



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Mecánica



“RENDIMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR DE
DOBLE CAPTACION”

PROYECTO DE GRADO
Previo a la obtención del Título de
INGENIERO MECANICO

Presentado por:
Luis Arnulfo Sabando Cevallos

Guayaquil - Ecuador
1989

A G R A D E C I M I E N T O

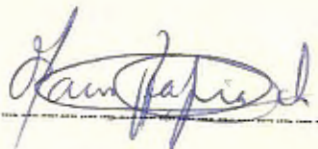
Al ING. MARCO PAZMINO ,
Director del Tópico,
por su ayuda tan
necesaria para la
realización del
presente trabajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

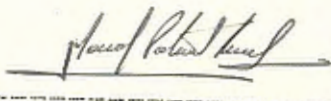
A DIOS



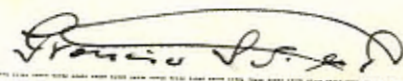
Ing. Marcos Tapia Q.
Subdecano



Ing. Marco Pazmiño B.
Director del Tópico



Ing. Mario Patiño A.
Miembro de Tribunal



Ing. Francisco Santelli
Miembro del Tribunal

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este PROYECTO DE GRADO, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ".

(Reglamento de Tópico de Graduación)


.....

Luis Arnulfo Sabando Cevallos

RESUMEN

El presente trabajo investigativo trata sobre la realización de pruebas a un colector solar de placa plana de doble captación. Este prototipo es el fruto de un proyecto previo realizado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL, utilizando una superficie reflectora adicional para mejorar la capacidad de captación de energía solar.

En el capítulo 1 se delinea en una manera general el recurso energético solar, los equipos que lo aprovechan para el calentamiento de agua, se describe el colector de placa plana de doble captación usado, así como detalles de su rehabilitación.

Seguidamente se obtienen las ecuaciones para calcular la energía incidente, pérdidas térmicas y la eficiencia del colector de doble captación en primer lugar, cuando se utilizan las dos cubiertas de captación y luego, cuando se trabaja solamente con la cubierta inferior de captación.

El capítulo 3 indica el procedimiento y descripción de las pruebas, tabula los datos experimentales y los cálculos realizados y los presenta gráficamente.

Los gráficos trazados presentan comparativamente la variación de la temperatura del agua en el colector, la energía útil ganada, las pérdidas térmicas y la eficiencia

versus el tiempo expresado en horas de prueba cuando el colector trabaja con ambas cubiertas de captación y cuando solamente lo hace con la cubierta inferior de captación en similares condiciones climáticas, ya sean días soleados, semi-soleados y nublados.

Realizado el análisis correspondiente se concluye que el colector solar de doble captación pierde mayor cantidad de energía de la que gana por su cubierta transparente inferior al operar sin los paneles reflectores especulares, por lo que conviene aislar la parte inferior del mismo, lo que equivale a trabajar con un colector solar plano convencional.

INDICE GENERAL

	PAG.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	XI
INDICE DE TABLAS	XIII
INDICE DE ABREVIATURAS	XV
INTRODUCCION	18
1. GENERALIDADES	21
1.1 Objetivo.	21
1.2 La energía solar.	22
1.3 Colectores de placa plana convencionales y colectores de placa plana de doble captación.	24
1.3.1 Colectores de placa plana convencionales.	24
1.3.2 Colectores de placa plana de doble captación.	26
1.4 Nociones básicas para el diseño de colectores.	27
1.5 Descripción del colector de doble captación.	29
1.5.1 Detalles de su rehabilitación.	30
2. ANALISIS DE LOS COLECTORES DE PLACA PLANA DE DOBLE CAPTACION	32

	PAG.
2.1 Cálculo de la energía incidente.	33
2.1.1 Por ambas cubiertas.	33
2.1.2 Por su cubierta inferior.	35
2.2 Cálculo de las pérdidas térmicas.	35
2.2.1 Captando energía por ambas cubiertas.	35
2.2.2 Captando energía por su cubierta inferior.	42
2.3 Cálculo de la eficiencia.	45
2.3.1 Captando energía por ambas cubiertas.	45
2.3.2 Captando energía por su cubierta inferior.	46
3. PARTE EXPERIMENTAL	47
3.1 Procedimiento y descripción de las pruebas.	47
3.2 Variación de la temperatura del agua en el colector.	65
3.3 Comparación de la energía útil ganada.	71
3.4 Comparación de las pérdidas térmicas.	75
3.5 Variación de la eficiencia de captación.	79
3.6 Análisis de resultados.	81
4. ANALISIS ECONOMICO	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90

PAG.

APENDICE

94

BIBLIOGRAFIA

96

INDICE DE FIGURAS

Nº		PAG.
1.	Espectro Solar.	23
2.	Circulación natural en colectores.	25
3.	Circulación forzada en colectores.	26
4.	Esquema del colector de doble captación.	34
5.	Circuito térmico del colector con sus dos cubiertas expuestas.	38
6.	Circuito térmico equivalente del colector con sus dos cubiertas expuestas.	39
7.	Esquema del colector con sólo su cubierta inferior expuesta.	43
8.	Circuito térmico del colector con sólo su cubierta inferior expuesta.	44
9.	Variación de la temperatura del agua en el colector. Día soleado.	66
10.	Variación de la temperatura del agua en el colector. Día seminublado.	67
11.	Variación de la temperatura del agua en el	

No	PAG.
colector. Día nublado.	68
12. Temperatura de salida del agua del colector con sus dos cubiertas expuestas.	69
13. Variación de la temperatura de salida del agua del colector con sólo la cubierta inferior expuesta.	70
14. Energía útil ganada por el colector en un día soleado.	72
15. Energía útil ganada por el colector en un día semi-nublado.	73
16. Energía útil ganada por el colector en un día nublado.	74
17. Pérdidas térmicas en el colector en un día soleado.	76
18. Pérdidas térmicas en el colector en un día semi-nublado.	77
19. Pérdidas térmicas en el colector en un día nublado.	78
20. Eficiencias del colector con sus dos cubiertas expuestas.	80

INDICE DE TABLAS

DATOS EXPERIMENTALES

No PAG.

COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

I.	Prueba 1.	51
II.	Prueba 2.	52
III.	Prueba 3.	53

COLECTOR CON SOLO LA CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

IV.	Prueba 4.	54
V.	Prueba 5.	55
VI.	Prueba 6.	56

CALCULOS

COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

VII.	Prueba 1.	59
VIII.	Prueba 2.	60
IX.	Prueba 3.	61

No

PAG.

