | % ηHora | % ηDia |
| 09am - 10am | 2,50 | 4,95 | 9,10 | 4,85 | 4,86 | 0,95 | 0,33 | 6,14 | 484,48 | 135,00 | 23,84 | 49,93 | 41,29 |
| 10am - 11am | 2,59 | 5,12 | 8,20 | 4,93 | 4,86 | 0,95 | 0,33 | 6,14 | 523,40 | 159,61 | 24,78 | 50,21 | |
| 11am -12pm | 2,66 | 5,41 | 7,30 | 5,04 | 4,88 | 0,95 | 0,33 | 6,16 | 168,71 | 199,13 | 14,91 | 38,34 | |
| 12pm -13pm | 2,75 | 5,67 | 10,48 | 5,23 | 5,48 | 0,95 | 0,33 | 6,76 | 514,07 | 237,50 | 28,21 | 47,94 | |
| 13pm -14pm | 2,86 | 6,07 | 10,09 | 5,39 | 5,66 | 0,95 | 0,33 | 6,94 | 452,23 | 300,17 | 19,19 | 40,72 | |
| 14pm -15pm | 2,99 | 6,48 | 5,08 | 5,52 | 5,00 | 0,95 | 0,33 | 6,28 | 343,03 | 329,53 | 14,17 | 34,78 | |
| 15pm -16pm | 3,06 | 6,81 | 5,08 | 5,62 | 5,13 | 0,95 | 0,33 | 6,41 | 257,61 | 381,93 | 10,47 | 27,10 | |

TABLA5. Prueba1: Semana del 7 al 12 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|--------|------------------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | | Tipo de fabricación: | | Acanalado | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | αtG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 28,00 | 17,00 | 25,00 | 35,00 | 15,67 | 1,10 | 151,00 | 126,24 | 32,33 |
| 10am - 11am | 34,67 | 20,00 | 28,67 | 36,70 | 16,67 | 1,47 | 163,33 | 136,55 | 33,33 |
| 11am -12pm | 32,33 | 19,33 | 27,00 | 35,67 | 18,00 | 1,10 | 185,00 | 154,66 | 35,00 |
| 12pm -13pm | 32,50 | 19,00 | 28,00 | 36,54 | 18,00 | 1,00 | 111,00 | 92,80 | 34,50 |
| 13pm -14pm | 35,00 | 20,00 | 28,00 | 38,00 | 21,00 | 1,30 | 270,00 | 225,72 | 37,00 |
| 14pm -15pm | 32,00 | 18,00 | 27,00 | 40,56 | 17,00 | 1,50 | 159,00 | 132,92 | 38,00 |
| 15pm -16pm | 33,00 | 19,00 | 31,00 | 38,00 | 22,00 | 1,90 | 160,00 | 133,76 | 40,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|--------------|------|------|----------------------|------------------------|-------|------------------|--------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Cobre | | | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q _u / Aa1 | q _{pa1} / Aa1 | m1 | % ηHora | % ηDia |
| 09am - 10am | 2,07 | 4,70 | 6,10 | 4,84 | 4,18 | 0,95 | 0,33 | 5,46 | 58,88 | 67,35 | 4,91 | 38,99 | 33,79 |
| 10am - 11am | 2,24 | 4,94 | 7,20 | 4,94 | 4,51 | 0,95 | 0,33 | 5,79 | 32,32 | 104,22 | 3,35 | 19,79 | |
| 11am -12pm | 2,16 | 4,86 | 6,10 | 4,96 | 4,30 | 0,95 | 0,33 | 5,58 | 74,73 | 79,93 | 7,18 | 40,40 | |
| 12pm -13pm | 2,19 | 4,86 | 5,80 | 4,95 | 4,26 | 0,95 | 0,33 | 5,54 | 12,51 | 80,28 | 1,20 | 11,27 | |
| 13pm -14pm | 2,25 | 4,94 | 6,70 | 5,05 | 4,46 | 0,95 | 0,33 | 5,74 | 145,30 | 80,42 | 12,11 | 53,81 | |
| 14pm -15pm | 2,22 | 4,82 | 7,30 | 4,90 | 4,46 | 0,95 | 0,33 | 5,74 | 46,77 | 86,15 | 2,87 | 29,42 | |
| 15pm -16pm | 2,21 | 4,87 | 8,50 | 5,05 | 4,65 | 0,95 | 0,33 | 5,93 | 68,51 | 65,25 | 8,16 | 42,82 | |

TABLA6. Prueba2: Semana del 7 al 12 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|-------|----------|--------------|-------|----------------------|--------|----------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | | Tipo de fabricación: | | Soldado | |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | αT_G | T_{tanque} |
| 09am - 10am | 31,00 | 19,33 | 25,67 | 34,00 | 15,67 | 1,10 | 151,00 | 126,24 | 32,67 |
| 10am - 11am | 35,33 | 23,00 | 30,00 | 37,50 | 16,67 | 1,47 | 163,33 | 136,55 | 33,67 |
| 11am -12pm | 34,67 | 20,33 | 28,00 | 38,00 | 18,00 | 1,10 | 185,00 | 154,66 | 31,00 |
| 12pm -13pm | 30,00 | 20,00 | 28,00 | 35,00 | 18,00 | 1,00 | 111,00 | 92,80 | 31,00 |
| 13pm -14pm | 40,00 | 24,00 | 31,00 | 36,67 | 21,00 | 1,30 | 270,00 | 225,72 | 32,00 |
| 14pm -15pm | 33,00 | 17,00 | 28,00 | 38,00 | 17,00 | 1,50 | 159,00 | 132,92 | 33,00 |
| 15pm -16pm | 36,00 | 18,00 | 31,00 | 36,80 | 22,00 | 1,90 | 160,00 | 133,76 | 34,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|----------|-------|----------|------|--------------|------|------|----------------------|------------------|-------|----------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Cobre | | | Tipo de fabricación: | | | Soldado | |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q_u/A_{a1} | q_{pa1}/A_{a1} | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 2,09 | 4,83 | 6,10 | 4,90 | 4,25 | 0,95 | 0,33 | 5,53 | 41,46 | 84,78 | 4,15 | 27,45 | 28,73 |
| 10am - 11am | 2,12 | 5,03 | 7,20 | 5,02 | 4,51 | 0,95 | 0,33 | 5,79 | 28,52 | 108,03 | 3,17 | 17,46 | |
| 11am -12pm | 2,22 | 4,94 | 6,10 | 4,99 | 4,35 | 0,95 | 0,33 | 5,63 | 60,78 | 93,88 | 5,07 | 32,85 | |
| 12pm -13pm | 2,00 | 4,82 | 5,80 | 4,98 | 4,18 | 0,95 | 0,33 | 5,46 | 27,33 | 65,47 | 3,25 | 24,62 | |
| 13pm -14pm | 2,28 | 5,17 | 6,70 | 5,16 | 4,58 | 0,95 | 0,33 | 5,86 | 114,46 | 111,26 | 16,82 | 42,39 | |
| 14pm -15pm | 2,31 | 4,82 | 7,30 | 4,88 | 4,50 | 0,95 | 0,33 | 5,78 | 40,48 | 92,45 | 3,37 | 25,46 | |
| 15pm -16pm | 2,39 | 4,92 | 8,50 | 5,03 | 4,75 | 0,95 | 0,33 | 6,03 | 49,41 | 84,35 | 7,10 | 30,88 | |

TABLA7. Prueba3: Semana del 7 al 12 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|-------|----------|----------|-------|------|----------------------|--------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | | | Tipo de fabricación: | | Soldado |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | αT_G | T_{tanque} |
| 09am - 10am | 32,33 | 16,67 | 25,33 | 28,33 | 15,67 | 1,10 | 151,00 | 126,24 | 27,00 |
| 10am - 11am | 36,67 | 17,00 | 26,00 | 30,00 | 16,67 | 1,47 | 163,33 | 136,55 | 27,00 |
| 11am -12pm | 34,33 | 20,00 | 24,33 | 28,67 | 18,00 | 1,10 | 185,00 | 154,66 | 25,00 |
| 12pm -13pm | 33,00 | 20,00 | 24,00 | 29,00 | 18,00 | 1,00 | 111,00 | 92,80 | 26,50 |
| 13pm -14pm | 38,00 | 23,00 | 26,00 | 32,98 | 21,00 | 1,30 | 270,00 | 225,72 | 28,00 |
| 14pm -15pm | 32,00 | 17,00 | 27,00 | 34,55 | 17,00 | 1,50 | 159,00 | 132,92 | 29,00 |
| 15pm -16pm | 35,00 | 21,00 | 28,00 | 33,00 | 22,00 | 1,90 | 160,00 | 133,76 | 30,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|----------|-------|----------|------|----------|------|------|----------------------|------------------|-------|---------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Aluminio | | | Tipo de fabricación: | | | Soldado | |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q_u/A_{a1} | q_{pa1}/A_{a1} | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 2,30 | 4,80 | 6,10 | 4,83 | 4,30 | 0,95 | 0,33 | 5,58 | 33,18 | 93,05 | 9,22 | 21,98 | 26,84 |
| 10am - 11am | 2,46 | 4,91 | 7,20 | 4,87 | 4,57 | 0,95 | 0,33 | 5,85 | 19,45 | 117,10 | 4,05 | 11,91 | |
| 11am -12pm | 2,22 | 4,93 | 6,10 | 4,98 | 4,35 | 0,95 | 0,33 | 5,63 | 62,77 | 91,89 | 12,06 | 33,93 | |
| 12pm -13pm | 2,16 | 4,89 | 5,80 | 4,98 | 4,26 | 0,95 | 0,33 | 5,54 | 9,64 | 83,16 | 1,85 | 8,68 | |
| 13pm -14pm | 2,24 | 5,09 | 6,70 | 5,13 | 4,53 | 0,95 | 0,33 | 5,81 | 126,98 | 98,74 | 15,16 | 47,03 | |
| 14pm -15pm | 2,27 | 4,80 | 7,30 | 4,88 | 4,47 | 0,95 | 0,33 | 5,75 | 46,66 | 86,26 | 5,15 | 29,35 | |
| 15pm -16pm | 2,21 | 4,97 | 8,50 | 5,11 | 4,70 | 0,95 | 0,33 | 5,98 | 56,06 | 77,70 | 9,34 | 35,04 | |

TABLA8. Prueba4: Semana del 7 al 12 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|-------|----------|-----------------|-------|---------------------------------------|--------|--------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | | Tipo de fabricación: Acanalado | | | |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | αT_G | T_{tanque} |
| 09am - 10am | 27,33 | 16,00 | 24,33 | 29,43 | 15,67 | 1,10 | 151,00 | 126,24 | 27,67 |
| 10am - 11am | 33,00 | 17,67 | 27,33 | 30,00 | 16,67 | 1,47 | 163,33 | 136,55 | 28,00 |
| 11am -12pm | 31,33 | 18,33 | 25,33 | 31,67 | 18,00 | 1,10 | 185,00 | 154,66 | 26,67 |
| 12pm -13pm | 32,00 | 18,50 | 26,00 | 31,67 | 18,00 | 1,00 | 111,00 | 92,80 | 28,00 |
| 13pm -14pm | 35,00 | 20,00 | 27,00 | 34,00 | 21,00 | 1,30 | 270,00 | 225,72 | 30,00 |
| 14pm -15pm | 31,00 | 17,00 | 31,00 | 32,00 | 17,00 | 1,50 | 159,00 | 132,92 | 33,00 |
| 15pm -16pm | 34,00 | 20,00 | 32,00 | 39,89 | 22,00 | 1,90 | 160,00 | 133,76 | 35,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|----------|-------|----------|------|------|----------------------|------|-----------|---------------|-------|------------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | | Tipo de fabricación: | | | | | Acanalado | |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | $q_u/Aa1$ | $q_{pa1}/Aa1$ | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 2,09 | 4,66 | 6,10 | 4,82 | 4,17 | 0,95 | 0,33 | 5,45 | 62,64 | 63,60 | 10,24 | 41,48 | 29,89 |
| 10am - 11am | 2,28 | 4,84 | 7,20 | 4,88 | 4,48 | 0,95 | 0,33 | 5,76 | 42,48 | 94,07 | 13,28 | 26,01 | |
| 11am -12pm | 2,17 | 4,81 | 6,10 | 4,93 | 4,28 | 0,95 | 0,33 | 5,56 | 80,58 | 74,08 | 10,60 | 43,56 | |
| 12pm -13pm | 2,19 | 4,83 | 5,80 | 4,94 | 4,25 | 0,95 | 0,33 | 5,53 | 15,42 | 77,37 | 2,03 | 13,89 | |
| 13pm -14pm | 2,25 | 4,94 | 6,70 | 5,05 | 4,46 | 0,95 | 0,33 | 5,74 | 145,30 | 80,42 | 17,30 | 12,15 | |
| 14pm -15pm | 2,22 | 4,77 | 7,30 | 4,88 | 4,44 | 0,95 | 0,33 | 5,72 | 52,81 | 80,11 | 44,01 | 33,21 | |
| 15pm -16pm | 2,21 | 4,92 | 8,50 | 5,08 | 4,67 | 0,95 | 0,33 | 5,95 | 62,31 | 71,45 | 6,58 | 38,94 | |

TABLA9. Prueba1: Semana del 21 al 25 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|-------|----------|----------|-------|----------------------|--------|----------------|---------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | | Tipo de fabricación: | | Acanalado | |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | $\alpha\tau G$ | Ttanque |
| 09am - 10am | 21,67 | 15,33 | 16,00 | 18,33 | 13,33 | 1,80 | 84,67 | 70,78 | 20,00 |
| 10am - 11am | 22,00 | 15,67 | 16,67 | 20,33 | 14,00 | 1,60 | 116,00 | 96,98 | 21,33 |
| 11am -12pm | 27,33 | 16,67 | 19,33 | 23,67 | 16,33 | 1,17 | 179,67 | 150,20 | 23,00 |
| 12pm -13pm | 26,67 | 17,33 | 19,33 | 23,67 | 16,67 | 1,20 | 136,00 | 113,70 | 23,00 |
| 13pm -14pm | 29,67 | 18,67 | 22,00 | 26,00 | 19,67 | 1,27 | 219,67 | 183,64 | 25,67 |
| 14pm -15pm | 28,67 | 17,67 | 23,33 | 26,33 | 18,33 | 1,20 | 95,33 | 79,70 | 27,33 |
| 15pm -16pm | 24,33 | 16,67 | 21,00 | 24,33 | 15,67 | 1,47 | 73,67 | 61,59 | 28,50 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|----------|-------|----------|------|-------|------|------|----------------------|---------------|-------|---------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Cobre | | | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | $q_u/Aa1$ | $q_{pa1}/Aa1$ | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 1,75 | 4,51 | 8,20 | 4,74 | 4,22 | 0,95 | 0,33 | 5,50 | 24,93 | 45,85 | 8,90 | 29,45 | 38,57 |
| 10am - 11am | 1,75 | 4,53 | 7,60 | 4,77 | 4,16 | 0,95 | 0,33 | 5,44 | 53,42 | 43,56 | 12,14 | 46,05 | |
| 11am -12pm | 2,05 | 4,68 | 6,30 | 4,85 | 4,20 | 0,95 | 0,33 | 5,48 | 89,98 | 60,23 | 17,30 | 50,08 | |
| 12pm -13pm | 1,97 | 4,68 | 6,40 | 4,88 | 4,18 | 0,95 | 0,33 | 5,46 | 59,10 | 54,60 | 11,36 | 43,45 | |
| 13pm -14pm | 2,06 | 4,78 | 6,60 | 4,99 | 4,30 | 0,95 | 0,33 | 5,58 | 127,83 | 55,81 | 26,63 | 58,19 | |
| 14pm -15pm | 2,06 | 4,73 | 6,40 | 4,93 | 4,25 | 0,95 | 0,33 | 5,53 | 22,58 | 57,12 | 6,27 | 23,69 | |
| 15pm -16pm | 1,86 | 4,60 | 7,20 | 4,83 | 4,20 | 0,95 | 0,33 | 5,48 | 14,06 | 47,52 | 3,52 | 19,09 | |

TABLA10. Prueba2: Semana del 21 al 25 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|-------|----------|--------------|-------|----------------------|--------|----------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | | Tipo de fabricación: | | Soldado | |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | αT_G | T_{tanque} |
| 09am - 10am | 21,33 | 15,00 | 16,33 | 18,67 | 13,33 | 1,80 | 84,67 | 70,78 | 18,67 |
| 10am - 11am | 25,00 | 14,00 | 17,67 | 20,00 | 14,00 | 1,60 | 116,00 | 96,98 | 18,67 |
| 11am -12pm | 31,00 | 15,33 | 17,67 | 23,33 | 16,33 | 1,17 | 179,67 | 150,20 | 21,33 |
| 12pm -13pm | 26,00 | 15,33 | 17,33 | 22,33 | 16,67 | 1,20 | 136,00 | 113,70 | 20,00 |
| 13pm -14pm | 33,00 | 16,33 | 21,00 | 24,67 | 19,67 | 1,27 | 219,67 | 183,64 | 22,00 |
| 14pm -15pm | 35,33 | 19,67 | 23,00 | 25,33 | 18,33 | 1,20 | 95,33 | 79,70 | 24,33 |
| 15pm -16pm | 27,67 | 17,33 | 20,67 | 23,67 | 15,67 | 1,47 | 73,67 | 61,59 | 24,33 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|----------|-------|----------|------|------|--------------|------|--------------|------------------|-------|----------------------|--------------|----------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | | Cobre | | | | | Tipo de fabricación: | | Soldado |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q_u/A_{a1} | q_{pa1}/A_{a1} | m1 | % η Hora | % η Día | |
| 09am - 10am | 1,76 | 4,50 | 8,20 | 4,73 | 4,21 | 0,95 | 0,33 | 5,49 | 26,83 | 43,95 | 9,58 | 31,68 | 32,72 | |
| 10am - 11am | 2,08 | 4,56 | 7,60 | 4,73 | 4,31 | 0,95 | 0,33 | 5,59 | 35,44 | 61,53 | 12,66 | 30,55 | | |
| 11am -12pm | 2,30 | 4,73 | 6,30 | 4,82 | 4,31 | 0,95 | 0,33 | 5,59 | 68,22 | 81,98 | 10,03 | 37,97 | | |
| 12pm -13pm | 2,05 | 4,61 | 6,40 | 4,83 | 4,18 | 0,95 | 0,33 | 5,46 | 62,71 | 50,99 | 10,45 | 46,11 | | |
| 13pm -14pm | 2,34 | 4,81 | 6,60 | 4,93 | 4,41 | 0,95 | 0,33 | 5,69 | 107,75 | 75,89 | 39,75 | 16,64 | | |
| 14pm -15pm | 2,29 | 4,94 | 6,40 | 4,98 | 4,42 | 0,95 | 0,33 | 5,70 | 33,51 | 96,91 | 15,25 | 25,57 | | |
| 15pm -16pm | 2,03 | 4,70 | 7,20 | 4,85 | 4,32 | 0,95 | 0,33 | 5,60 | 14,76 | 67,17 | 17,57 | 40,55 | | |