COLECTOR CON SOLO LA CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

X.	Prueba 4.	62
XI.	Prueba 5.	63
XII.	Prueba 6.	64

INDICE DE ABREVIATURAS

Aa	Area del absorbedor.
Al	Area lateral.
°C	Grados centigrados.
cm	Centímetros.
cp	Calor específico del agua.
E	Energía eléctrica.
ea	Espesor de aislamiento.
Hpi-ci	Coeficiente de convección del absorbedor a la cubierta inferior del colector.
Hps-cs	Coeficiente de convección del absorbedor a la cubierta superior del colector.
Hrci	Coeficiente de radiación de la cubierta inferior al ambiente.
Hrcs	Coeficiente de radiación de la cubierta superior al ambiente.
Hrpi	Coeficiente de radiación del absorbedor a la cubierta inferior.
Hrps	Coeficiente de radiación del absorbedor a la

	cubierta superior.
Hv	Coefficiente de convección debido al viento.
hr	Hora.
I	Radiación solar total.
Ii	Radiación solar incidente sobre el colector de doble captación.
Ir	Radiación solar reflejada.
I1	Energía solar incidente sobre la cubierta superior del colector.
I2	Energía solar incidente sobre la cubierta inferior del colector.
J	Joules.
°K	Grados Kelvin.
Ka	Conductividad del aire.
Kg	Kilogramo.
Kw	Kilovatio.
ka	Conductividad del aislamiento.
L	Distancia del absorbedor a las cubiertas de vidrio.

m	Razón de flujo de agua por termosifón.
m ²	Metros cuadrados.
mm	Milímetros.
P	Potencia.
Qa	Calor ganado por el absorbedor.
Qpa	Pérdidas de energía del colector.
Qu	Energía útil ganada por el agua.
R _{1,5}	Resistencias térmicas.
ta	Temperatura del aire ambiental.
tci	Temperatura de la cubierta inferior de vidrio.
tcs	Temperatura de la cubierta superior de vidrio.
te	Temperatura del agua a la entrada del colector.
tm	Temperatura media del agua en el tanque.
tpi	Temperatura de la cara inferior del absorbedor.
tps	Temperatura de la cara superior del absorbedor.
ts	Temperatura del agua a la salida del colector.
Ua	Coficiente total de transferencia de calor en el colector exponiendo ambas cubiertas de vidrio.
Uai	Coficiente total de transferencia de calor en el colector con sólo la cubierta inferior expuesta.

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

W Vatios.

SIMBOLOS GRIEGOS

α Absortividad del absorbedor.

ϵ_c Emisividad des las cubiertas de vidrio.

ϵ_p Emisividad del absorbedor.

η Eficiencia del colector.

σ Constante de Stefan-Boltzman.

τ Transmisividad de las cubiertas de vidrio.

INTRODUCCION

El Ecuador todavía depende en buen grado de la utilización de los combustibles fósiles para la generación electromotriz. A más de los efectos contaminantes que ello acarrea, el aumento continuo en los precios de los derivados del petróleo y otros factores adicionales, han ocasionado un incremento en el costo de producción del kilovatio-hora de electricidad.

Por esta razón se hace imperioso utilizar otras fuentes energéticas, que estén a nuestro alcance, que nos permitan lograr un ahorro en el consumo eléctrico y un uso más racional de los recursos no renovables.

La radiación solar es la fuente de mayor energía sobre la Tierra, equivalente a 173 millones de kw-hr para una nubosidad media del 52% y es el factor primario determinante del medioambiente térmico de un lugar.

Se ha estimado que del total de energía solar incidente en el extremo superior de la atmósfera, el 33% es reflejada hacia el espacio exterior por las capas de nubes, el 9% se pierde hacia el espacio por dispersión en la atmósfera, el 15% es absorbida por los constituyentes atmosféricos, principalmente por el vapor de agua, el 27% alcanza la superficie terrestre como radiación directa y el 16% restante llega a la Tierra como radiación difusa. Es decir, de la energía incidente, el 43% alcanza la

superficie terrestre.

La aportación del Sol a la energía de nuestro planeta es cinco mil veces mayor que las demás fuentes y puede ser fácilmente convertida en calor. Se necesita de una superficie que pueda absorber la energía radiante y que puesta en contacto con un fluido, sea agua o aire, transfiera la energía a éste utilizándolo para determinado fin.

La radiación solar se puede captar por varios métodos; los más utilizados son los colectores planos y los colectores concentrantes.

Los colectores concentrantes alcanzan temperaturas de calentamiento muy altas, pero implican un seguimiento del movimiento del sol, por lo que son equipos caros y complejos.

Los colectores planos, aunque sean menos eficientes y obtengan temperaturas de calentamiento inferiores a los 90°C, resultan más convenientes, puesto que son de construcción sencilla y barata, no requiriendo una orientación continua, por lo que en nuestro medio se difunde su uso.

Nuestro país, por estar ubicado en la zona tórrida del planeta presenta características inmejorables de heliofanía y radiación solar, que hacen idónea la

utilización de los colectores solares planos.

La ESPOL ha realizado investigaciones en el campo de los colectores solares y en el presente trabajo se ha probado un colector de placa plana de doble captación para el calentamiento de agua ya existente en el laboratorio de energía solar, sin utilizar su placa reflectora de radiación solar, por lo que la energía que se recibe por la parte inferior del colector será la energía incidente reflejada en el piso sobre el cual se instale el equipo, lo que nos permitirá saber algo más sobre este tópico.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 OBJETIVO

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL ha realizado investigaciones en el campo de la energía solar. Fruto de esas investigaciones es la construcción de un prototipo experimental de colector solar de placa plana de doble captación el que recepta por su parte superior la energía que llega directamente del Sol y por su parte inferior la energía que es reflejada por una pantalla de acero inoxidable.

En ese estudio se obtuvo como resultado que el colector solar de doble captación gana mayor energía que un colector plano convencional de similares dimensiones, a un ángulo de inclinación de 20° con respecto a la horizontal y una orientación norte con una eficiencia de captación del 37% promedio.

Tomando en cuenta este antecedente, se realiza el presente trabajo investigativo que persigue:

- Rehabilitar el colector de doble captación.
- Probar el colector sin utilizar la superficie reflectora, lo que implica que por su parte inferior el colector capte la energía radiante

previamente reflejada en el piso sobre el cual se monta el colector y obtener los valores de energía radiante absorbida, pérdidas térmicas, energía calórica útil y eficiencia de captación.

- Realizar pruebas que permitan coleccionar energía radiante por la cubierta inferior del colector solamente, para analizar el papel que desempeña esta superficie captadora en las condiciones particulares de funcionamiento.
- Realizar un análisis económico para saber si se justifica en estos términos el proyecto.

1.2 LA ENERGIA SOLAR.

El sol es la fuente de energía mayor sobre la Tierra y es el factor primario determinante del medio ambiente térmico de un lugar. Se puede asegurar que la humanidad ha dependido de la energía solar, puesto que ha sido la fuente original de todos los combustibles fósiles.

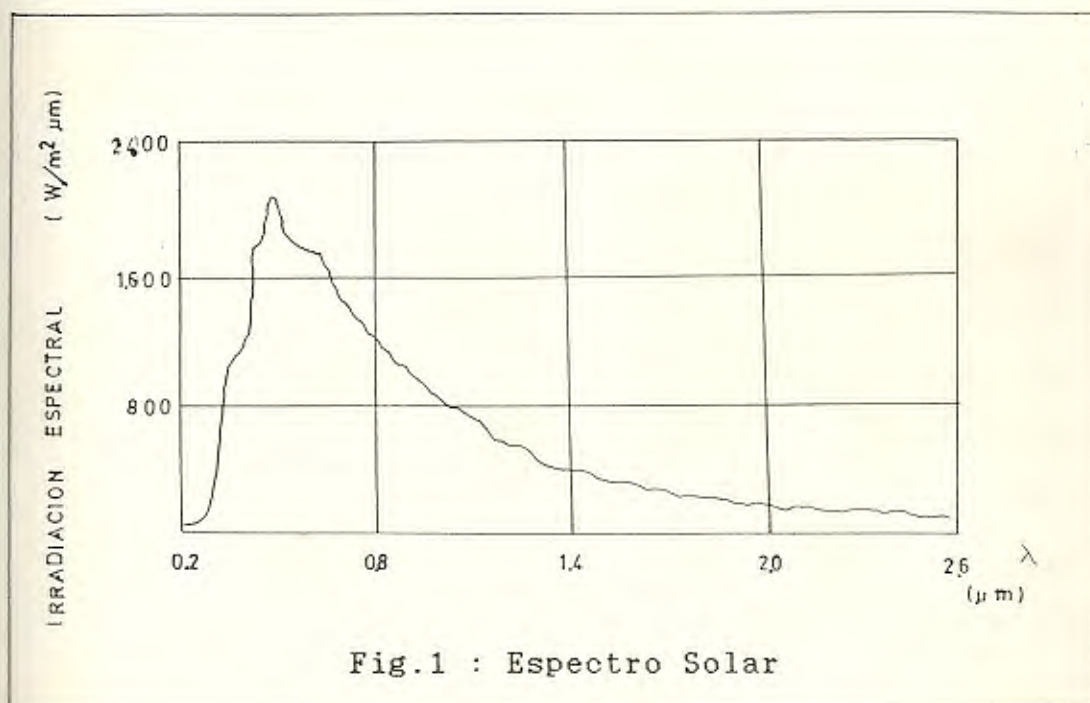
La gran energía del sol se cree procede de una reacción nuclear continuada, donde el hidrógeno se fusiona transformándose en helio en presencia de carbono y nitrógeno, alcanzándose extremadamente altas temperaturas, lo que hace suponer que el sol es totalmente gaseoso.

Las principales características del sol son:

Masa	1.991x E30	kg
Radio	6.960x E8	m
Densidad promedio	1.410	g/cm ³
Distancia média a la Tierra	1.5x E8	km

La temperatura efectiva del sol es 5762° K, que es la temperatura de un cuerpo negro radiando la misma cantidad de energía del sol.

La energía proveniente del sol por unidad de tiempo que llega a una unidad de superficie colocada perpendicular a la dirección de propagación de la radiación colocada en las afueras de nuestra atmósfera se denomina "Constante Solar" que tiene un valor de 1353 W/m² (1.94 cal/cm²min, 7.14 Btu/pie²min).



La figura 1 ilustra la distribución espectral de la radiación solar en el límite exterior de la atmósfera. La radiación ultravioleta incluye el intervalo de onda hasta los 0.38 micrones; la radiación visible está contenida entre 0.38 hasta 0.78 micrones; la radiación infrarroja ocurre a mayores longitudes de onda. La radiación térmica se da entre 0.1 y 100 micrones. La máxima intensidad está en el intervalo visible. El área bajo la curva completa es la constante solar.

1.3 COLECTORES DE PLACA PLANA CONVENCIONALES Y COLECTORES DE PLACA PLANA DE DOBLE CAPTACION.

1.3.1 COLECTORES DE PLACA PLANA CONVENCIONALES.

Consisten básicamente en una superficie plana de alta absorptividad para la radiación solar. Se usa una placa metálica ennegrecida. El principio general se basa en el movimiento del fluido del colector, por su parte superior, al tanque debido al fenómeno de termosifón, es decir, se produce gracias a la diferencia de densidad causada por el calentamiento del agua en el colector. Esta es la denominada circulación natural. Su esquema se muestra en

la figura 2.

El sistema mostrado en la figura 3 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. En estos casos, la bomba del sistema está comandada por un elemento controlador que compara la temperatura del agua a la salida del colector con la temperatura en el tanque.