TABLA11. Prueba3: Semana del 21 al 25 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|-------|----------|----------|----------------------|------|--------|--------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | Tipo de fabricación: | | | Soldado | |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | αT_G | T_{tanque} |
| 09am - 10am | 21,33 | 16,33 | 15,33 | 17,00 | 13,33 | 1,80 | 84,67 | 70,78 | 15,00 |
| 10am - 11am | 24,67 | 16,00 | 15,33 | 19,00 | 14,00 | 1,60 | 116,00 | 96,98 | 16,33 |
| 11am -12pm | 29,00 | 20,00 | 18,00 | 23,33 | 16,33 | 1,17 | 179,67 | 150,20 | 19,00 |
| 12pm -13pm | 24,67 | 19,67 | 17,33 | 22,33 | 16,67 | 1,20 | 136,00 | 113,70 | 18,67 |
| 13pm -14pm | 30,00 | 24,33 | 23,33 | 25,00 | 19,67 | 1,27 | 219,67 | 183,64 | 20,67 |
| 14pm -15pm | 34,00 | 23,33 | 21,67 | 23,67 | 18,33 | 1,20 | 95,33 | 79,70 | 23,00 |
| 15pm -16pm | 26,00 | 18,33 | 19,67 | 22,67 | 15,67 | 1,47 | 73,67 | 61,59 | 22,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|----------|-------|----------|------|------|----------------------|------|--------------|------------------|-------|---------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | | Tipo de fabricación: | | | | | Soldado | |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q_u/A_{a1} | q_{pa1}/A_{a1} | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 1,63 | 4,53 | 8,20 | 4,77 | 4,17 | 0,95 | 0,33 | 5,45 | 27,15 | 43,63 | 13,57 | 32,06 | 30,52 |
| 10am - 11am | 1,93 | 4,60 | 7,60 | 4,78 | 4,27 | 0,95 | 0,33 | 5,55 | 37,75 | 59,22 | 8,58 | 32,55 | |
| 11am -12pm | 1,94 | 4,80 | 6,30 | 4,93 | 4,21 | 0,95 | 0,33 | 5,49 | 80,67 | 69,53 | 12,61 | 44,90 | |
| 12pm -13pm | 1,62 | 4,68 | 6,40 | 4,93 | 4,05 | 0,95 | 0,33 | 5,33 | 71,05 | 42,64 | 6,92 | 42,60 | |
| 13pm -14pm | 1,67 | 4,92 | 6,60 | 5,13 | 4,22 | 0,95 | 0,33 | 5,50 | 126,80 | 56,84 | 50,58 | 53,52 | |
| 14pm -15pm | 2,02 | 5,00 | 6,40 | 5,07 | 4,36 | 0,95 | 0,33 | 5,64 | -8,61 | 88,31 | 0,83 | 1,83 | |
| 15pm -16pm | 1,85 | 4,68 | 7,20 | 4,88 | 4,24 | 0,95 | 0,33 | 5,52 | 4,55 | 57,03 | 1,26 | 6,18 | |

TABLA12. Prueba4: Semana del 21 al 25 de enero 2010

| DATOS | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|--------|----------------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | | Tipo de fabricación: | | Acanalado | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | $\alpha\tau G$ | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 20,67 | 15,33 | 15,67 | 17,67 | 13,33 | 1,80 | 84,67 | 70,78 | 17,00 |
| 10am - 11am | 21,67 | 15,67 | 16,67 | 22,33 | 14,00 | 1,60 | 116,00 | 96,98 | 21,33 |
| 11am -12pm | 26,67 | 16,67 | 19,33 | 24,00 | 16,33 | 1,17 | 179,67 | 150,20 | 23,00 |
| 12pm -13pm | 25,67 | 16,00 | 19,33 | 24,33 | 16,67 | 1,20 | 136,00 | 113,70 | 23,00 |
| 13pm -14pm | 27,33 | 17,33 | 23,00 | 26,67 | 19,67 | 1,27 | 219,67 | 183,64 | 25,67 |
| 14pm -15pm | 26,67 | 17,33 | 23,33 | 28,33 | 18,33 | 1,20 | 95,33 | 79,70 | 27,33 |
| 15pm -16pm | 23,67 | 16,67 | 22,00 | 26,33 | 15,67 | 1,47 | 73,67 | 61,59 | 25,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------|------|------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------|---------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | Aluminio | | | | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | U _{a1} | q _u /A _{a1} | q _{pa1} /A _{a1} | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 1,67 | 4,49 | 8,20 | 4,74 | 4,17 | 0,95 | 0,33 | 5,45 | 30,81 | 39,97 | 12,84 | 36,39 | 34,80 |
| 10am - 11am | 1,73 | 4,52 | 7,60 | 4,77 | 4,15 | 0,95 | 0,33 | 5,43 | 55,35 | 41,62 | 8,14 | 47,72 | |
| 11am -12pm | 2,01 | 4,66 | 6,30 | 4,85 | 4,17 | 0,95 | 0,33 | 5,45 | 93,85 | 56,35 | 10,69 | 43,06 | |
| 12pm -13pm | 1,99 | 4,62 | 6,40 | 4,84 | 4,16 | 0,95 | 0,33 | 5,44 | 64,70 | 48,99 | 5,88 | 33,61 | |
| 13pm -14pm | 2,01 | 4,69 | 6,60 | 4,95 | 4,24 | 0,95 | 0,33 | 5,52 | 141,32 | 42,32 | 32,12 | 22,67 | |
| 14pm -15pm | 1,97 | 4,68 | 6,40 | 4,92 | 4,19 | 0,95 | 0,33 | 5,47 | 34,15 | 45,55 | 5,69 | 35,82 | |
| 15pm -16pm | 1,80 | 4,59 | 7,20 | 4,83 | 4,18 | 0,95 | 0,33 | 5,46 | 17,94 | 43,64 | 3,45 | 24,36 | |

TABLA13. Prueba1: Semana del 25 al 29 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|-------|----------|----------|----------------------|------|--------|--------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | t_{n1} | t_c | t_{e1} | t_{s1} | t_a | V | G | αT_G | T_{tanque} |
| 09am - 10am | 25,00 | 16,00 | 20,00 | 25,00 | 14,00 | 1,40 | 95,00 | 79,42 | 24,00 |
| 10am - 11am | 28,00 | 18,00 | 22,00 | 28,00 | 15,00 | 1,00 | 165,00 | 137,94 | 25,00 |
| 11am -12pm | 21,00 | 15,00 | 22,00 | 30,00 | 14,00 | 1,10 | 112,00 | 93,63 | 25,00 |
| 12pm -13pm | 22,00 | 16,00 | 24,00 | 34,65 | 13,00 | 1,00 | 69,00 | 57,68 | 30,00 |
| 13pm -14pm | 22,00 | 16,00 | 23,54 | 35,60 | 13,00 | 0,90 | 71,00 | 59,36 | 30,00 |
| 14pm -15pm | 22,00 | 15,00 | 22,00 | 33,00 | 14,00 | 1,20 | 87,00 | 72,73 | 27,00 |
| 15pm -16pm | 24,00 | 16,00 | 26,00 | 36,81 | 14,00 | 1,10 | 93,00 | 77,75 | 30,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|----------|-------|----------|------|------|-------|----------------------|--------------|------------------|------|---------------|--------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | | Cobre | Tipo de fabricación: | | | | Acanalado | |
| HORA | h_{p-c} | h_{rp} | h_v | h_{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q_u/A_{a1} | q_{pa1}/A_{a1} | m1 | % η Hora | % η Día |
| 09am - 10am | 1,95 | 4,60 | 7,00 | 4,78 | 4,21 | 0,95 | 0,33 | 5,49 | 19,02 | 60,40 | 3,17 | 20,02 | 29,53 |
| 10am - 11am | 2,01 | 4,72 | 5,80 | 4,85 | 4,12 | 0,95 | 0,33 | 5,40 | 67,69 | 70,25 | 9,40 | 41,03 | |
| 11am -12pm | 1,73 | 4,49 | 6,10 | 4,75 | 3,95 | 0,95 | 0,33 | 5,23 | 57,01 | 36,62 | 5,94 | 50,90 | |
| 12pm -13pm | 1,72 | 4,53 | 5,80 | 4,75 | 3,93 | 0,95 | 0,33 | 5,21 | 10,81 | 46,87 | 1,13 | 15,67 | |
| 13pm -14pm | 1,72 | 4,53 | 5,50 | 4,75 | 3,89 | 0,95 | 0,33 | 5,17 | 12,86 | 46,49 | 0,89 | 18,12 | |
| 14pm -15pm | 1,81 | 4,51 | 6,40 | 4,75 | 4,03 | 0,95 | 0,33 | 5,31 | 30,22 | 42,51 | 2,29 | 34,73 | |
| 15pm -16pm | 1,88 | 4,58 | 6,10 | 4,78 | 4,05 | 0,95 | 0,33 | 5,33 | 24,41 | 53,34 | 1,88 | 26,25 | |

TABLA14. Prueba2: Semana del 25 al 29 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------|--------|---------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Cobre | Tipo de fabricación: | | | Soldado | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | ατG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 23,00 | 16,00 | 19,00 | 26,50 | 14,00 | 1,40 | 95,00 | 79,42 | 24,00 |
| 10am - 11am | 31,00 | 19,00 | 20,00 | 27,00 | 15,00 | 1,00 | 165,00 | 137,94 | 24,00 |
| 11am -12pm | 24,00 | 18,00 | 22,00 | 29,00 | 14,00 | 1,10 | 112,00 | 93,63 | 25,00 |
| 12pm -13pm | 23,00 | 17,00 | 18,00 | 27,00 | 13,00 | 1,00 | 69,00 | 57,68 | 24,00 |
| 13pm -14pm | 23,00 | 16,00 | 19,00 | 28,00 | 13,00 | 0,90 | 71,00 | 59,36 | 24,00 |
| 14pm -15pm | 22,00 | 15,00 | 22,00 | 30,00 | 14,00 | 1,20 | 87,00 | 72,73 | 25,00 |
| 15pm -16pm | 23,00 | 15,00 | 21,00 | 29,00 | 14,00 | 1,10 | 93,00 | 77,75 | 25,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|------|-------|----------------------|----------------------|------------------------|------|---------|--------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | | Cobre | Tipo de fabricación: | | | | Soldado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q _u / Aa1 | q _{pa1} / Aa1 | m1 | % ηHora | % ηDía |
| 09am - 10am | 1,81 | 4,56 | 7,00 | 4,78 | 4,13 | 0,95 | 0,33 | 5,41 | 30,72 | 48,70 | 3,41 | 32,33 | 26,30 |
| 10am - 11am | 2,11 | 4,82 | 5,80 | 4,88 | 4,20 | 0,95 | 0,33 | 5,48 | 50,20 | 87,74 | 5,98 | 30,42 | |
| 11am -12pm | 1,72 | 4,63 | 6,10 | 4,83 | 4,01 | 0,95 | 0,33 | 5,29 | 40,69 | 52,94 | 4,84 | 36,33 | |
| 12pm -13pm | 1,72 | 4,58 | 5,80 | 4,78 | 3,95 | 0,95 | 0,33 | 5,23 | 5,40 | 52,29 | 0,50 | 7,82 | |
| 13pm -14pm | 1,81 | 4,56 | 5,50 | 4,75 | 3,93 | 0,95 | 0,33 | 5,21 | 7,29 | 52,06 | 0,68 | 10,27 | |
| 14pm -15pm | 1,81 | 4,51 | 6,40 | 4,75 | 4,03 | 0,95 | 0,33 | 5,31 | 30,22 | 42,51 | 3,15 | 34,73 | |
| 15pm -16pm | 1,88 | 4,53 | 6,10 | 4,75 | 4,03 | 0,95 | 0,33 | 5,31 | 29,93 | 47,82 | 3,12 | 32,18 | |

TABLA15. Prueba3: Semana del 25 al 29 de diciembre 2009

| DATOS | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|------|----------------------|--------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | | | Tipo de fabricación: | | Soldado |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | ατG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 23,00 | 15,00 | 19,00 | 26,50 | 14,00 | 1,40 | 95,00 | 79,42 | 24,00 |
| 10am - 11am | 30,00 | 19,00 | 20,00 | 29,00 | 15,00 | 1,00 | 165,00 | 137,94 | 25,00 |
| 11am -12pm | 24,00 | 18,00 | 22,00 | 31,00 | 14,00 | 1,10 | 112,00 | 93,63 | 25,00 |
| 12pm -13pm | 23,00 | 15,00 | 18,00 | 28,00 | 13,00 | 1,00 | 69,00 | 57,68 | 24,00 |
| 13pm -14pm | 24,00 | 16,00 | 19,00 | 29,78 | 13,00 | 0,90 | 71,00 | 59,36 | 24,00 |
| 14pm -15pm | 22,00 | 15,00 | 21,00 | 31,00 | 14,00 | 1,20 | 87,00 | 72,73 | 25,00 |
| 15pm -16pm | 23,00 | 15,00 | 19,00 | 27,89 | 14,00 | 1,10 | 93,00 | 77,75 | 24,00 |

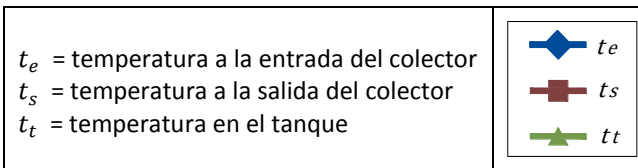
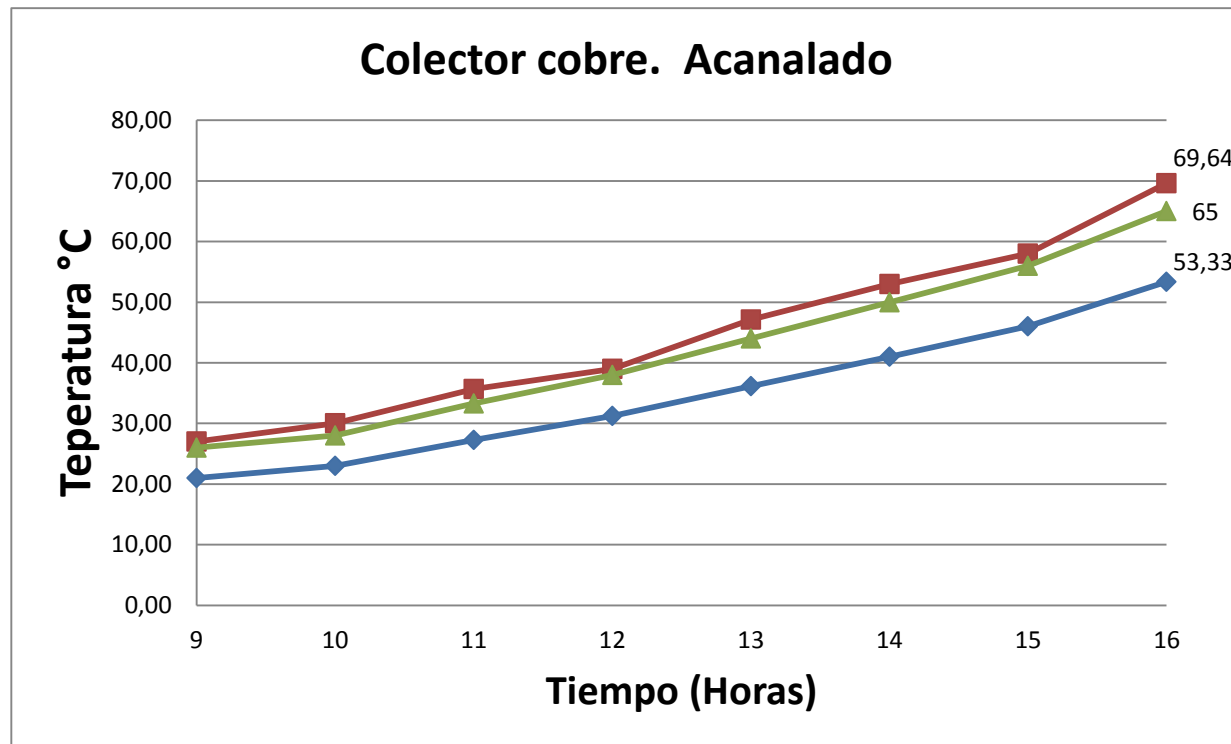
| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|----------|------|------|----------------------|------------------------|----------------------|---------|---------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | | Aluminio | | | | | Tipo de fabricación: | | Soldado |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | Ua1 | q _u / Aa1 | q _{pa1} / Aa1 | m1 | % ηHora | % ηDia |
| 09am - 10am | 1,88 | 4,53 | 7,00 | 4,75 | 4,15 | 0,95 | 0,33 | 5,43 | 30,54 | 48,88 | 3,39 | 32,15 | 25,58 |
| 10am - 11am | 2,06 | 4,80 | 5,80 | 4,88 | 4,17 | 0,95 | 0,33 | 5,45 | 56,12 | 81,82 | 5,20 | 34,01 | |
| 11am -12pm | 1,72 | 4,63 | 6,10 | 4,83 | 4,01 | 0,95 | 0,33 | 5,29 | 40,69 | 52,94 | 3,77 | 36,33 | |
| 12pm -13pm | 1,88 | 4,53 | 5,80 | 4,73 | 3,99 | 0,95 | 0,33 | 5,27 | 5,01 | 52,67 | 0,46 | 7,26 | |
| 13pm -14pm | 1,88 | 4,58 | 5,50 | 4,75 | 3,96 | 0,95 | 0,33 | 5,24 | 1,68 | 57,68 | 0,13 | 2,36 | |
| 14pm -15pm | 1,81 | 4,51 | 6,40 | 4,75 | 4,03 | 0,95 | 0,33 | 5,31 | 30,22 | 42,51 | 2,52 | 34,73 | |
| 15pm -16pm | 1,88 | 4,53 | 6,10 | 4,75 | 4,03 | 0,95 | 0,33 | 5,31 | 29,93 | 47,82 | 2,81 | 32,18 | |