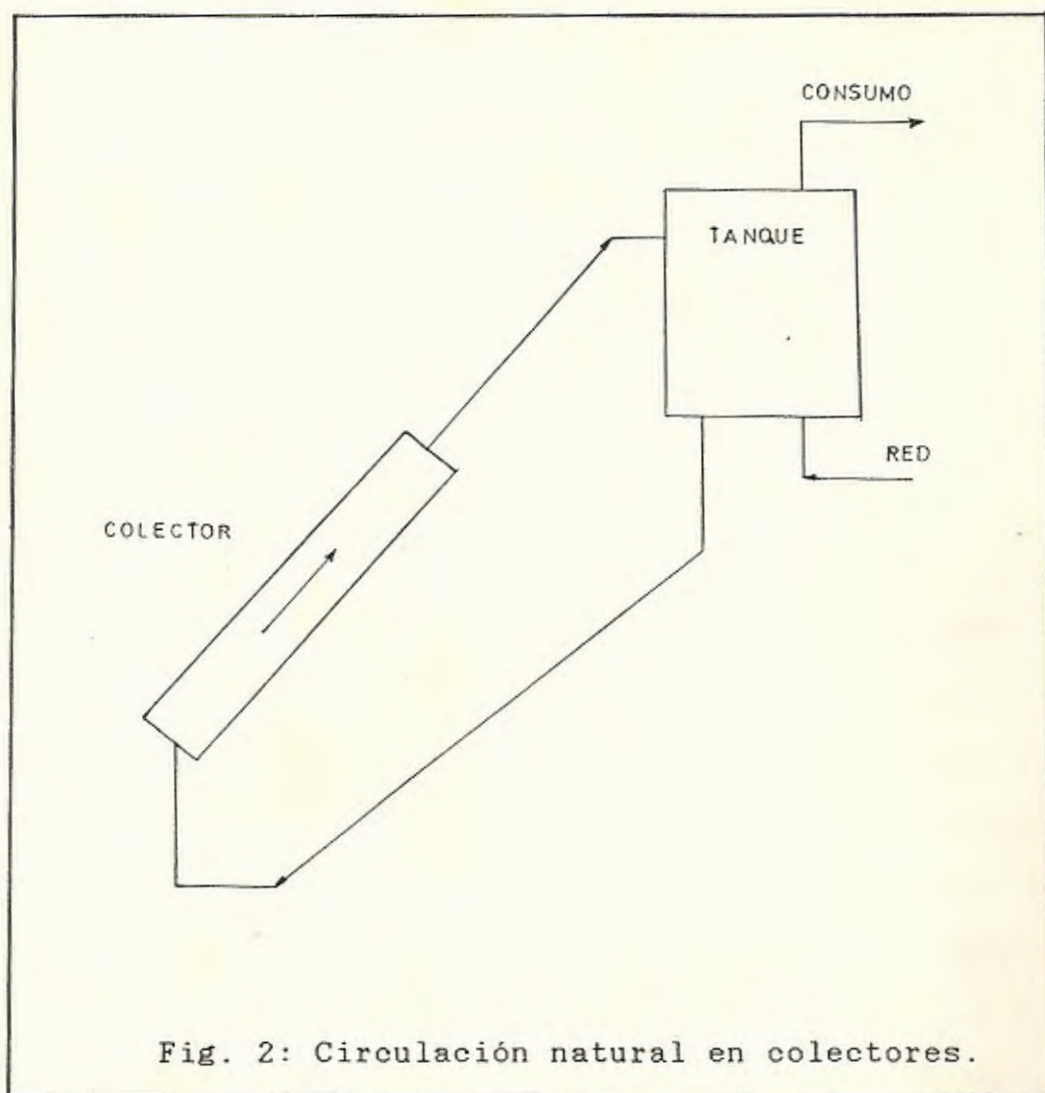


Fig. 2: Circulación natural en colectores.

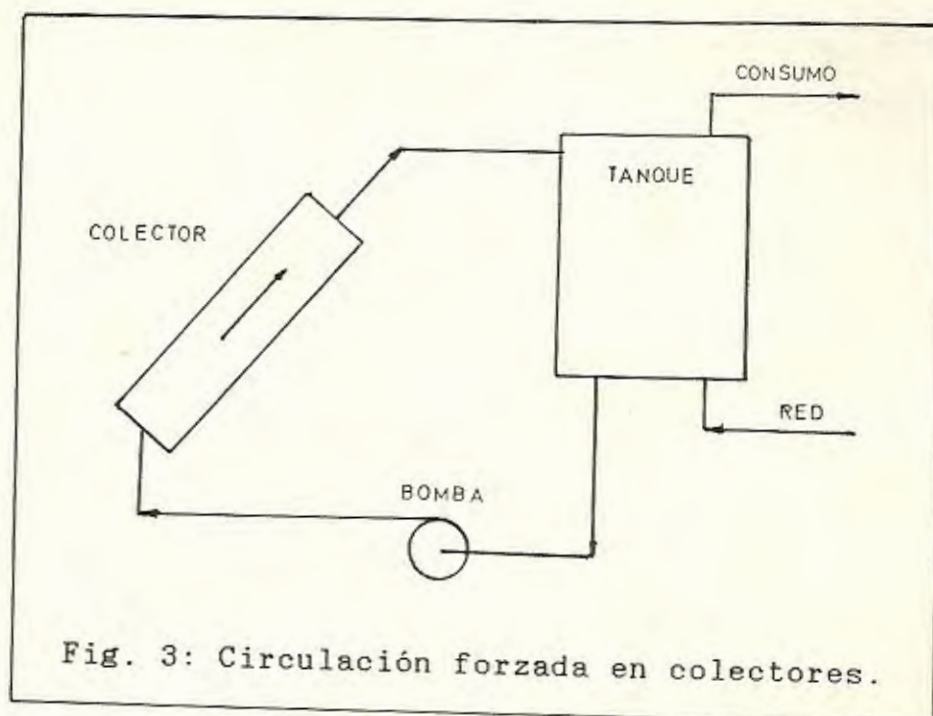


Fig. 3: Circulación forzada en colectores.

En los dos sistemas mostrados el tanque de almacenamiento puede incluir o no un sistema auxiliar que permita calentar el agua cuando la energía del sol no sea suficiente o cuando aumente la demanda de consumo de agua.

1.3.2 COLECTORES DE PLACA PLANA DE DOBLE CAPTACION.

Básicamente son colectores de placa plana convencionales, a los cuales se les ha quitado la parte aislante inferior de la placa absorbadora, sustituyéndola por otra cubierta transparente, para que pueda recibir la energía solar que ha sido previamente reflejada, ya sea por una pantalla reflectora adicional o por el

piso sobre el cual se monta. La placa absorbadora consiste en una superficie que tiene una serie de tubos debidamente espaciados y tanto la placa como los tubos metálicos son pintados de negro. La placa absorbadora va cubierta, tanto superior como inferiormente con superficies de vidrio transparente y lateralmente con aislante térmico para reducir las pérdidas de calor al ambiente. Toda la estructura va montada en un pedestal que mantenga al colector a una cierta altura sobre el piso, a la vez que sirva para ajustar el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal.

1.4 NOCIONES BASICAS PARA EL DISEÑO DE COLECTORES.

En primer lugar, hay que analizar el recurso energético disponible y nuestro país, por estar ubicado en la zona tórrida del planeta posee regiones con niveles de radiación propicias para la utilización de colectores para el calentamiento de agua no más allá de 90 °C, los que trabajan tanto con radiación directa como difusa, no requieren orientación continua hacia el sol, no son caros en su construcción, además que por su estructura no complicada exigen poco mantenimiento.

la radiación solar atraviesa las cubiertas

transparentes y calienta la placa absorbadora, la cual entrega calor al agua, la que se almacena en un tanque. Puesto que la superficie de absorción emite su radiación en el rango del infrarrojo y el vidrio es opaco en dicho rango, no hay pérdidas de transmisividad del vidrio, por lo que las pérdidas del colector serán principalmente por convección del aire acumulado entre las cubiertas y la placa absorbadora. El aislamiento, inferior y lateral, reduce las pérdidas por conducción hacia el exterior.

La placa absorbadora en nuestro medio es de acero negro debido a sus buenas propiedades absorbadoras, mejoradas al cubrirla con pintura negra, y a su bajo costo en comparación con planchas de cobre, que aunque su absorbividad es mejor, su precio es alto.

El aislamiento térmico debe resistir temperaturas de hasta 100°C, por lo que se recomienda usar poliuretano o poliestireno.

El material utilizado para las cubiertas transparentes es el vidrio ordinario de bajo contenido de hierro, pues presenta una transmitancia de alrededor de 0.9, y requiere de sumo cuidado en su manipuleo y fijación. Se ha experimentado con diversas clases de plásticos en función de su bajo costo, pero se ha comprobado que con el paso del tiempo sus características de transmisividad

disminuyen enormemente.

El distanciamiento entre los tubos juega un rol importante y puede comprobarse que una placa más gruesa y con mayor espaciamiento de tubos tiene el mismo rendimiento que una más delgada con separaciones de tubos menores.

La distribución de temperatura en la placa de absorción es como sigue: la temperatura más alta se encuentra equidistante entre los dos tubos y es ligeramente inferior en la periferia según sean las pérdidas por convección.

1.5 DESCRIPCION DEL COLECTOR DE DOBLE CAPTACION.

El colector experimental tiene las siguientes dimensiones:

Longitud	2080 mm.
Ancho	1050 mm.
Altura	140 mm.
Distancia del absorbedor a cubierta inferior	70 mm.
Distancia del absorbedor a cubierta superior	70 mm.
Espesor aislamiento lateral	20 mm.

La placa absorbadora es de hierro negro de

dimensiones 1980 x 1100 x 0.635 mm. a la cual se le practicaron diez canales semicirculares con un espaciamiento entre sí de 100 mm. para alojar a los tubos longitudinales. Estos tubos son de hierro galvanizado de una longitud 1990 mm. y con diámetro interior 12.7 mm. Los tubos cabezales, también de hierro galvanizado tienen como longitud 1150 mm. y un diámetro interior de 25.4 mm.

Para las cubiertas transparentes se utilizó vidrio ordinario de 3 mm. de espesor para la cubierta superior y de 4 mm. de espesor para la cubierta inferior.

1.5.1 DETALLES DE SU REHABILITACION.

El colector solar presentaba sólo sus partes metálicas en estado recuperable, no tenía sus cubiertas transparentes y en general, todos los elementos de conexión, llámense tuberías, neoplos, abrazaderas, cinta de vinyl y otros estaban dañados.

El trabajo de reparación consistió en:

- Enderezar, desoxidar, limpiar y cubrir con pintura negro mate la placa absorbedora y el banco de tubos.
- Enderezar y reforzar los marcos laterales del

colector.

- Alinear y fijar firmemente los marcos de aluminio tipo C que soportan a los vidrios.
- Colocación de perfiles de aluminio de sujeción tipo T de los vidrios de la cubierta inferior para evitar el pandeo de los mismos.
- Colocación de los vidrios; primero se colocaron los tres vidrios de la cubierta superior y luego los de la cubierta inferior. Hay que destacar el sumo cuidado que se debe tener en el manipuleo de los vidrios, pues un pequeño descuido puede significar un accidente personal o el rompimiento del vidrio. Se necesita por lo menos de dos personas que trabajen coordinadamente para colocar los vidrios.
- Limpiar y reparar el tanque de almacenamiento de agua.
- Colocación de mangueras de PVC que van del colector al tanque y viceversa.
- Fijación de las termocuplas en los lugares previstos.

CAPITULO 2

ANALISIS DE LOS COLECTORES DE PLACA PLANA DE DOBLE CAPTACION

Las ecuaciones matemáticas utilizadas para calcular los diferentes parámetros se basan en las siguientes asunciones:

- 1.- La construcción del colector es de tubos paralelos y plancha.
- 2.- Los cabezales debido al efecto de termosifón suministran un flujo uniforme de agua a los tubos.
- 3.- No hay absorción de energía solar en las cubiertas del colector.
- 4.- El flujo de calor a través de las cubiertas es en una dimensión.
- 5.- La caída de temperaturas a través de las cubiertas es despreciable.
- 6.- Las cubiertas transparentes son opacas a la radiación infrarroja.
- 7.- El gradiente de temperatura alrededor de los tubos es despreciable.
- 8.- Las propiedades son independientes de la temperatura.

9.- Las pérdidas térmicas son a la misma temperatura ambiente.

10.- Los efectos de sombreado y suciedad sobre el colector son despreciables.

El colector de doble captación se lo probó prescindiendo de la superficie reflectante adicional, por lo que la energía que absorbe por su cubierta inferior será la radiación directa que es reflejada por el piso que se encuentra bajo el colector y como uno de los objetivos de este trabajo es analizar el rol que desempeña en estas condiciones de funcionamiento la cubierta inferior de captación en la operación global del equipo, las ecuaciones de transferencia de calor necesarias para calcular la energía incidente absorbida, las pérdidas térmicas y la eficiencia de captación se las deduce por separado para el caso en que el colector trabaje con ambas superficies de captación y para cuando trabaje solamente con la superficie inferior de captación, lo que se logra cubriendo con un material opaco a la radiación solar la cubierta superior de exposición.

2.1 CALCULO DE LA ENERGIA INCIDENTE.

2.1.1 POR AMBAS CUBIERTAS.

La energía incidente sobre el colector es la

energía solar directa y difusa que se capta por la cara superior de la placa absorbidora más la energía solar reflejada por el piso y sus alrededores y que es captada por la cara inferior de la placa absorbidora.