TABLA16. Prueba4: Semana del 25 al 29 de diciembre 2009

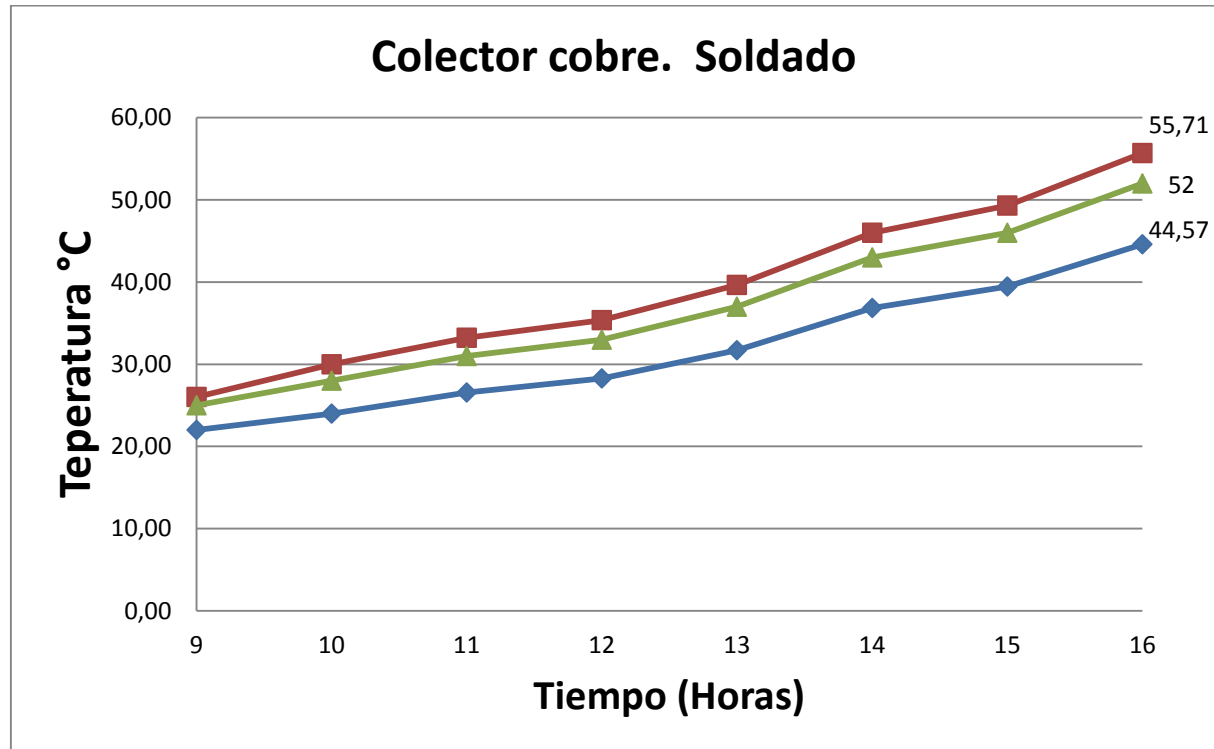
| DATOS | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------------|--------|--------|---------------------|
| Fecha: | Material del colector: | | | Aluminio | | Tipo de fabricación: Acanalado | | | |
| HORA | t _{n1} | t _c | t _{e1} | t _{s1} | t _a | V | G | ατG | T _{tanque} |
| 09am - 10am | 23,00 | 15,00 | 19,00 | 26,00 | 14,00 | 1,40 | 95,00 | 79,42 | 24,00 |
| 10am - 11am | 29,00 | 16,00 | 23,00 | 29,00 | 15,00 | 1,00 | 165,00 | 137,94 | 26,00 |
| 11am -12pm | 24,00 | 15,00 | 22,00 | 30,00 | 14,00 | 1,10 | 112,00 | 93,63 | 26,00 |
| 12pm -13pm | 22,00 | 14,00 | 22,00 | 28,67 | 13,00 | 1,00 | 69,00 | 57,68 | 25,00 |
| 13pm -14pm | 24,00 | 15,00 | 22,00 | 29,00 | 13,00 | 0,90 | 71,00 | 59,36 | 25,00 |
| 14pm -15pm | 21,00 | 15,00 | 24,00 | 35,00 | 14,00 | 1,20 | 87,00 | 72,73 | 26,00 |
| 15pm -16pm | 23,00 | 16,00 | 24,00 | 32,00 | 14,00 | 1,10 | 93,00 | 77,75 | 26,00 |

| CÁLCULOS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------|------|------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|------|-----------|--------|
| Fecha: | Material del colector: | | | | Aluminio | | | | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| HORA | h _{p-c} | h _{rp} | h _v | h _{rc} | U1 | U2 | U3 | U _{a1} | q _u / A _{a1} | q _{pa1} / A _{a1} | m1 | % ηHora | % ηDia |
| 09am - 10am | 1,88 | 4,53 | 7,00 | 4,75 | 4,15 | 0,95 | 0,33 | 5,43 | 30,54 | 48,88 | 3,64 | 32,15 | 27,33 |
| 10am - 11am | 2,18 | 4,70 | 5,80 | 4,80 | 4,17 | 0,95 | 0,33 | 5,45 | 61,62 | 76,32 | 8,56 | 37,35 | |
| 11am -12pm | 1,95 | 4,56 | 6,10 | 4,75 | 4,07 | 0,95 | 0,33 | 5,35 | 40,14 | 53,49 | 4,18 | 35,84 | |
| 12pm -13pm | 1,89 | 4,49 | 5,80 | 4,70 | 3,97 | 0,95 | 0,33 | 5,25 | 10,46 | 47,23 | 1,09 | 15,16 | |
| 13pm -14pm | 1,95 | 4,56 | 5,50 | 4,73 | 3,98 | 0,95 | 0,33 | 5,26 | 1,52 | 57,84 | 0,18 | 2,14 | |
| 14pm -15pm | 1,73 | 4,49 | 6,40 | 4,75 | 3,99 | 0,95 | 0,33 | 5,27 | 35,84 | 36,89 | 2,14 | 36,30 | |
| 15pm -16pm | 1,81 | 4,56 | 6,10 | 4,78 | 4,01 | 0,95 | 0,33 | 5,29 | 30,10 | 47,65 | 3,13 | 32,36 | |

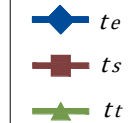
**Gráfica 7. Prueba 1. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 23 al 27 de diciembre 2009**



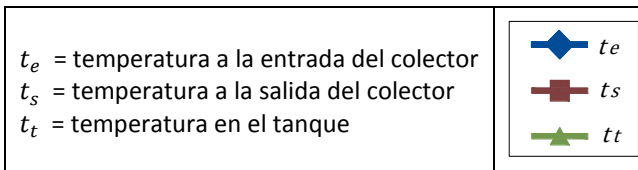
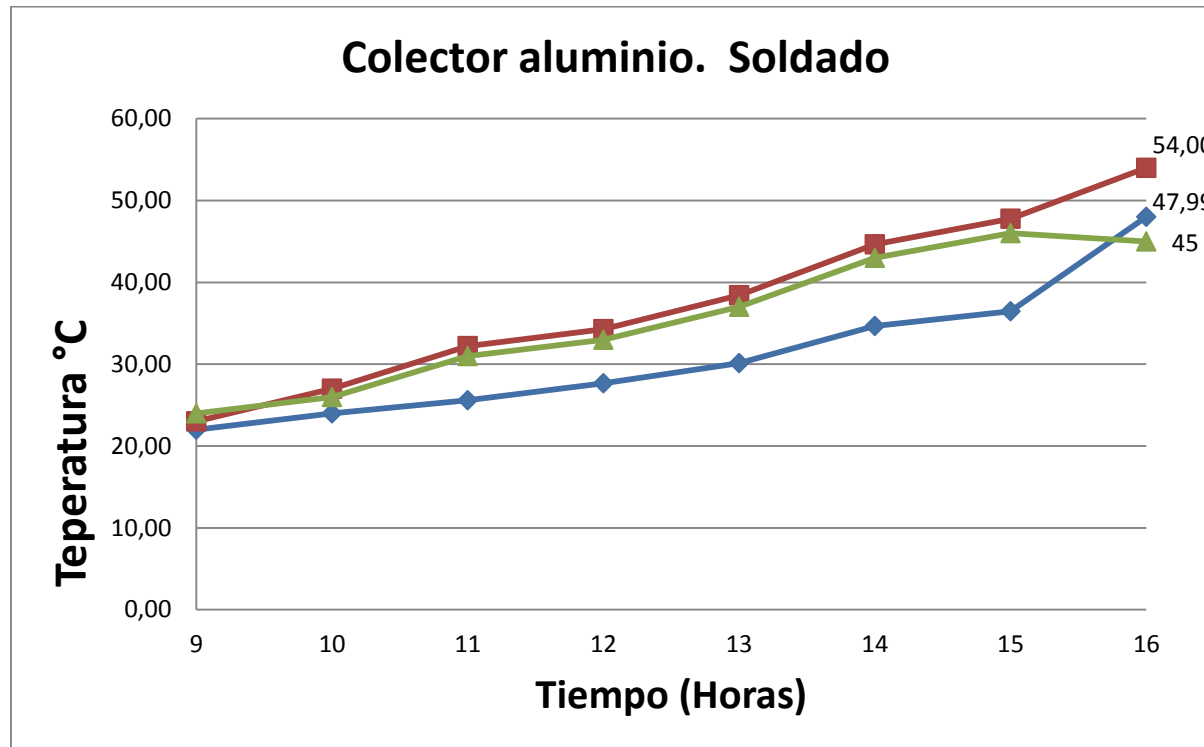
**Gráfica 8. Prueba 2. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 23 al 27 de diciembre 2009**



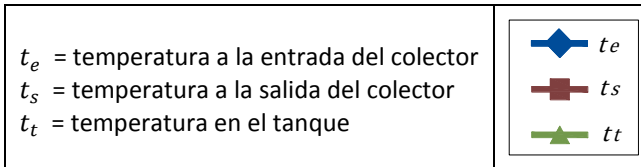
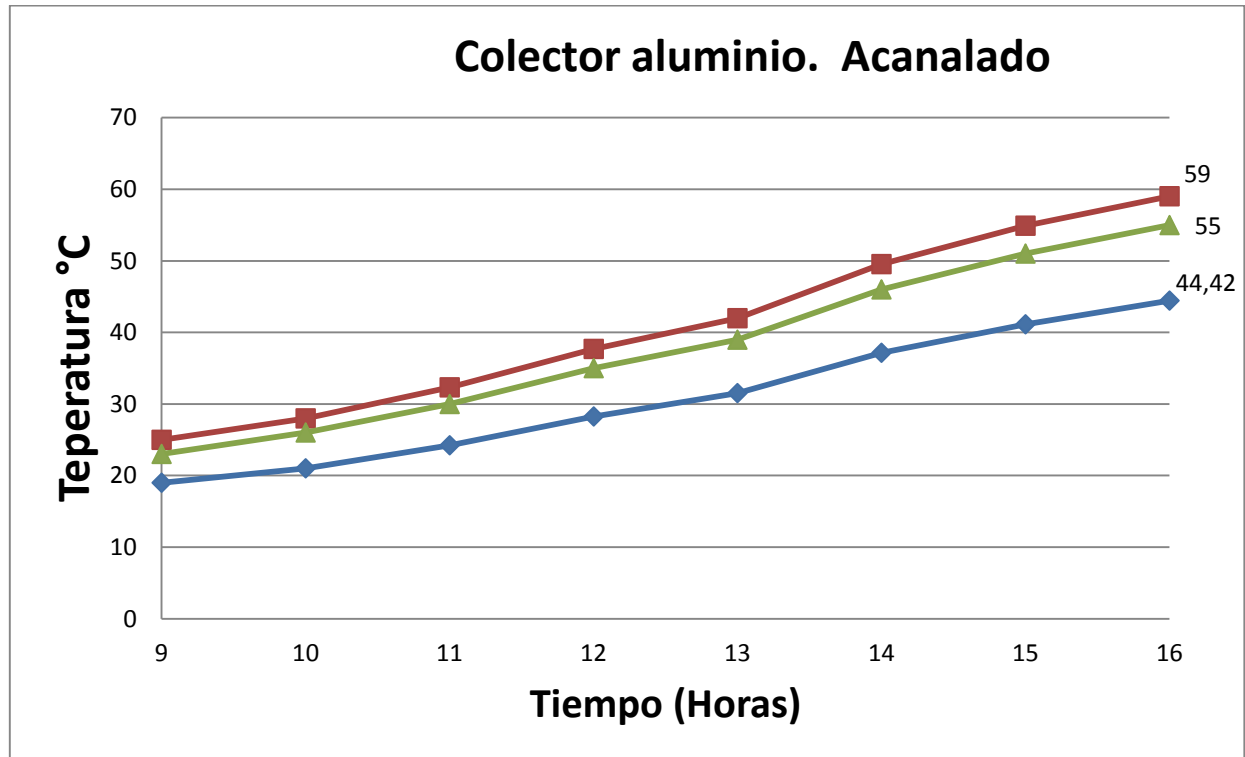
t_e = temperatura a la entrada del colector
 t_s = temperatura a la salida del colector
 t_t = temperatura en el tanque



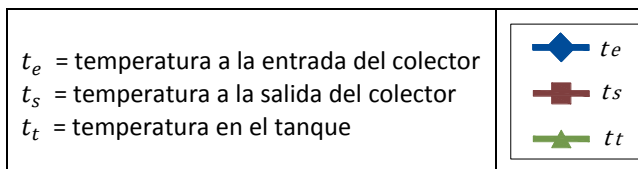
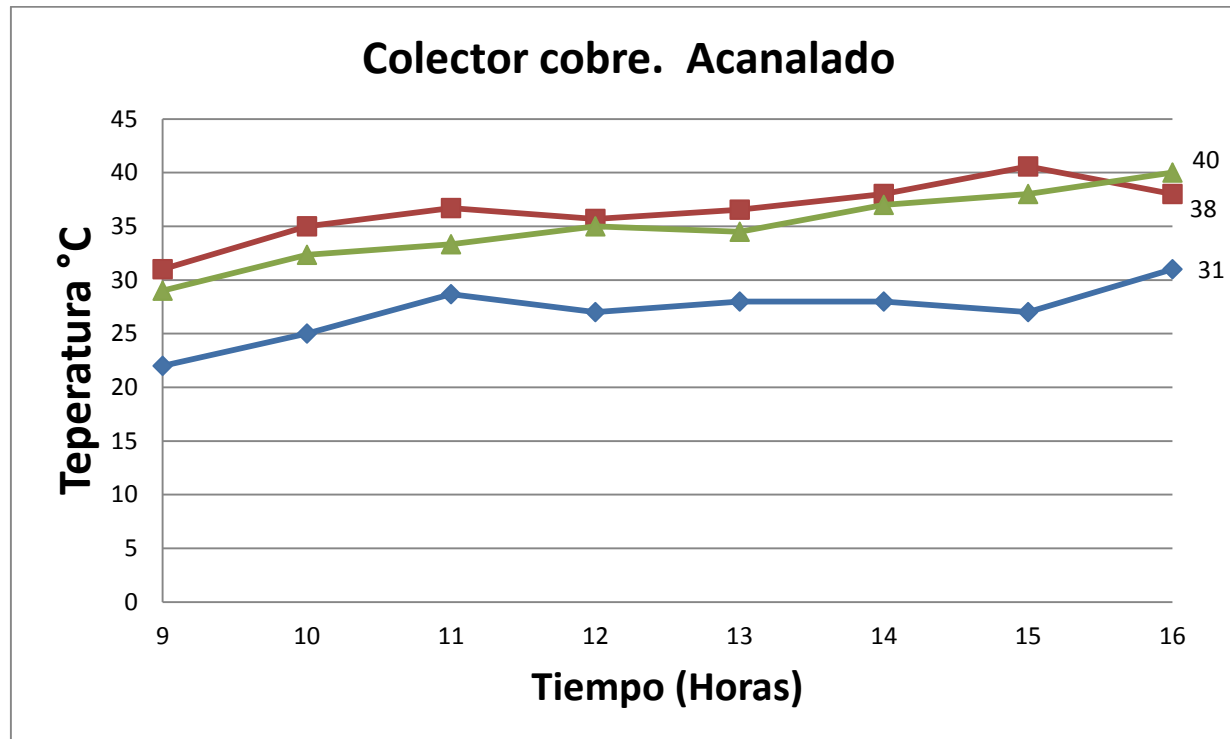
**Gráfica 9. Prueba 3. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 23 al 27 de diciembre 2009**