En concordancia con la figura 4 tenemos que:

$$I_i = I_1 + I_2$$

$$I_1 = \alpha \tau I$$

$$I_2 = \alpha \tau I_r$$

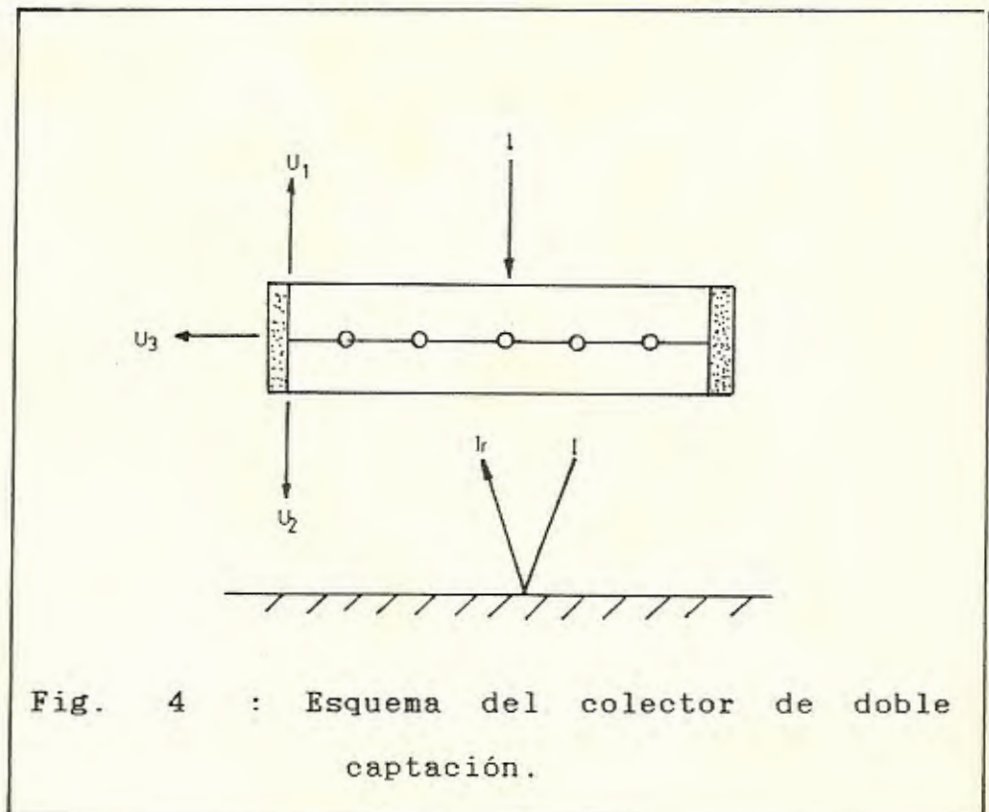
$$I_i = \alpha \tau (I + I_r) \quad (2.1-1)$$

α : Absortividad de la placa absorbidora.

τ : Transmisividad de la cubierta de vidrio.

I : Radiación solar total (W/m^2).

I_r : Radiación solar reflejada (W/m^2).



2.1.2 POR SU CUBIERTA INFERIOR.

Como ya se conoce, la energía incidente en la cubierta inferior es la energía solar reflejada por el piso y que es captada por la cara inferior de la placa absorbadora. De la figura 4 se tiene:

$$I_2 = \alpha \tau I_r \quad (2.1-2)$$

2.2 CALCULO DE LAS PERDIDAS TERMICAS.

2.2.1 CAPTANDO ENERGIA POR AMBAS CUBIERTAS.

Un balance energético en el absorbedor nos da:

$$\begin{aligned} \text{Calor ganado} &= \text{Pérdidas de calor} \\ \text{por absorbedor} &= \text{del absorbedor} \\ &+ \text{Calor ganado} \\ &+ \text{por el agua} \end{aligned}$$

$$Q_a = Q_{pa} + m c_p (t_s - t_e) \quad (2.2-1)$$

$$Q_a = \alpha \tau (I + I_r) A_a \quad (2.2-2)$$

$$Q_{pa} = U_a (t_n - t_a) A_a \quad (2.2-3)$$

U_a : Coeficiente total de pérdidas ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_a : Area del absorbedor (m^2)

A_a : Area del absorbedor (m^2)

t_n : Temperatura media del absorbedor ($^\circ C$)

t_a : temperatura aire ambiental ($^\circ C$)

m : Flujo de agua por termosifón (Kg/seg)

c_p : Calor específico del agua ($J/Kg \cdot ^\circ C$)

Este balance nos indica que la radiación incidente captada por el absorbedor en forma de calor se distribuye en pérdidas térmicas a través de las superficies superior, inferior y laterales del colector y en una ganancia energética absorbida por el agua que fluye dentro de los tubos.

El coeficiente global de pérdidas será la suma de los coeficientes parciales y de la figura 4 se tiene que:

$$U_a = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2.2-4)$$

El circuito térmico del colector está mostrado en la figura 5.

Los valores de U_1 , U_2 y U_3 se obtienen a partir de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción, convección y radiación contenidas en la referencia bibliográfica 1.

Las pérdidas energéticas por la parte superior del absorbedor son el resultado de la convección y radiación entre placas planas paralelas inclinadas. La ecuación experimental para la conductancia térmica por unidad de área

debida a la convección es:

$$H_{ps-cs} = \{1 - 0.018(\bar{t} - 10)\} \left\{ 1.14 \frac{\Delta t}{L} \frac{0.31}{0.07} \right\} \quad (2.2-5)$$

t: Temperatura media entre la placa superior y la cub. superior ($^{\circ}\text{C}$)

$$\bar{t} : (t_{ps} + t_{cs})/2$$

$$\Delta t : t_{ps} - t_{cs}$$

L : distancia entre el absorbedor y la cubierta de vidrio (cm)

Para la conductancia térmica debido a la radiación

$$H_{rps} = \frac{\sigma(t_{ps} + t_{cs})(t_{ps}^2 + t_{cs}^2)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1} \quad (2.2-6)$$

H_{rps} : Coeficiente de transferencia por radiación ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)

t_{ps} : Temperatura de la cara superior del absorbedor ($^{\circ}\text{K}$)

t_{cs} : Temperatura de la cubierta superior de vidrio ($^{\circ}\text{K}$)

Luego, la resistencia R₂ puede ser expresada

$$R_2 = 1/(H_{ps-cs} + H_{rps}) \quad (2.2-7)$$

Para las pérdidas de calor de la cubierta superior al ambiente por convección por el movimiento del viento sobre el colector se

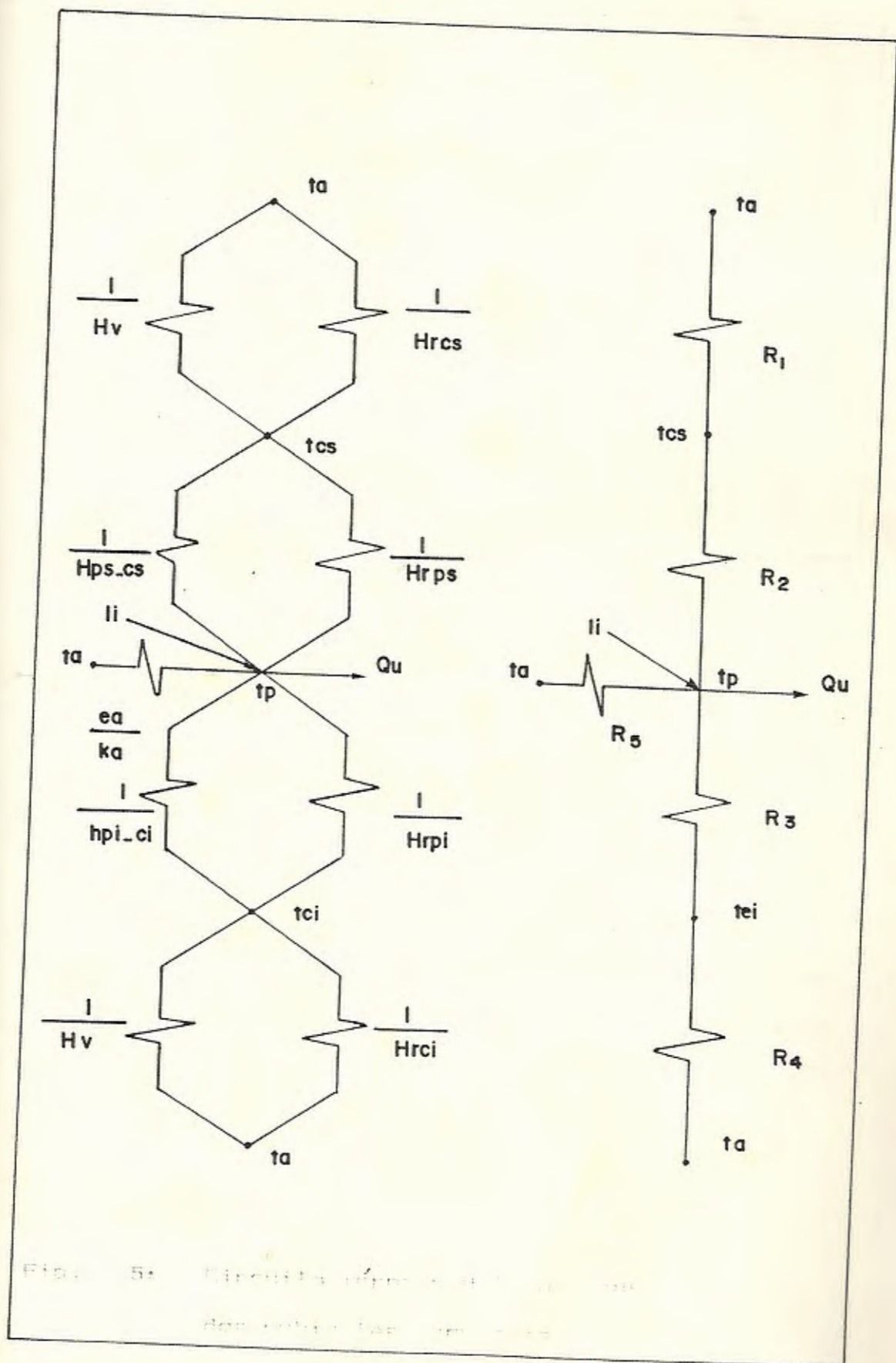


Fig. 5: Circuits referred to Fig. 1 and 2
 respectively. See Appendix 1

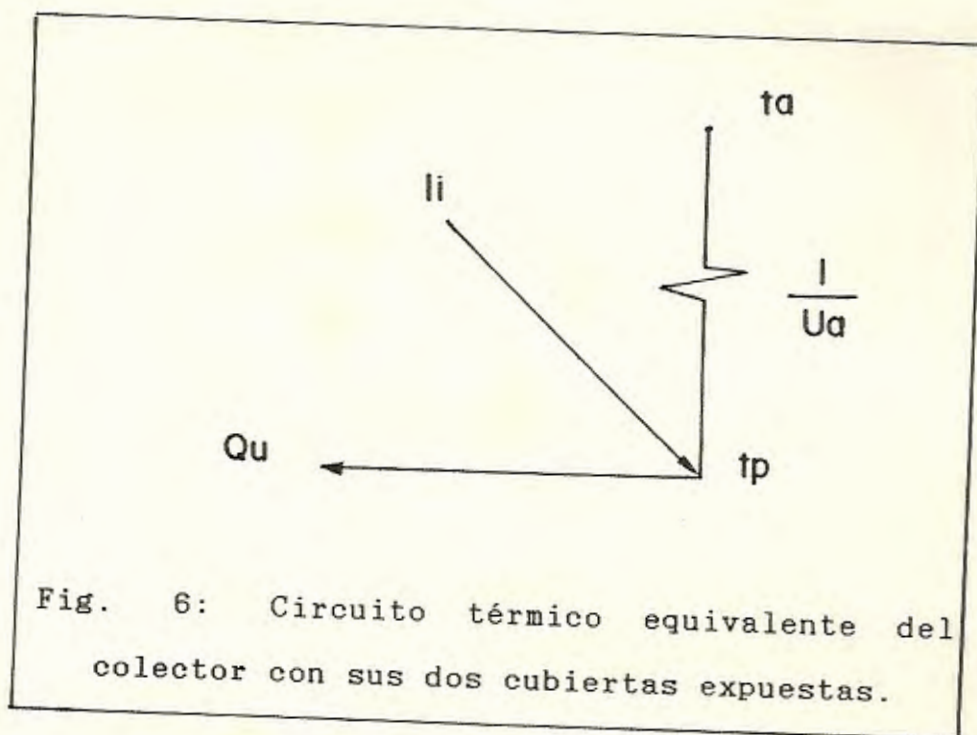


Fig. 6: Circuito térmico equivalente del colector con sus dos cubiertas expuestas.

utiliza la relación de Watmuff:

$$H_v = 2.8 + 3V \quad 0 < V < 7 \quad (2.2-8)$$

V : Velocidad del viento (m/seg)