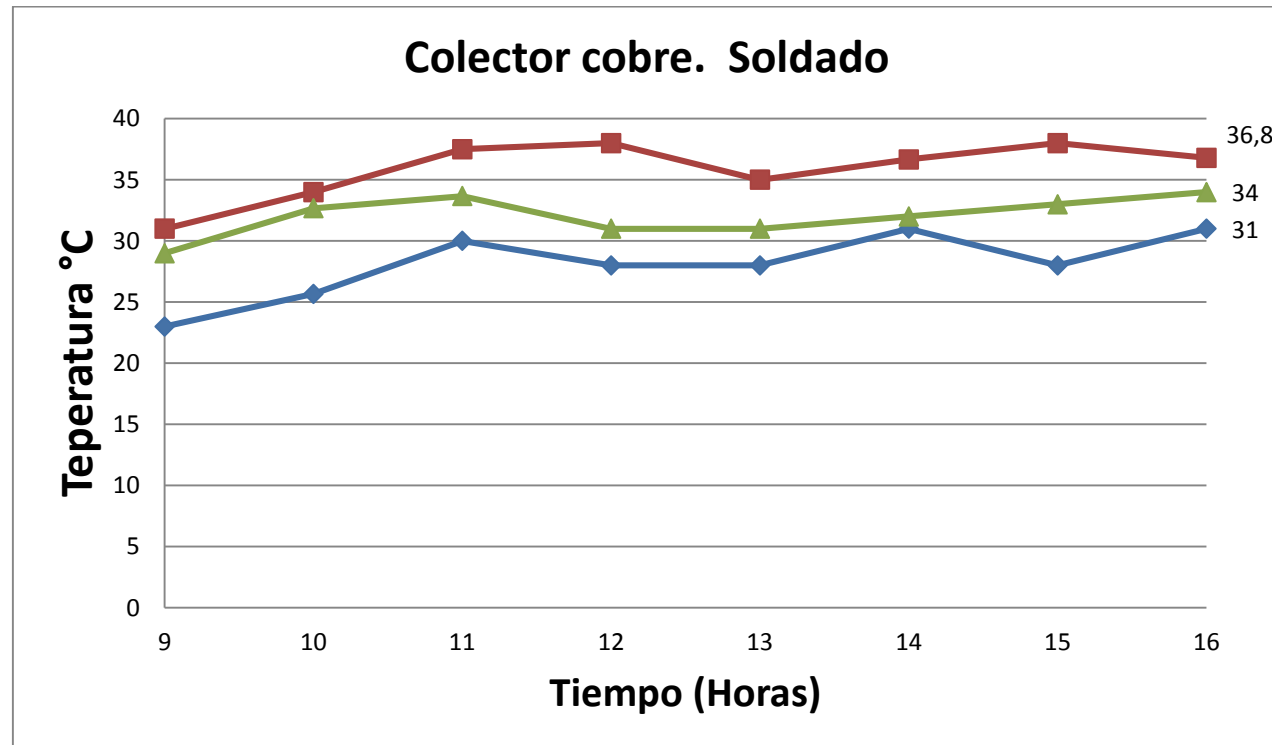
**Gráfica 10. Prueba 4. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 23 al 27 de diciembre 2009**



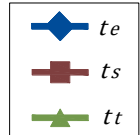
**Gráfica 11. Prueba 1. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 7 al 12 de enero 2010**



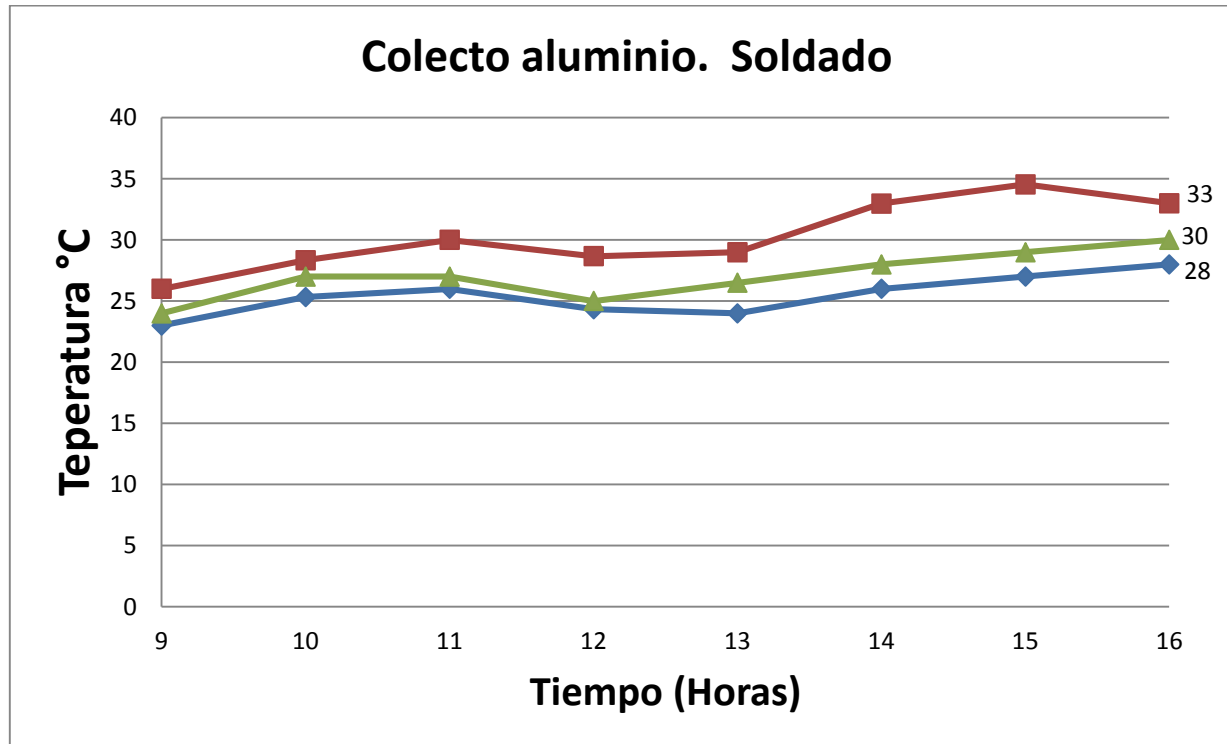
**Gráfica 12. Prueba 2. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 7 al 12 de enero 2010**






t_e = temperatura a la entrada del colector
 t_s = temperatura a la salida del colector
 t_t = temperatura en el tanque

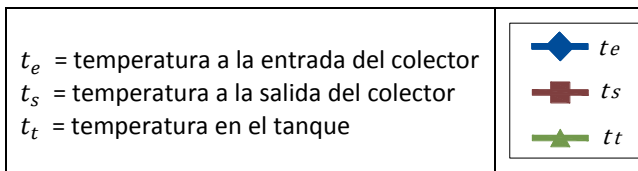
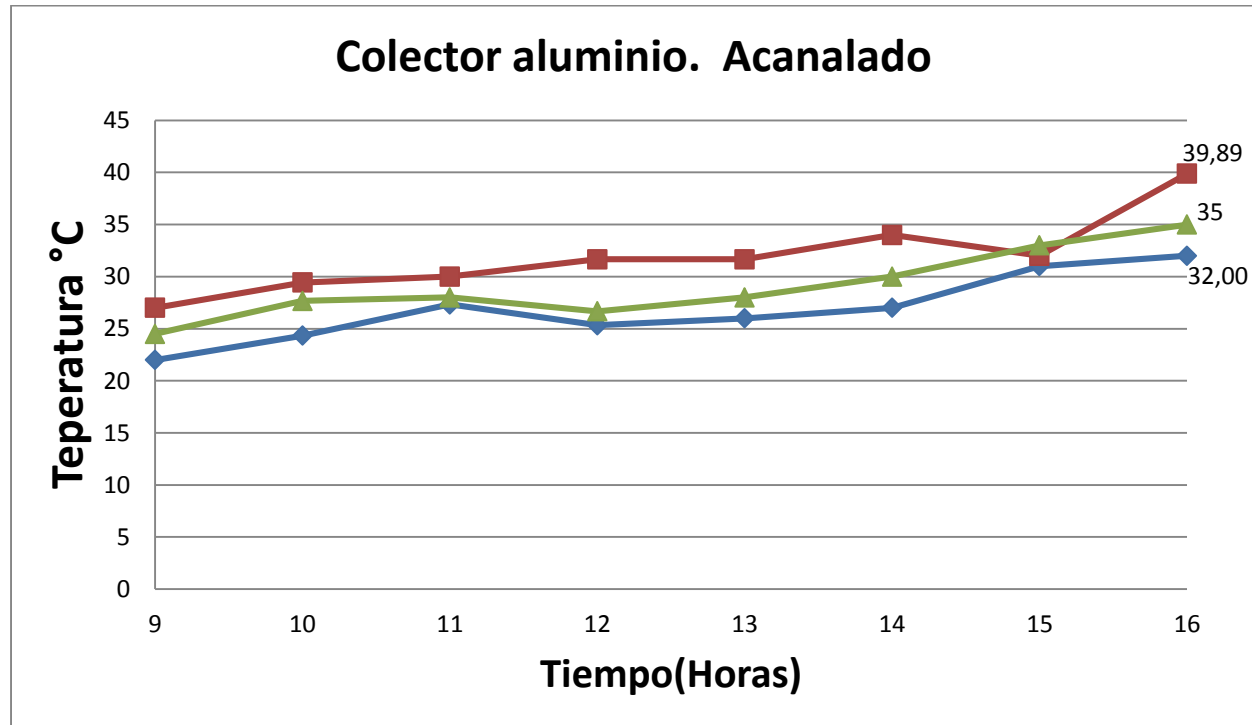


**Gráfica 13. Prueba 3. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 7 al 12 de enero 2010**

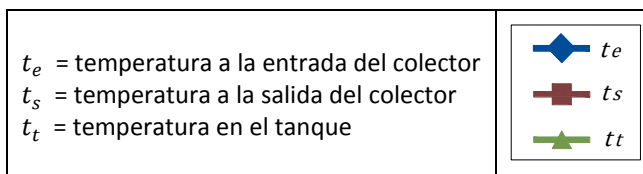
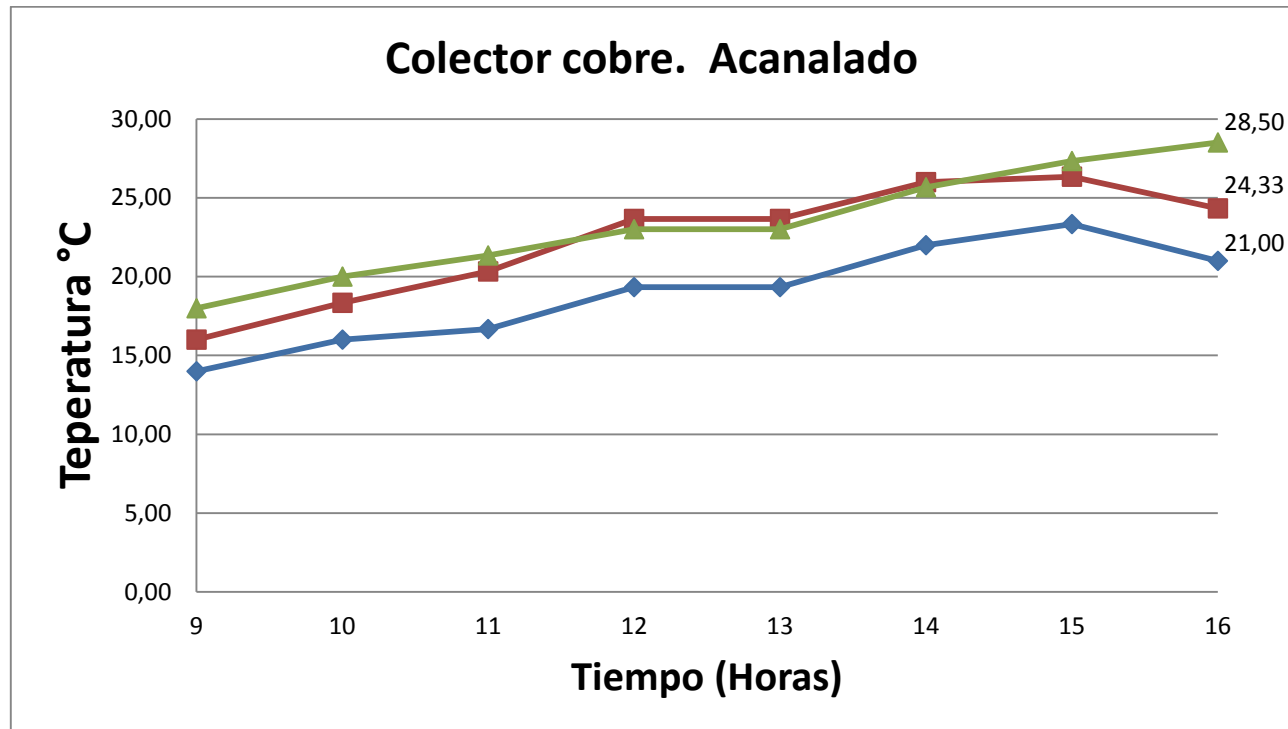


| | |
|---|---|
| t_e = temperatura a la entrada del colector |  t_e |
| t_s = temperatura a la salida del colector |  t_s |
| t_t = temperatura en el tanque |  t_t |

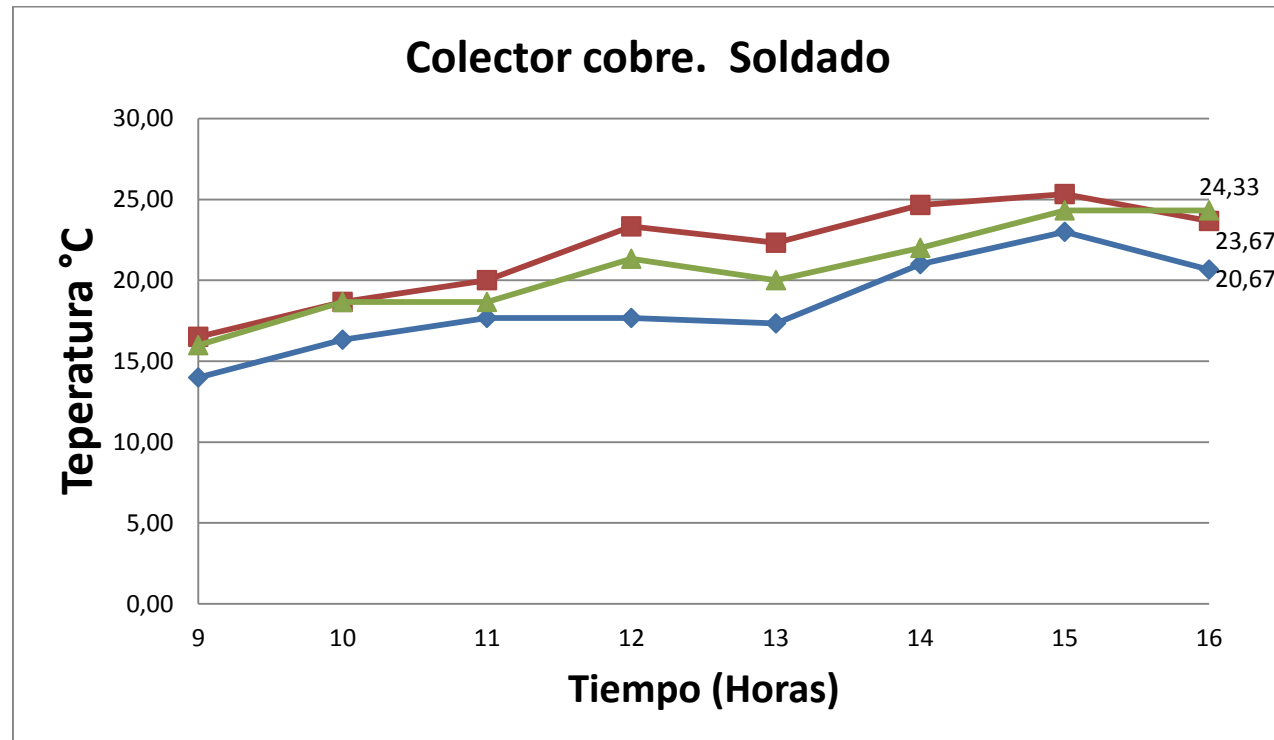
**Gráfica 14. Prueba 4. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 7 al 12 de enero 2010**



**Gráfica 15. Prueba 1. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 21 al 25 de enero 2010**



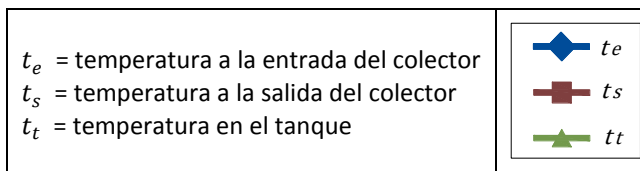
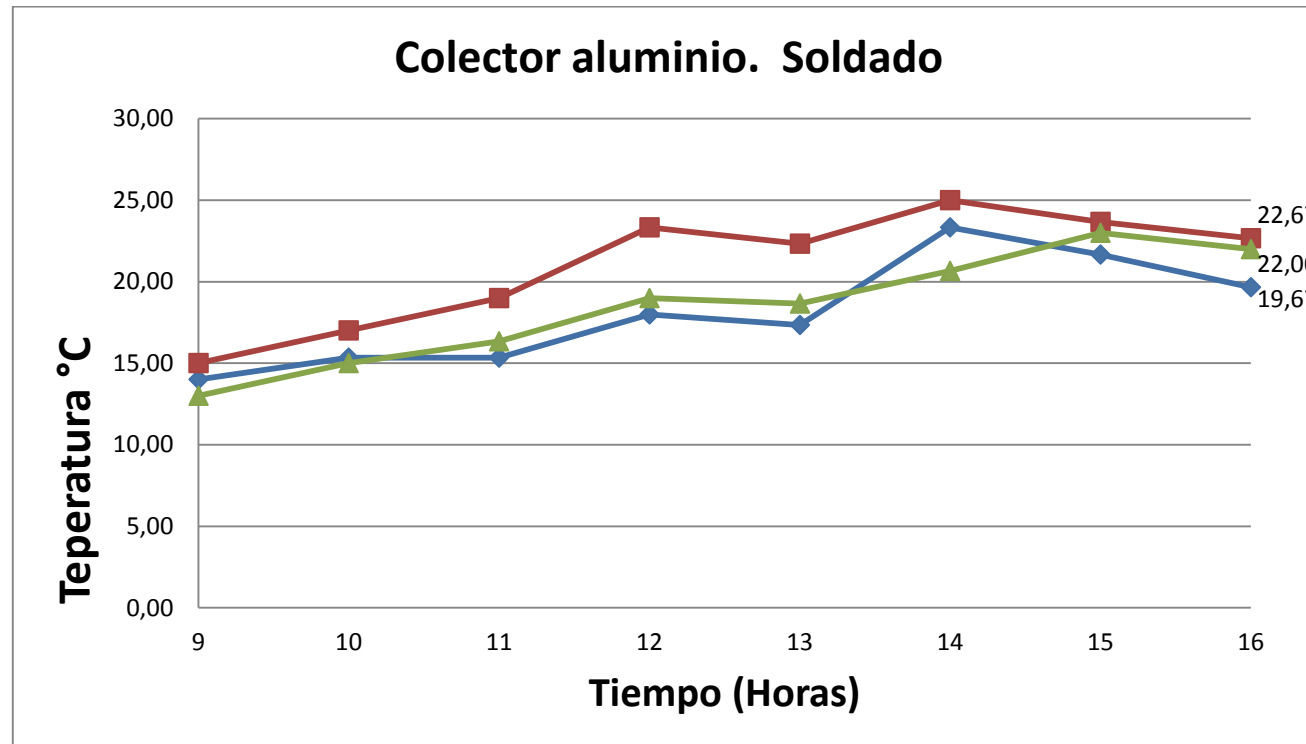
**Gráfica 16. Prueba 2. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 21 al 25 de enero 2010**



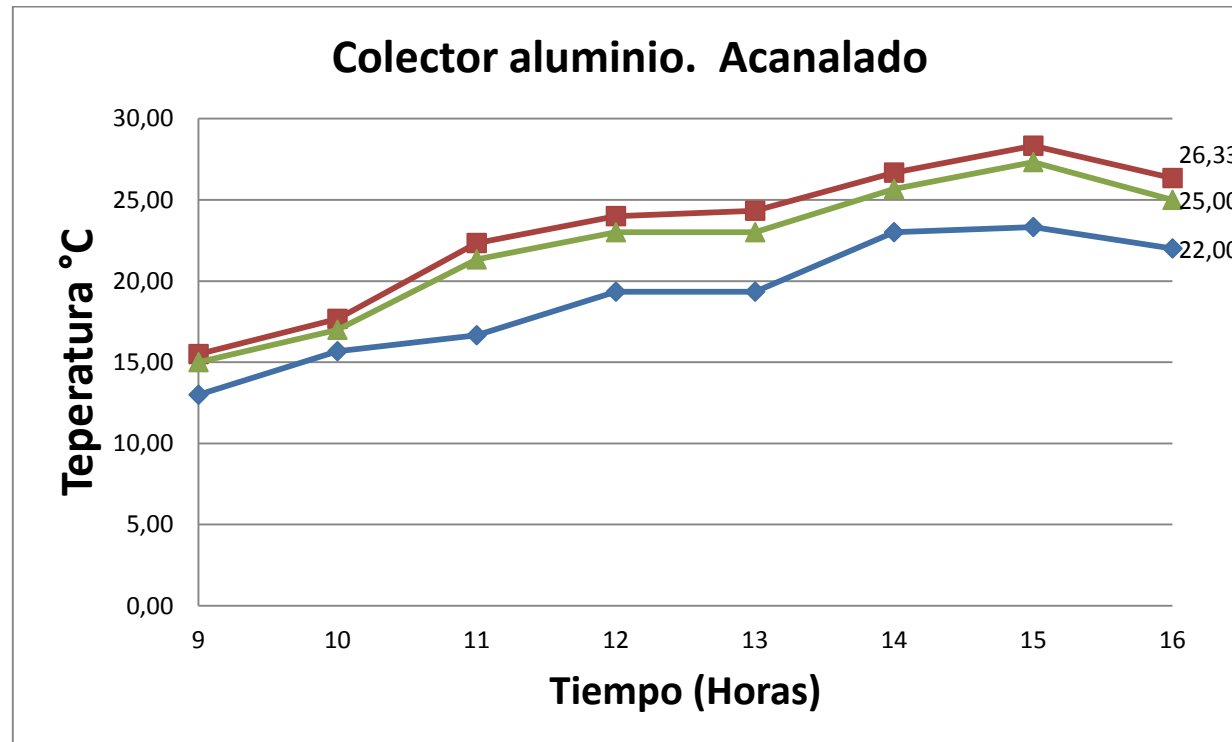
t_e = temperatura a la entrada del colector
 t_s = temperatura a la salida del colector
 t_t = temperatura en el tanque

t_e
 t_s
 t_t

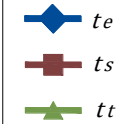
**Gráfica 17. Prueba 3. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 21 al 25 de enero 2010**



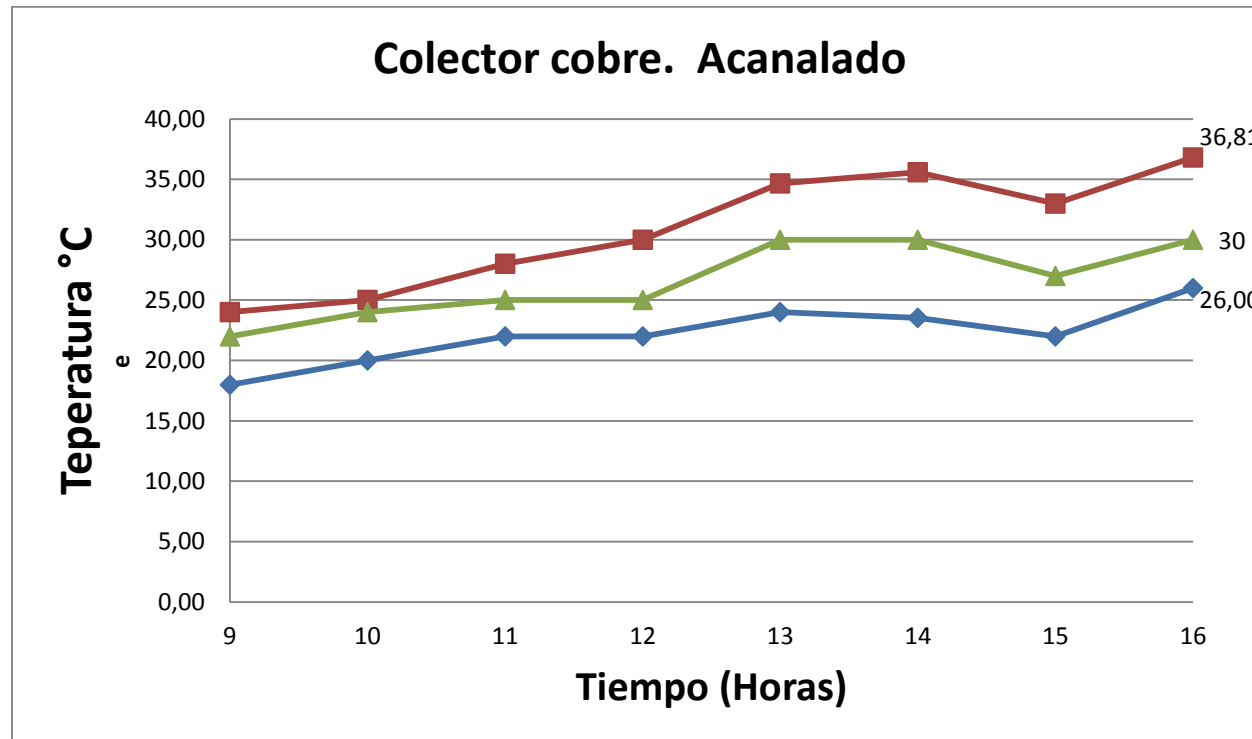
**Gráfica 18. Prueba 4. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 21 al 25 de enero 2010**



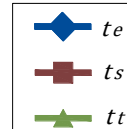
t_e = temperatura a la entrada del colector
 t_s = temperatura a la salida del colector
 t_t = temperatura en el tanque



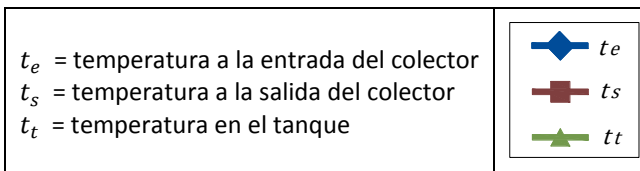
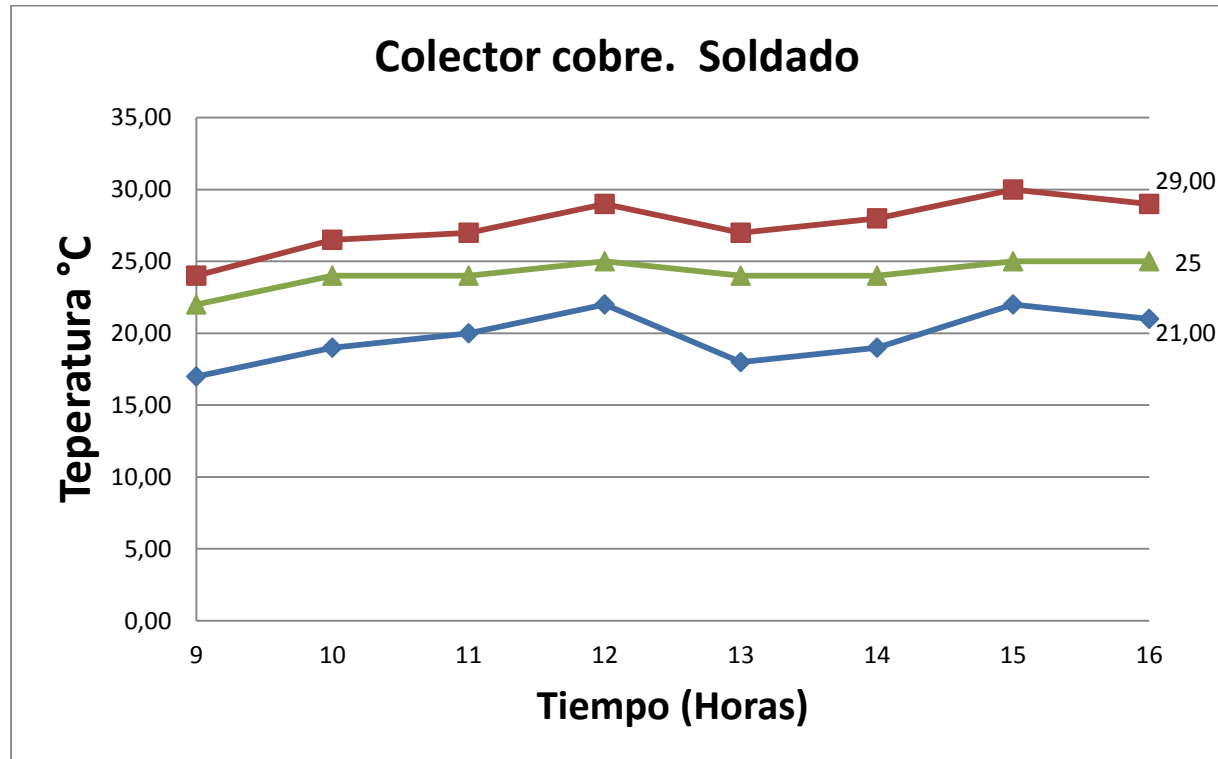
**Gráfica 19. Prueba 1. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 25 al 29 de diciembre 2009**



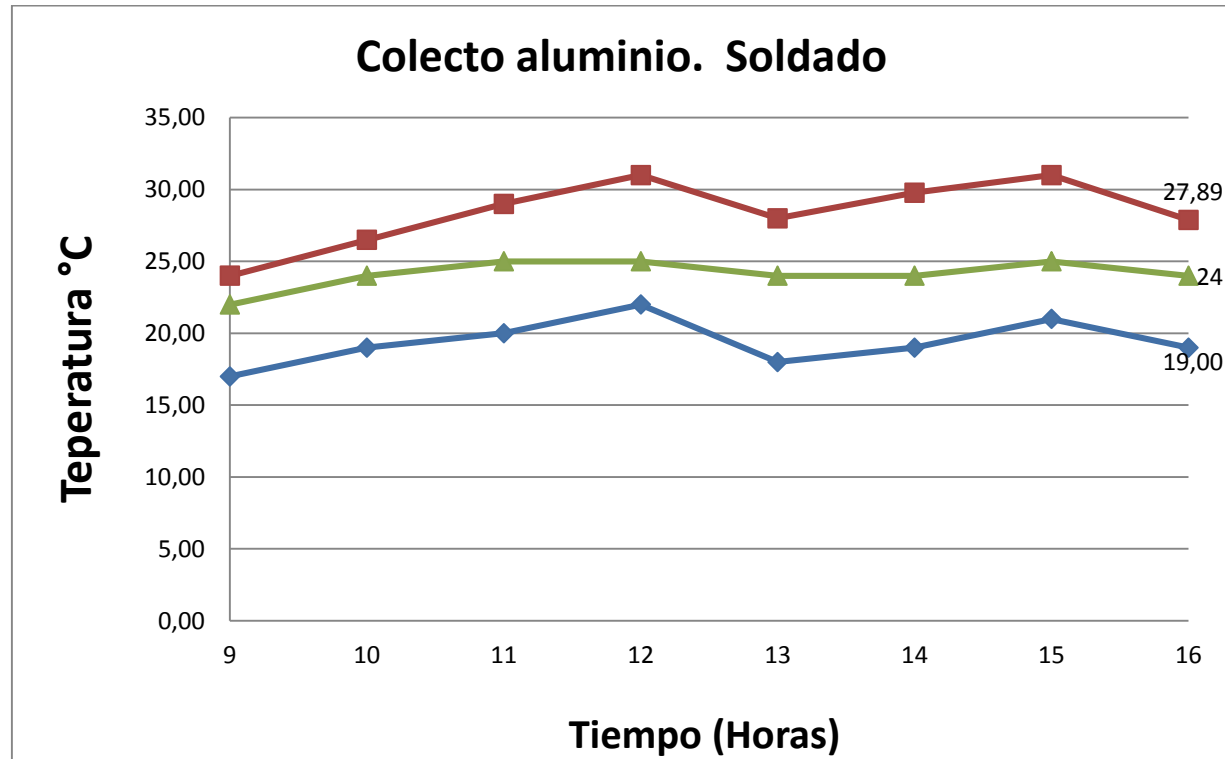
t_e = temperatura a la entrada del colector
 t_s = temperatura a la salida del colector
 t_t = temperatura en el tanque






**Gráfica 20. Prueba 2. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 25 al 29 de diciembre 2009**

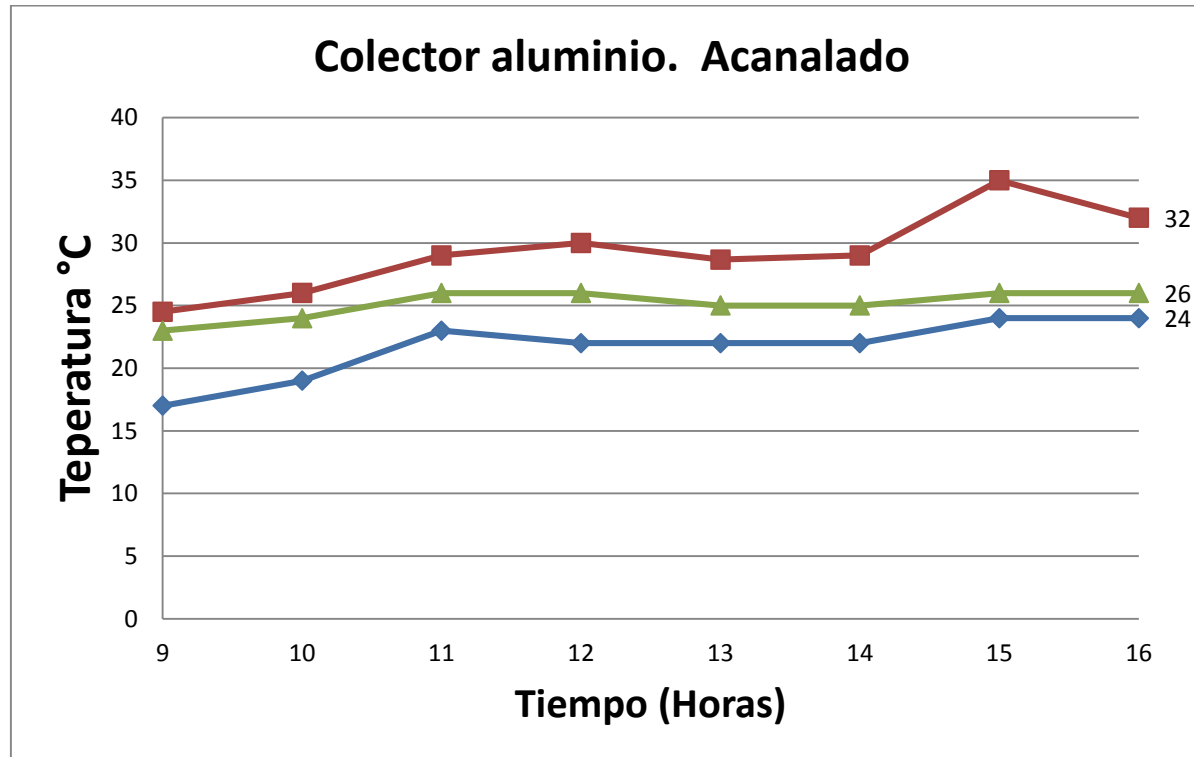


**Gráfica 21. Prueba 3. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 25 al 29 de diciembre 2009**

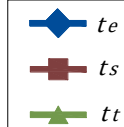


| | |
|---|---|
| t_e = temperatura a la entrada del colector |  t_e |
| t_s = temperatura a la salida del colector |  t_s |
| t_t = temperatura en el tanque |  t_t |

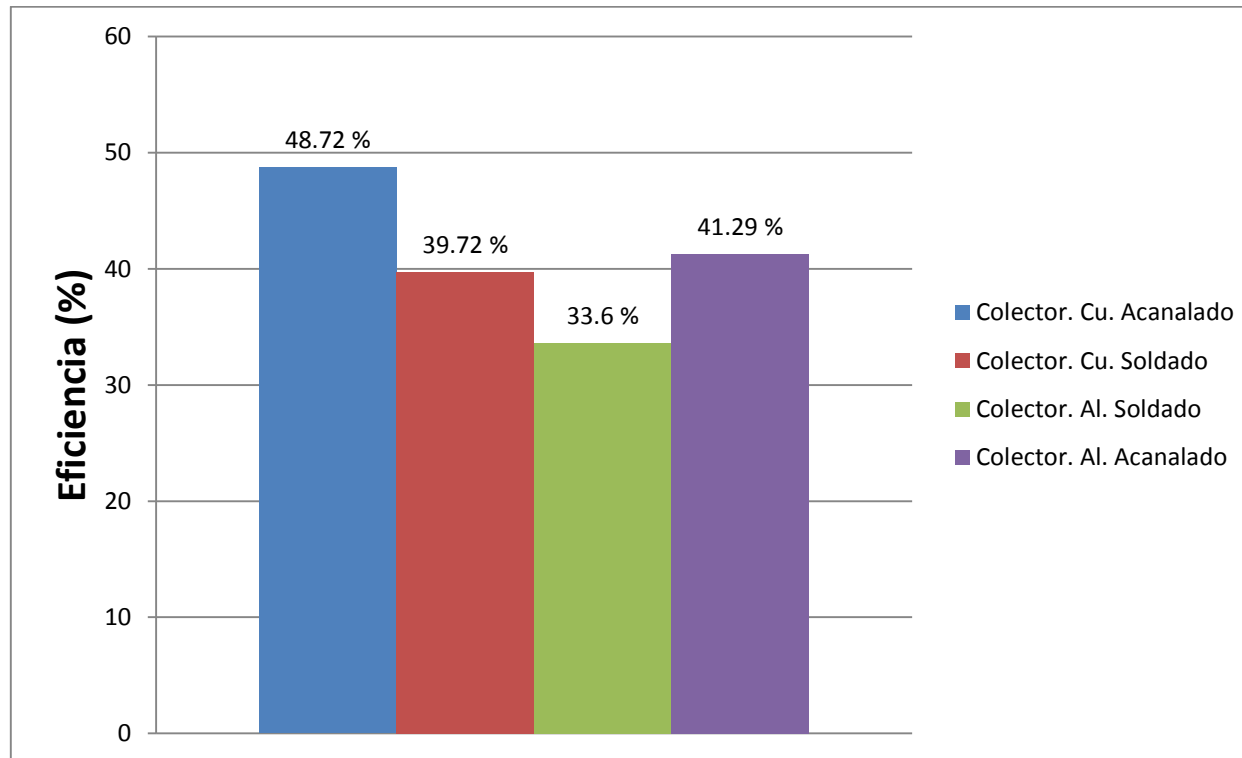
**Gráfica 22. Prueba 4. Variación de temperaturas en cada colector
Semana del 25 al 29 de diciembre 2009**



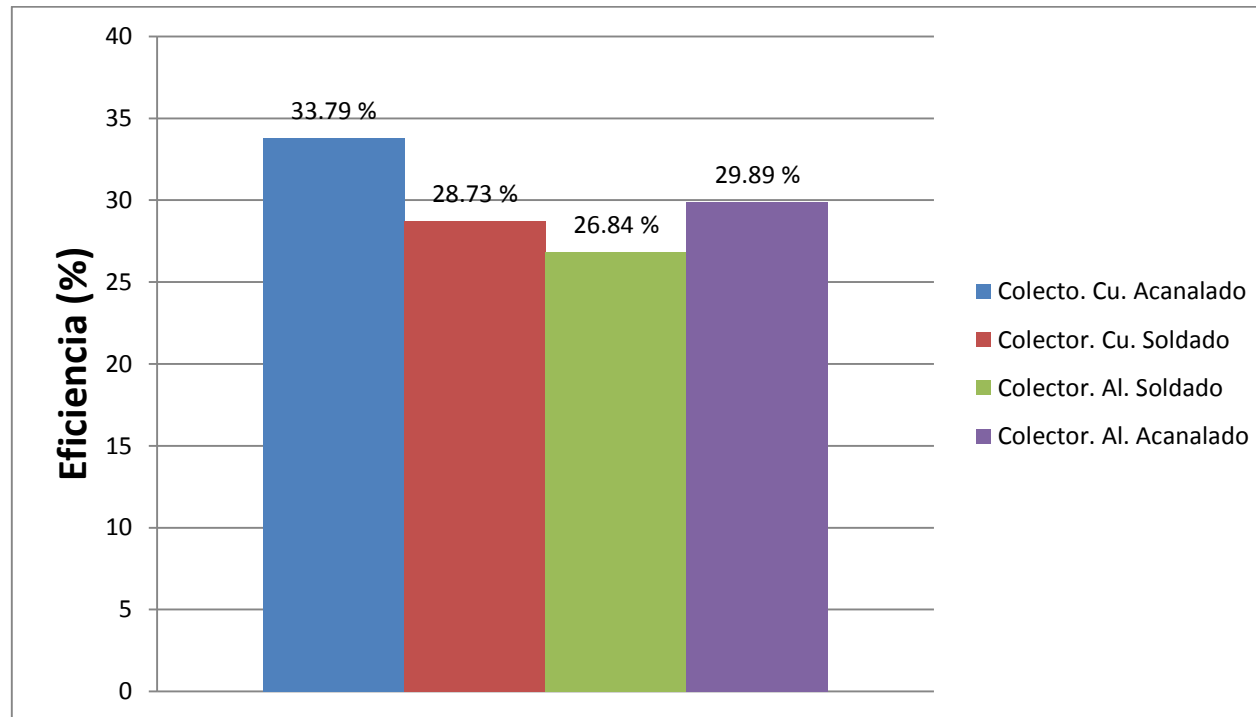
t_e = temperatura a la entrada del colector
 t_s = temperatura a la salida del colector
 t_t = temperatura en el tanque



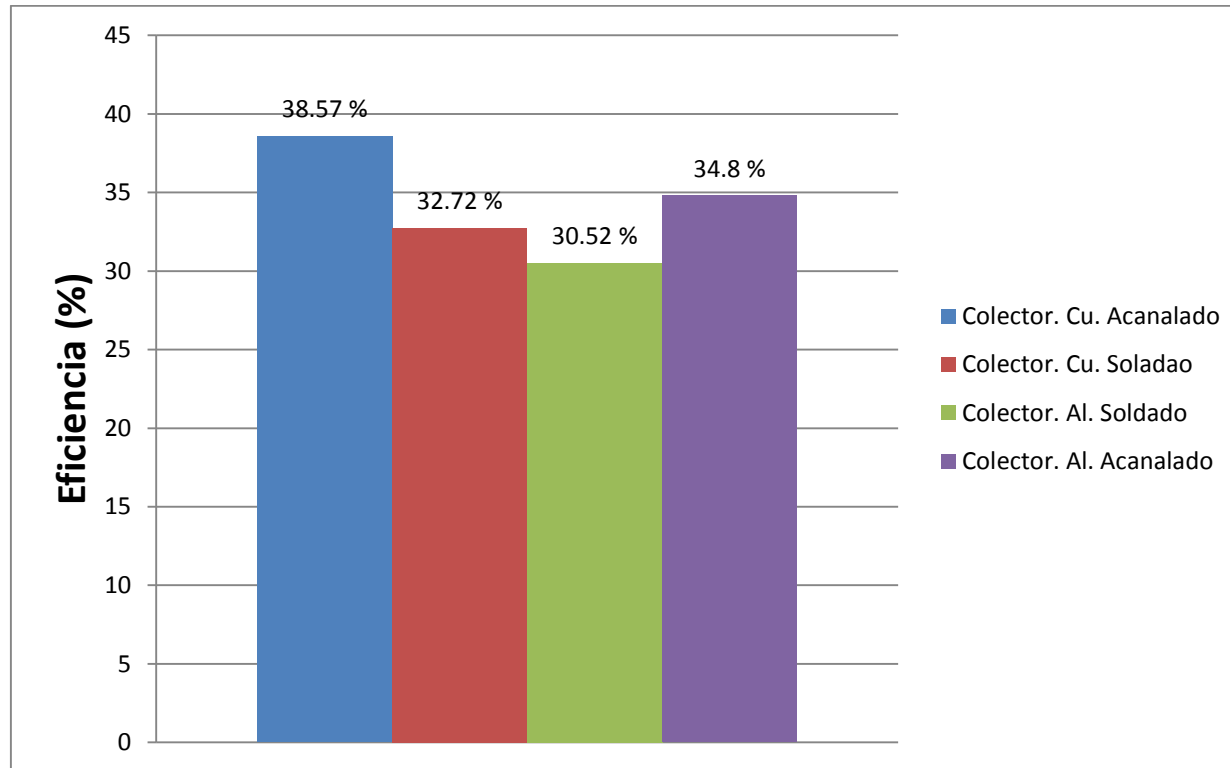
**Gráfica 23. Contrastación de eficiencias entre colectores
Semana del 23 al 27 de diciembre 2009**



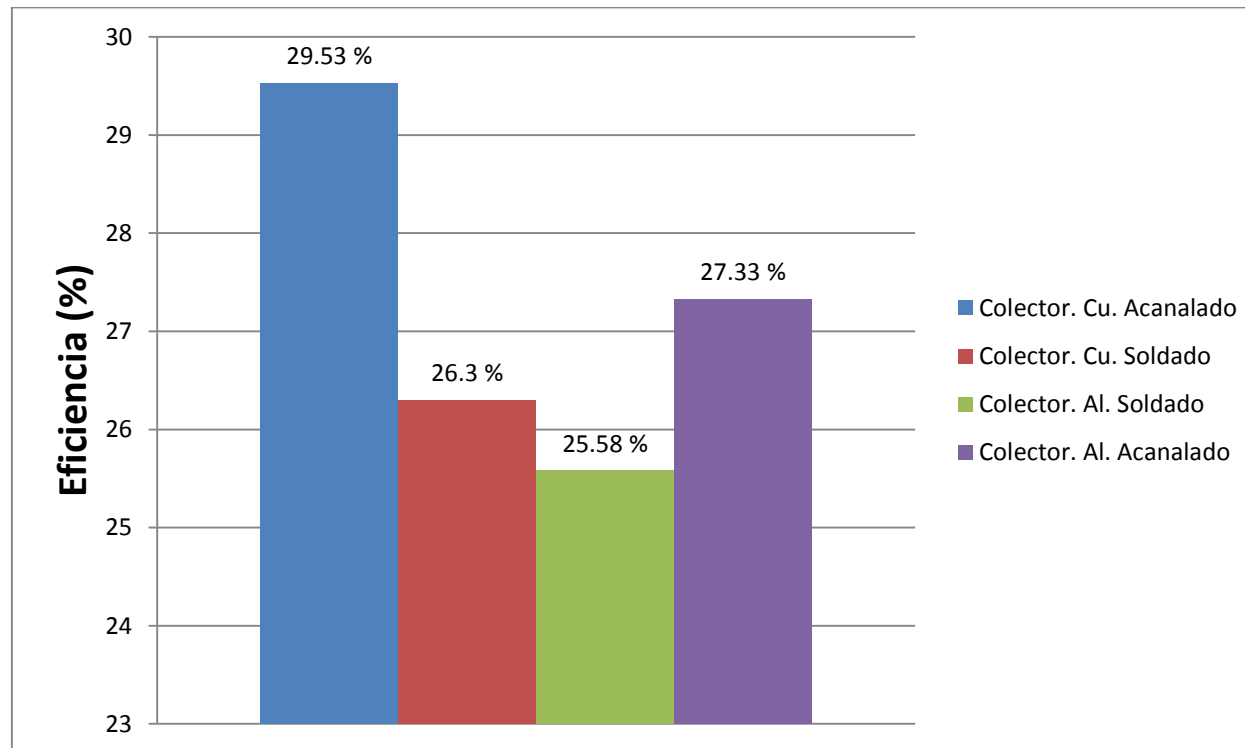
**Gráfica 24. Contrastación de eficiencias entre colectores
Semana del 7 al 12 de enero 2010**



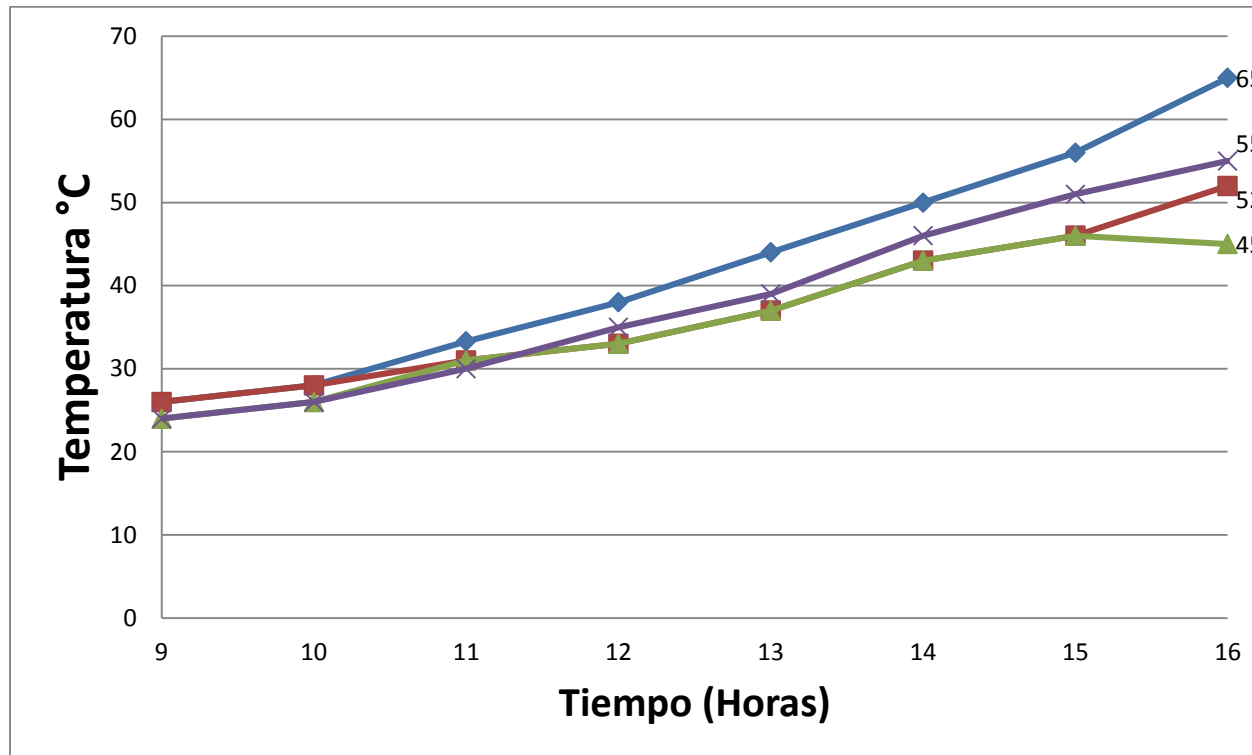
**Gráfica 25. Contrastación de eficiencias entre colectores
Semana del 21 al 25 de enero 2010**



**Gráfica 26. Contrastación de eficiencias entre colectores
Semana del 25 al 29 de diciembre 2009**



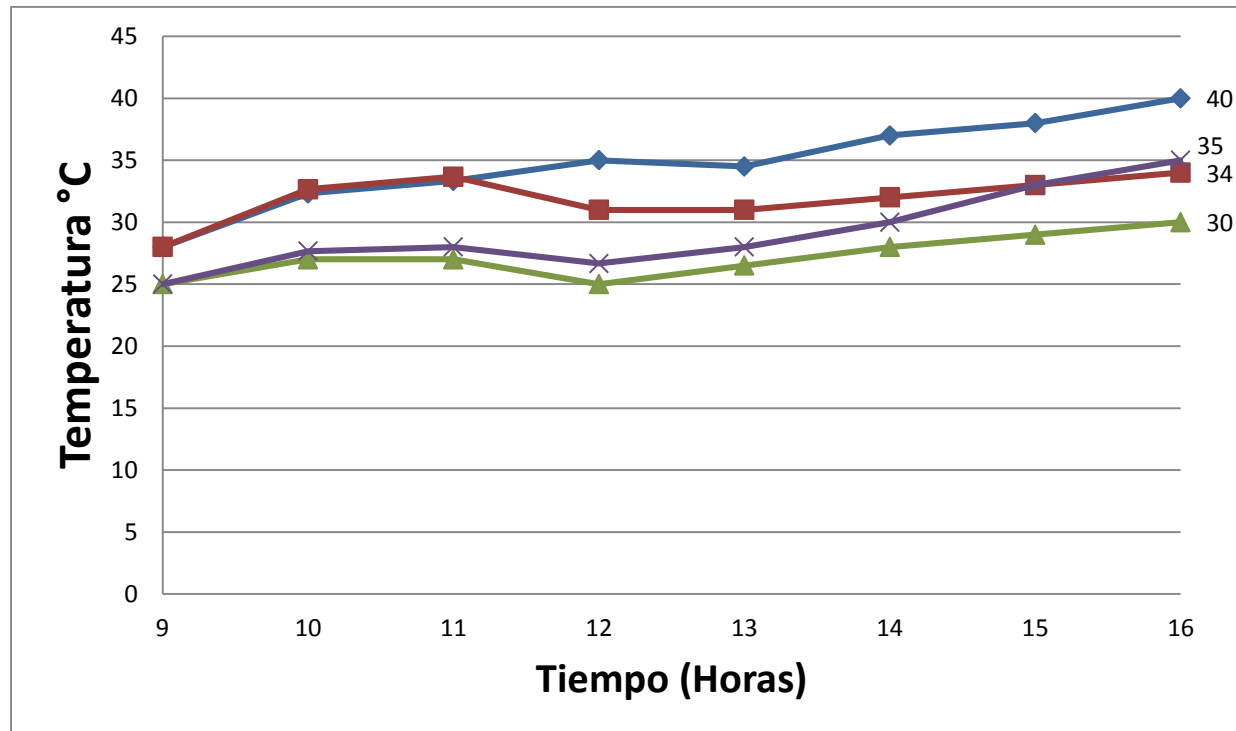
**Gráfica 27. Contrastación de temperatura del agua en los tanques
Semana del 23 al 27 de diciembre 2009**







$t_t C_{u.aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre acanalado
 $t_t C_{u.sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre soldado
 $t_t A_{l.aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio acanalado
 $t_t A_{l.sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio soldado

$tt_{Cu.aca.}$
 $tt_{Cu.sol.}$
 $tt_{Al.aca.}$
 $tt_{Al.sol.}$

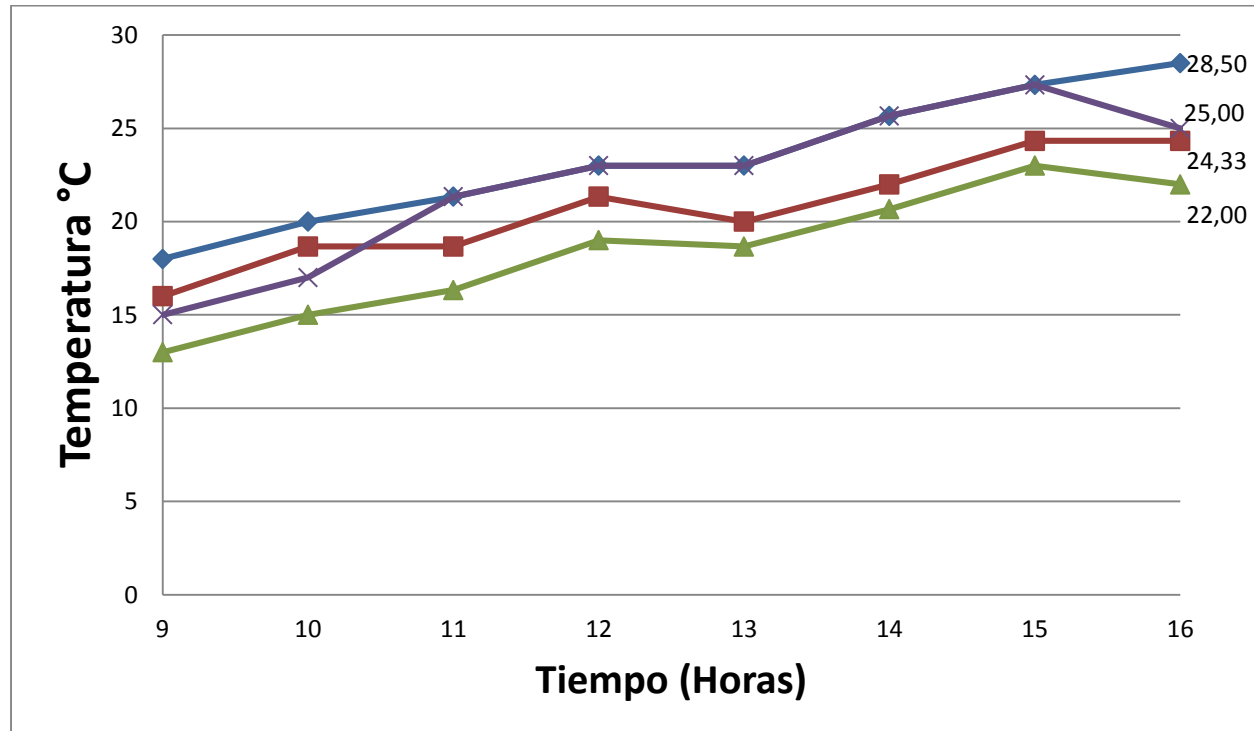
**Gráfica 28. Contrastación de temperatura del agua en los tanques
Semana del 7 al 12 de enero 2010**



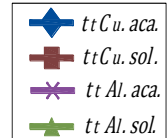
$t_t C_{u.aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre acanalado
 $t_t C_{u.sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre soldado
 $t_t A_{l.aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio acanalado
 $t_t A_{l.sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio soldado

 $tt_{Cu.aca.}$
 $tt_{Cu.sol.}$
 $tt_{Al.aca.}$
 $tt_{Al.sol.}$

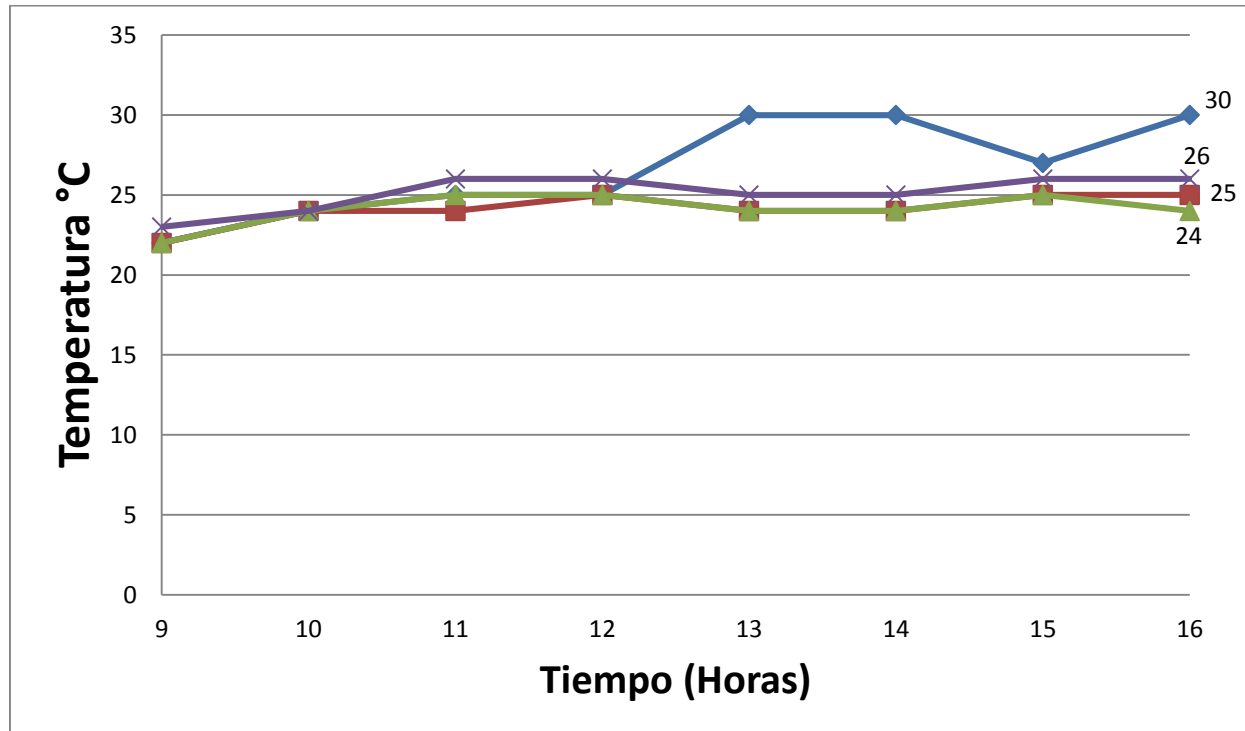
**Gráfica 29. Contrastación de temperatura del agua en los tanques
Semana del 21 al 25 de enero 2010**



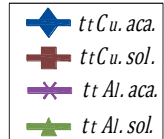
$t_t C_{u. aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre acanalado
 $t_t C_{u. sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre soldado
 $t_t A_{l. aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio acanalado
 $t_t A_{l. sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio soldado



**Gráfica 30. Contrastación de temperatura del agua en los tanques
Semana del 25 al 29 de diciembre 2009**



$t_t C_{u.aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre acanalado
 $t_t C_{u.sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de cobre soldado
 $t_t A_{l.aca.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio acanalado
 $t_t A_{l.sol.}$ = temperatura del agua en tanque, colector de aluminio soldado



CAPÍTULO V: Valoración económica

En este capítulo se presenta el análisis económico que justifica la inversión en este tipo de sistema. Primeramente abordaremos cuanta energía a ganado cada colector, para luego proceder a su justificación económica aproximada, que será de gran facilidad de elaboración y comprensión, incluso para personas alejadas de la técnica.

5.1 Energía ganada por el agua en el colector convencional

De los cálculos realizados para el colector, hemos obtenido valores para la cantidad de energía útil por unidad de área y para las pérdidas de energía por unidad de área. Por tanto:

$$Q_u = \frac{Q_u}{A_{a1}} \cdot A_{a1} \quad (23) \text{ Ref. [4], pág.200.}$$

$$Q_p = \frac{Q_p}{A_{a1}} \cdot A_{a1} \quad (24) \text{ Ref. [4], pág.200.}$$

A partir de estas fórmulas obtendremos la energía útil que es aprovechada en cada colector y las pérdidas de energía en los mismos. Los valores para cada prueba y para cada hora se encuentran consignados en la Tablas 17, 18, 19 y 20.

TABLA17. Ganancia y pérdida de energía

| CÁLCULOS | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|------------------|----------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Material del colector: | Cobre | | Tipo de fabricación: | | | | Acanalado | |
| PRUEBA | Semana 1 | | Semana 2 | | Semana 3 | | Semana 4 | |
| HORA | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} |
| 09am - 10am | 290,69 | 81,00 | 35,33 | 40,41 | 14,96 | 27,51 | 11,41 | 36,24 |
| 10am - 11am | 305,93 | 103,87 | 19,39 | 62,53 | 32,05 | 26,14 | 40,61 | 42,15 |
| 11am -12pm | 92,95 | 127,76 | 44,84 | 47,96 | 53,99 | 36,14 | 34,21 | 21,97 |
| 12pm -13pm | 295,13 | 155,81 | 7,51 | 48,17 | 35,46 | 32,76 | 6,49 | 28,12 |
| 13pm -14pm | 266,47 | 184,97 | 87,18 | 48,25 | 76,70 | 33,49 | 7,72 | 27,89 |
| 14pm -15pm | 210,59 | 192,94 | 28,06 | 51,69 | 13,55 | 34,27 | 18,13 | 25,51 |
| 15pm -16pm | 139,25 | 244,47 | 41,11 | 39,15 | 8,44 | 28,51 | 14,65 | 32,00 |
| Subtotal | 1601,02 | | 263,41 | | 235,14 | | 133,21 | |
| Total Energía | 2232,78 | | | | | | | |

TABLA18. Ganancia y pérdida de energía

| CÁLCULOS | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Material del colector: | | Cobre | | Tipo de fabricación: | | | Soldado | |
| PRUEBA | Semana 1 | | Semana 2 | | Semana 3 | | Semana 4 | |
| HORA | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} |
| 09am - 10am | 245,18 | 126,50 | 24,88 | 50,87 | 16,10 | 26,37 | 18,43 | 29,22 |
| 10am - 11am | 259,88 | 149,93 | 17,11 | 64,82 | 21,26 | 36,92 | 30,12 | 52,64 |
| 11am -12pm | 41,81 | 178,89 | 36,47 | 56,33 | 40,93 | 49,19 | 24,41 | 31,76 |
| 12pm -13pm | 251,05 | 199,90 | 16,40 | 39,28 | 37,63 | 30,59 | 3,24 | 31,37 |
| 13pm -14pm | 221,62 | 229,82 | 68,68 | 66,76 | 64,65 | 45,53 | 4,37 | 31,24 |
| 14pm -15pm | 189,46 | 214,08 | 24,29 | 55,47 | 20,11 | 58,15 | 18,13 | 25,51 |
| 15pm -16pm | 124,75 | 258,98 | 29,65 | 50,61 | 8,86 | 40,30 | 17,96 | 28,69 |
| Subtotal | 1333,74 | | 217,46 | | 209,53 | | 116,67 | |
| Total Energía | 1877,41 | | | | | | | |

TABLA19. Ganancia y pérdida de energía

| CÁLCULOS | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Material del colector: | | Alum. | | Tipo de fabricación: | | | Acanalado | |
| PRUEBA | Semana 1 | | Semana 2 | | Semana 3 | | Semana 4 | |
| HORA | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} |
| 09am - 10am | 253,68 | 118,00 | 19,91 | 55,83 | 16,29 | 26,18 | 18,32 | 29,33 |
| 10am - 11am | 268,46 | 141,34 | 11,67 | 70,26 | 22,65 | 35,53 | 33,67 | 49,09 |
| 11am -12pm | 46,31 | 174,39 | 37,66 | 55,13 | 48,40 | 41,72 | 24,41 | 31,76 |
| 12pm -13pm | 256,16 | 194,77 | 5,78 | 49,90 | 42,63 | 25,58 | 3,01 | 31,60 |
| 13pm -14pm | 232,24 | 219,20 | 76,19 | 59,24 | 76,08 | 34,10 | 1,01 | 34,61 |
| 14pm -15pm | 202,78 | 200,76 | 28,00 | 51,76 | -5,17 | 52,99 | 18,13 | 25,51 |
| 15pm -16pm | 140,30 | 243,43 | 33,64 | 46,62 | 2,73 | 34,22 | 17,96 | 28,69 |
| Subtotal | 1399,93 | | 212,84 | | 203,62 | | 116,51 | |
| Total Energía | 1932,91 | | | | | | | |

TABLA 20. Ganancia y pérdida de energía

| CÁLCULOS | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|------------------|----------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Material del colector: | Alum. | | Tipo de fabricación: | | | | Soldado | |
| PRUEBA | Semana 1 | | Semana 2 | | Semana 3 | | Semana 4 | |
| HORA | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} | q _u | q _{pa1} |
| 09am - 10am | 90,69 | 81,00 | 37,58 | 38,16 | 18,49 | 23,98 | 29,33 | 2,18 |
| 10am - 11am | 115,04 | 95,77 | 25,49 | 56,44 | 33,21 | 24,97 | 45,79 | 5,14 |
| 11am -12pm | 81,23 | 74,48 | 48,35 | 44,45 | 56,31 | 33,81 | 32,09 | 2,51 |
| 12pm -13pm | 101,44 | 87,50 | 9,25 | 46,42 | 38,82 | 29,39 | 28,34 | 0,65 |
| 13pm -14pm | 113,00 | 56,10 | 87,18 | 48,25 | 84,79 | 25,39 | 34,70 | 0,11 |
| 14pm -15pm | 102,82 | 91,72 | 31,69 | 48,07 | 20,49 | 27,33 | 22,13 | 1,28 |
| 15pm -16pm | 83,51 | 67,16 | 37,39 | 42,87 | 10,76 | 26,18 | 28,59 | 1,88 |
| Subtotal | 687,73 | | 276,92 | | 262,87 | | 220,98 | |
| Total Energía | 1448,50 | | | | | | | |

5.2 Ahorro Anual Acumulativo

Ahora definiremos al ahorro anual A.A.(\$) como el producto entre la energía solar anual aportada por el sistema y el valor del kilovatio-hora (Kw Hr) en el mercado.

Es decir:

$$(\$)A.A. = \frac{\text{Energía solar anual efectiva aportada por el sistema } (\$)}{Kw - Hr} \quad (25)$$

Ref. [4], pág.275.

En la Fig. 18., si representamos en la ordenada el valor del ahorro anual A.A. acumulativo y en la abscisa cada año del uso del equipo, podemos sacar las siguientes conclusiones:

1. Donde el ahorro acumulativo anual alcanza el valor del costo de inversión, leyendo en la abscisa determinamos el período de amortización de la inversión.
2. La diferencia entre el ahorro acumulativo anual al término de la vida útil del sistema y el costo de inversión del sistema, como se anota en la Fig. 18., nos indicará el ahorro total que implica la inversión.

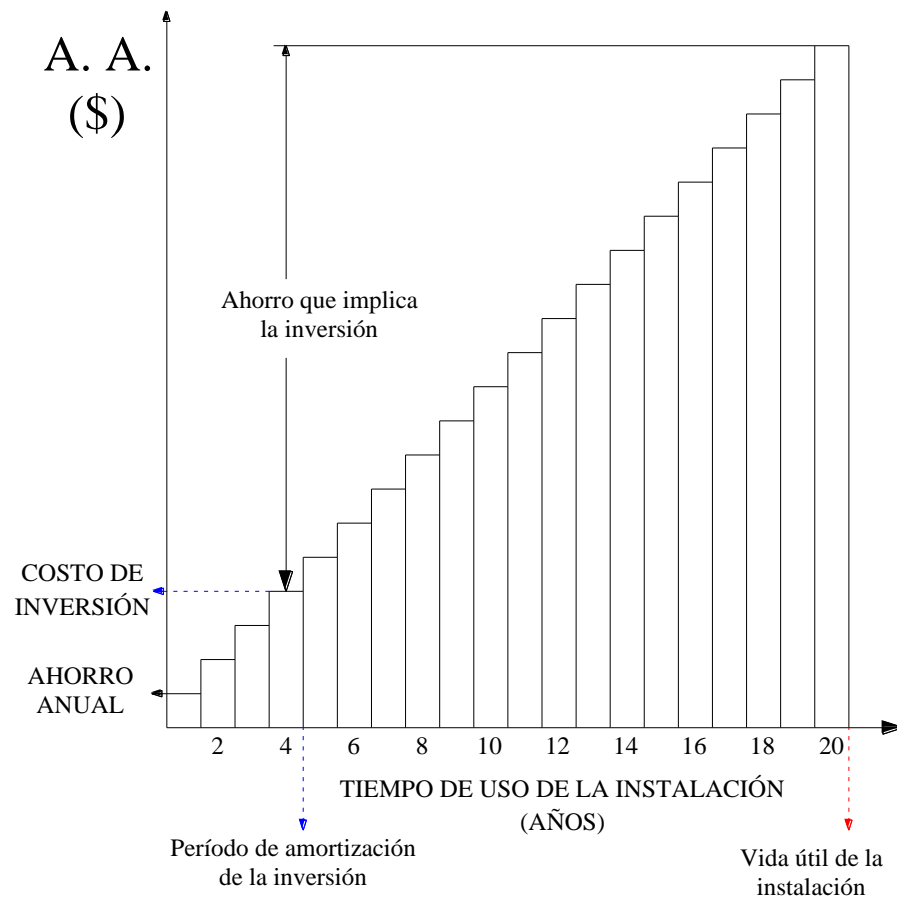


Fig. 18 Ahorro anual acumulativo de un sistema de energía solar

El costo aproximado de todos los cuatro colectores, con sus respectivos materiales, instrumentación, equipos, logística y mano de obra se detalla a continuación:

5.3 MATERIALES

| Descripción | Costo unit. | Cant. | Total | Observ. |
|--|-------------|-------|--------|---------|
| Cobre Nro. 24 y 0,5mm de 2x1 m | 400,00 | 1 | 400,00 | Plancha |
| Aluminio 1mm de 2x1 m | 100,00 | 1 | 100,00 | Plancha |
| Cobre "L" 1/2" (5/8 D.E.)x 1,02 mm x 6 m | 25,30 | 2 | 50,60 | Tubo |
| Cobre "L" 1" (1 1/8 D.E.)x 1,27 mm x 6 m | 60,00 | 1 | 60,00 | Tubo |
| Aluminio 3/4" D.E. 1,02 mm x 6 m | 20,00 | 2 | 40,00 | Tubo |
| Aluminio 1" D.E. 1,02 mm x 4 m | 20,00 | 1 | 20,00 | Tubo |
| Lana de vidrio 1,20 x 0,60 | 3,96 | 17 | 67,32 | Plancha |
| Vidrio 3 mm 1,10 x 0,60 m | 5,25 | 5 | 26,25 | Plancha |
| Silicona ABRO | 3,00 | 2 | 6,00 | - |
| Ángulo 1 x 1/8 - 3 mm | 7,90 | 4 | 31,60 | - |
| Plástico negro | 1,50 | 10 | 15,00 | - |
| Acoples de 1" | 4,20 | 8 | 33,60 | - |
| Masilla líquida Loctite | 5,00 | 1 | 5,00 | Pasta |

| | | | | |
|----------------------------------|--------|----|----------------|---------|
| Masilla epóxica Rally | 2,20 | 10 | 22,00 | - |
| Codo reductores de 1" a 3/4 x90º | 1,60 | 4 | 6,40 | - |
| Abrazaderas 1" | 0,50 | 16 | 8,00 | - |
| Manguera agua 1" x 1 m | 0,60 | 6 | 3,60 | - |
| Manguera agua 3/4" x 1 m | 0,30 | 6 | 1,80 | - |
| Polimex pequeño | 3,75 | 4 | 15,00 | Pasta |
| Cinta Teflon | 1,00 | 10 | 10,00 | - |
| Antioxidante negro mate 1/4 | 2,94 | 1 | 2,94 | Tarro |
| Pintura negro mate 1/4 | 4,80 | 1 | 4,80 | Tarro |
| Espray negro mate | 2,50 | 4 | 10,00 | Aerosol |
| Diluyente 1/2 litro | 0,72 | 2 | 1,44 | Botella |
| Sikaflex | 9,00 | 2 | 18,00 | Pasta |
| Codos Soldable roscable 32 mm | 0,65 | 4 | 2,60 | |
| Codos Soldable roscable 25 mm | 0,60 | 4 | 2,40 | |
| Codos Polimex 1" | 1,10 | 4 | 4,40 | - |
| Adaptadores hebra | 0,55 | 4 | 2,20 | - |
| Adaptadores 1" | 0,25 | 8 | 2,00 | - |
| Adaptadores 3/4" | 0,25 | 8 | 2,00 | - |
| Pegatubo | 0,50 | 1 | 0,50 | - |
| Cajas Zinc galvanizado 1/32 | 50 | 4 | 200,00 | - |
| Tanque acero 60 litros | 20,00 | 4 | 80,00 | - |
| Electrodos 6011 | 3,00 | 1 | 3,00 | - |
| Electrodos Al AW2201E4043 | 0,80 | 65 | 52,00 | |
| Electrodos Cu al 5% | 2,50 | 20 | 50,00 | |
| Electrodos proceso Tic | 20,00 | 4 | 80,00 | - |
| Mano de obra rolado | 70,00 | 2 | 140,00 | |
| Mano obra soldadura | 150,00 | 1 | 150,00 | - |
| Subtotal materiales | | | 1730,45 | |

5.4 INSTRUMENTACIÓN

| | | | | |
|--------------------------------|------|----|-------|---|
| Pic 16F877A | 7,25 | 1 | 7,25 | - |
| Cristal 4 MHz | 0,50 | 1 | 0,50 | - |
| Cap 22pf | 0,05 | 2 | 0,10 | - |
| Sensor LM35 | 2,00 | 30 | 60,00 | - |
| LM336 | 1,25 | 1 | 1,25 | - |
| Resistor 2,5 K | 0,05 | 1 | 0,05 | - |
| Potenciómetro 10 K | 0,21 | 1 | 0,21 | - |
| Potenciómetro multivuelta 10 K | 0,55 | 1 | 0,55 | - |
| 1N4148 | 0,05 | 3 | 0,15 | - |
| LCD 2 x 16 | 8,50 | 1 | 8,50 | - |
| Peineta 40 pin | 0,60 | 8 | 4,80 | |
| Capacitor 47 nf | 0,05 | 1 | 0,05 | |

| | | | | |
|---------------------------------|--------|---|---------------|---|
| Capacitor 100 nf | 0,05 | 6 | 0,30 | - |
| Resistencias 220 ohm | 0,03 | 6 | 0,18 | |
| Borneras 3C | 0,30 | 2 | 0,60 | |
| Bornera 3 pin | 0,15 | 5 | 0,75 | - |
| Mano de obra termómetro digital | 200,00 | 1 | 200,00 | - |
| Subtotal Instrumentación | | | 285,24 | |

5.5 EQUIPOS

| | | | | |
|------------------------|--------|---|---------------|---|
| Anemómetro digital | 160,00 | 1 | 160,00 | - |
| Piranómetro digital | 193,00 | 1 | 193,00 | - |
| Multímetro digital | 17,00 | 1 | 17,00 | - |
| Subtotal Equipo | | | 370,00 | - |

5.6 LOGÍSTICA

| | | | | |
|---------------------------------|--------|----|----------------|---------|
| Hospedaje | 20,00 | 3 | 60,00 | - |
| Movilización interprovincial | 12,00 | 4 | 48,00 | Pasajes |
| Movilización interna Guayaquil | 5,00 | 6 | 30,00 | - |
| Movilización interna Loja | 1,50 | 30 | 45,00 | - |
| Alimentación Guayaquil | 2,00 | 18 | 36,00 | - |
| Varios | 100,00 | 1 | 100,00 | - |
| Subtotal Instrumentación | | | 319,00 | - |
| TOTAL | | | 2704,69 | |

Por lo tanto si dividimos el total para cuatro, cada colector tendrá un valor aproximado de \$ 676, ajustando este valor a nuestro entorno y sin tomar en cuenta gastos de logística, equipos, instrumentación, mano de obra, dimensiones y si además se los produjera en serie valdría unos \$250 cada uno.

Para trazar el gráfico de A.A. versus vida útil de nuestro sistema se procederá de la siguiente manera:

1. Se obtendrá la ganancia total de energía de cada sistema durante los días de prueba en kilovatios.
2. Dividiendo para el número de días de prueba. Tendremos la ganancia promedio diaria en kilovatios.
3. Multiplicando por el número de horas de prueba obtendremos los kilovatios-hora de ganancia diaria.
4. Multiplicando por 365 obtenemos los kilovatios hora de ganancia anual.

Por tanto a partir de las tablas 17 a la 20 tenemos la 21:

| Energía (Qu) | Tipo de colectores | | | |
|------------------------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|
| | Cu. Acanalado | Cu. Soldado | Al. Acanalado | Al. Soldado |
| Qu Total (w) | 2232,78 | 1877,41 | 1932,91 | 1448,50 |
| Qu Total (Kw) | 2,23 | 1,88 | 1,93 | 1,45 |
| Qu Diario (Kw) | 0,11 | 0,09 | 0,10 | 0,07 |
| Qu Diario (Kw -H) | 0,78 | 0,66 | 0,68 | 0,51 |
| Qu Anual (Kw -H) | 285,24 | 239,84 | 246,93 | 185,05 |
| Total (\$) A.A. anual | 26,24 | 22,07 | 22,72 | 17,02 |

Tabla 21. (\$) Ahorro anual acumulativo de cada colector solar

El costo actual del Kilovatio-hora es de 0,092 centavos de dólar, luego el ahorro anual por ejemplo para el colector de cobre rolado será:

$$\$ A. A. = 285,24Kw - Hr \frac{0,092\$}{Kw - Hr} = 26,24$$

Con estos valores y con una vida útil del equipo estimada en 20 años, trazamos la Fig. 19.

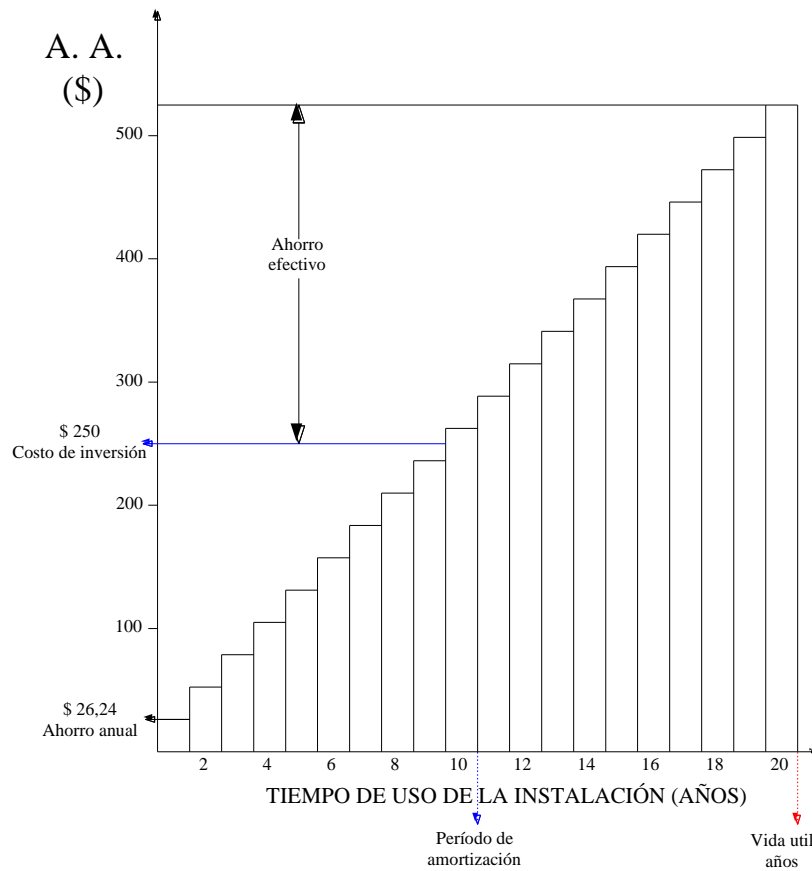


Fig. 19 Ahorro anual acumulativo para el colector de cobre acanalado

Del análisis de la Fig. 19., podemos apreciar al finalizar el décimo año se estaría amortizando el costo de inversión para el colector de cobre acanalado, quedando un ahorro total dado por los diez años restantes de \$ 262,40. El coste para los demás colectores va a fluctuar de acuerdo a su material y al tipo de construcción acanalado o soldado.

Un segundo análisis económico, que nos permita obtener un ahorro real de dinero puede obtenerse por comparación con el funcionamiento de un sistema de calentamiento eléctrico, de la siguiente manera:

Suponiendo que nuestro colector de cobre acanalado va a emplearse en uso doméstico, trataremos de averiguar la cantidad de dinero que gastaría en energía eléctrica una familia promedio de 6 integrantes en Loja, que tome una ducha una vez al día.

Una ducha eléctrica usada en nuestro país con dos posiciones, una para agua tibia con corriente en uso de 18 amperios y otra para ducha caliente con corriente en uso de 30 amperios. Si esta persona emplea 10 minutos de continua caída de agua en ducharse, la cantidad de energía que consume para una ducha caliente será:

$$E = P \cdot t \quad (26)$$

$$E = V \cdot A \quad (27)$$

Donde:

E = Energía en $Kw - Hr$

P = Potencia en Kw

V = Voltaje

A = Amperaje

Después:

$$P = 119V \cdot (30A) = 3570w$$

$$P = 3.57Kw$$

$$E = 3.57Kw(10min) \frac{1Hr}{60min} = 0,60Kw - Hr$$

Como son 6 personas tenemos:

$$E = 6(0,60Kw - Hr) = 3,60Kw - Hr$$

En un año esas 6 personas gastarán:

$$$. \text{Año} = 3,60Kw - Hr(365) \frac{0,092\$}{Kw - Hr} = \$ 120,88$$

Y en veinte años será de \$ 2417,76.

4. DISCUSIÓN

De los cálculos y sus respectivos gráficos podemos acotar lo siguiente:

En las páginas 65 a 80, se nota que los gráficos de temperatura de entrada y salida del agua en los colectores guardan una misma configuración geométrica para cualquier período de tiempo considerado, esto es natural y se debe a que los colectores tienen las mismas dimensiones y diseño. Cabe anotar que la temperatura de salida del agua a los colectores en días nublados o seminublados presenta una gran irregularidad mientras que la temperatura de entrada tiene características de variación más o menos regulares, esto depende de cuán nublado se encuentra el firmamento.

Finalmente, más o menos a partir de las 15:00 horas las temperaturas de entrada y salida del agua empiezan a decaer con relativa rapidez, en tanto que la temperatura media del agua del tanque o se mantiene constante o decae con gran lentitud, ya que a partir de esa hora la irradiación solar sobre los colectores es pequeña.

En las páginas 85 a 88, se encuentra graficada la rapidez con que se incrementa la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento y en ellas podemos notar que siempre la temperatura del agua es mayor en el colector de cobre acanalado, alcanzando diferencias de temperatura de unos 4 a 5 °C a partir de las 11:00 horas hasta el final de las pruebas en días soleados, punto en el cual se alcanza temperaturas que oscilan entre los 50 a 65 °C lo que permite determinar que el colector de cobre acanalado eleva la temperatura del agua en alrededor de un 8 a 10 % más que el colector de aluminio acanalado, esta diferencia puede parecer pequeña, pero si consideramos que el volumen de agua calentada es de 50 litros, la diferencia comienza a ser significativa.

Los gráficos también nos indican que la velocidad de incremento de temperatura del agua en días soleados o parcialmente soleados es generalmente de 1 °C cada diez minutos.

En días parcialmente soleados y en días nublados, la diferencia de temperatura es de 3 a 4 °C y de 2 a 3 °C respectivamente y en el peor de los casos de días muy nublados la temperatura media del agua del tanque es igual en los colectores.

Podemos decir que para días soleados el colector de cobre acanalado eleva la temperatura del agua en 65 °C como promedio, mientras que el de aluminio acanalado eleva la temperatura del agua en más o menos 48 °C como promedio.

La comparación entre las eficiencias de los colectores se puede apreciar en las páginas 81 a 84, en donde se ha graficado la eficiencia de los colectores de cobre y aluminio contra el transcurso del tiempo.

La eficiencia del colector de cobre acanalado es siempre mayor que la del colector de aluminio acanalado, y este a su vez mayor que el colector de cobre soldado; y este a su vez mayor que la del colector de aluminio soldado.

5. CONCLUSIONES

- Con la realización de este proyecto, se logró un análisis minucioso de la eficiencia energética de cada uno de los prototipos de colectores solares de placa plana, realizados mediante dos técnicas diferentes de construcción (Acanalado y Soldado).
- Mediante una extensa revisión bibliográfica se recopiló y sistematizó información necesaria referente a los colectores solares de placa plana, como parte fundamental para iniciar de manera adecuada con nuestro estudio.
- Teniendo como referente fundamental la información de este proyecto, se realizó el cálculo y diseño del mismo, construyéndose de manera correcta y precisa los dos prototipos de colectores solares de placa plana, considerando las dos técnicas constructivas antes mencionadas.
- Durante un lapso de 4 semanas, se recogió datos en los colectores, con los que se obtuvo de forma analítica las eficiencias de cada prototipo de colector que fue construido.
- Los colectores construidos con plancha de cobre y aluminio acanalada, permiten obtener temperaturas superiores a los colectores construidos con plancha de cobre o aluminio laminado, conforme se puede apreciar en los gráficos 65 a 80, donde se aprecia la variación temperatura del agua en el tanque de almacenamiento, al transcurrir el tiempo.
- De igual forma, y concomitantemente con lo anterior, la eficiencia es mayor en el colector cuya placa absorbadora es de cobre acanalado, seguido del colector cuya placa absorbadora es de aluminio acanalado, luego está el de cobre soldado y finalmente el de aluminio soldado; debido a que los dos primeros existe mayor superficie de contacto entre el haz de tubos y la placa absorbadora.
- En la gráfica 17. Prueba 3, correspondiente a la variación de temperaturas en el sistema, se registró un pico en el cual la temperatura de entrada (t_e) es mayor a la temperatura en el tanque (t_t), a las 2 de la tarde en la semana del 21 al 25 de enero del 2010, fenómeno que se debe al calentamiento de la manguera negra utilizada en la entrada del colector.

6. RECOMENDACIONES

- ◆ Operar el sistema con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de 15° puesto que como se ha demostrado experimentalmente con esta inclinación el colector solar de placa plana funciona de manera óptima.
- ◆ Aumentar el espesor del aislamiento lateral con el fin de disminuir las pérdidas térmicas a través de los costados.
- ◆ Finalmente como posibilidades futuras es de prever que el nuevo diseño del colector permitirá una amplia utilización de colectores solares de placa plana en calentamiento o enfriamiento de edificios así como también para producir vapor.
- ◆ No es aconsejable trabajar con el tubo de aluminio, pese a su menor costo con respecto al cobre, pues este material que llega al país no es cien por ciento puro, sino aleado con otros metales, por lo que su calidad disminuya notablemente; presentando por lo tanto serias dificultades al momento de soldarlo. Siendo además muy sensible a fisurarse con cualquier manipulación externa, dígase vibración por maquinaria como sierra, amoladora, etc.; o al recibir algún impacto no muy fuerte.
- ◆ Se podría continuar el proceso investigativo a través de una tesis que proponga mejorar el sistema mediante la consideración de un estudio valorativo entre diferentes tipos de láminas absorbedoras y la geometría del tubo, teniendo presente el fenómeno de bypass que se da en el haz de tubos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- [7] (BUN-CA), 2002. Manual sobre energía Renovable: Solar Térmica/Biomass Users Network (BUN-CA), 1ra ed. San José, Costa Rica. Pág. 9.
- [1] DUFFIE, Jhon; BECKMAN, William. 1980. Solar Engineering of Thermal Process. Segunda edición. EUA. New York. Wiley and Sons. Cap VI.
- [3] FERNANDEZ, Pedro. 2000. Procesos Termosolares en Baja, Media y Alta Temperatura. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria. España. Pág.1, 2.
- [8] GUEVARA, Sixto. OPS/CEPIS/UNATSABAR. 2003. Diseño de colectores solares, Lima, n° 03.87, 03.88.
- [2] INCROPERA, Frank; DEWITT, David. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4a ed. México. Prentice Hall. Cap. 7.
- [6] THERELKELD, J. 1973. Ingeniería del ámbito térmico, Prentice Hall Internacional, España, pág. 501.

Tesis:

- [5] LUNA, REYES. 2002. Tesis Profesional Energía Solar, (Tesis Ing. Mecánica). Distrito Federal, México. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Cap. I, y II.
- [4] TAPIA, Milton. 1984. Diseño y Construcción de un Colector Solar de Placa Plana de Doble exposición. (Tesis Ing. Mecánica). Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica. Cap. II, III, IV, y V.

Páginas Electrónicas:

- UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS LOWELL. Solar Irradiation Database. [en línea]. Massachusetts, EEUU. [<http://energy.caeds.eng.uml.edu/fpdb/irrrdata.asp>], [Consulta: 17 Septiembre 2009].

- Energía Solar. [en línea] [http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar], [Consulta 11 Noviembre 2009]
- Anemómetro. [en línea] [<http://navegacion.tripod.com/Apuntes2008/Cap12Anemometro.pdf>], [Consulta 3 Enero 2010]
- Medición de la velocidad del viento. Asociación danesa de la industria eólica [en línea] [<http://www.talentfactory.dk/es/tour/wres/wndspeed.html>], [Consulta 3 Enero 2010]

8. ANEXOS