El coeficiente para la radiación de la cubierta superior al ambiente ocurre por intercambio de radiación entre una placa plana inclinada con el cielo a temperatura ambiente y es expresada como:

$$H_{rcs} = \epsilon \sigma (t_{cs} + t_a)(t_{cs}^2 + t_a^2) \quad (2.2-9)$$

Entonces, la resistencia R_1 queda definida :

$$R_1 = 1/(H_v + H_{rcs}) \quad (2.2-10)$$

El coeficiente por pérdidas térmicas U_1 se lo calcula de la siguiente manera:

$$U_1 = \left[\frac{1}{H_v + H_{rcs}} + \frac{1}{H_{ps-cs} + H_{rps}} \right]^{-1} \quad (2.2-11)$$

Para las pérdidas por la parte inferior del colector se presenta el caso de una placa plana inclinada que irradia energía tanto para la parte superior como para la parte inferior. Por similitud, para evaluar dichas pérdidas se utilizan las mismas ecuaciones que se aplican para calcular los coeficientes de transferencia de calor hacia la parte superior, por lo que:

$$H_{pi-ci} = \{1 - 0.018(\bar{t} - 10)\} \left\{ \frac{1.14 \Delta t}{0.07} \right\}^{0.31} \quad (2.2-12)$$

$$H_{rpi} = \frac{\sigma (t_{pi} + t_{ci})(t_{pi}^2 + t_{ci}^2)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1} \quad (2.2-13)$$

$$\bar{t} = (t_{pi} + t_{ci})/2$$

$$\Delta t = t_{pi} - t_{ci}$$

H_{pi-ci} : coeficiente de transferencia por convección del absorbedor a la cubierta inferior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

H_{rpi} : coeficiente de transferencia por radiación del absorbedor a la cubierta inferior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Entonces, la resistencia R3 se define como :

$$R3 = 1/(H_{pi-ci} + H_{rpi}) \quad (2.2-14)$$

Para los coeficientes de transferencia de calor de la cubierta inferior al ambiente:

$$H_v = 2.8 + 3V \quad 0 < V < 7 \quad (2.2-15)$$

$$H_{rci} = \epsilon\sigma(t_{ci} + t_a)(t_{ci}^2 + t_a^2) \quad (2.2-16)$$

Hrci : coeficiente de transferencia de calor por radiación de la cubierta inferior al ambiente (W/m²°C)

La resistencia R4 viene definida como:

$$R4 = 1/(H_v + H_{rpi}) \quad (2.2-17)$$

El coeficiente U2 de pérdidas térmicas por la parte inferior del colector viene dado por:

$$U2 = 1/(R3 + R4)$$

$$U2 = \left[\frac{1}{H_{pi-ci} + H_{rpi}} + \frac{1}{H_v + H_{rci}} \right]^{-1} \quad (2.2-18)$$

Las pérdidas térmicas por los costados serán:

$$U_{1A1} = k_{aA1}/A_a$$

Basando las pérdidas por los costados sobre el área frontal del colector se tiene:

$$U_3 = U_1 A_1 / A_a$$

$$U_3 = k_a A_1 / e_a A_a \quad (2.2-19)$$

k_a : conductividad térmica del aislante

e_a : espesor de aislamiento.

El coeficiente global de pérdidas térmicas será entonces igual a :

$$U_a = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_a = \left[\frac{1}{H_{ps} - c_s + H_{rps}} + \frac{1}{H_v + H_{rcs}} \right]^{-1} + \frac{k_a A_1}{e_a A_a} + \left[\frac{1}{H_{pi} - c_i + H_{rpi}} + \frac{1}{H_v + H_{rci}} \right]^{-1} \quad (2.2-20)$$

2.2.2 CAPTANDO ENERGIA POR SU CUBIERTA INFERIOR.

Al colocar un material opaco a la radiación sobre la cubierta superior, esta no receptorá energía solar, por lo que la masa de aire que se encuentra entre el absorbedor y dicha cubierta superior se comporta como un material aislante, como en el caso de los espacios de aire encerrados, por lo que las pérdidas de calor en esa zona se deberán principalmente a la conducción de calor a través de la masa de aire.

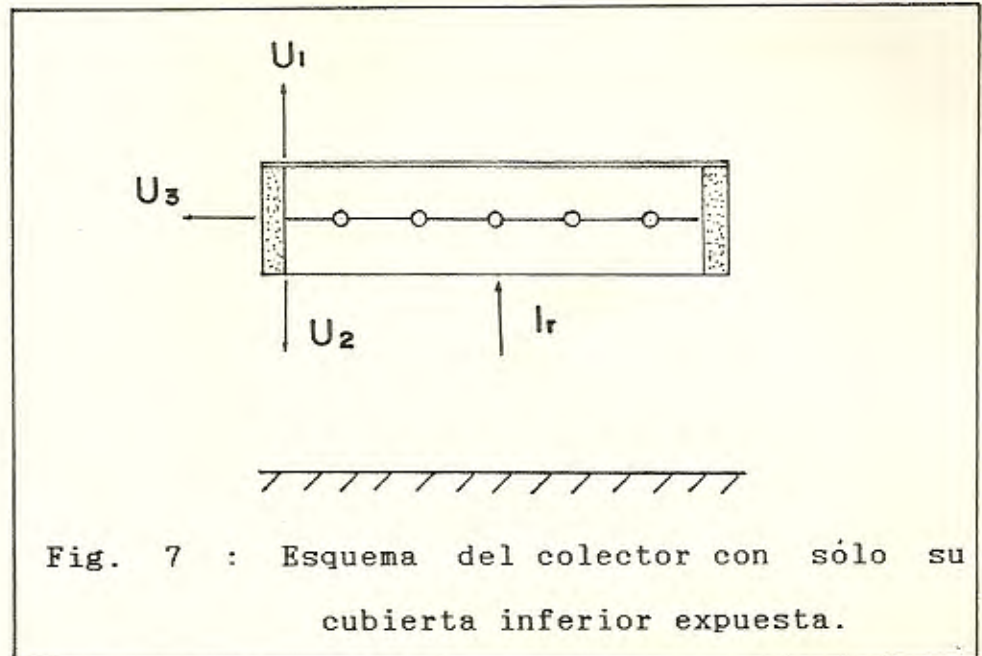


Fig. 7 : Esquema del colector con sólo su cubierta inferior expuesta.

Observando el circuito térmico de la figura 8 se nota que la resistencia R_1 representa a la resistencia por convección debido al viento que corre sobre la cubierta superior y a la radiación entre esta cubierta y el cielo, definida por la ecuación 2.2-10.

La resistencia R_2 por la conducción de calor es:

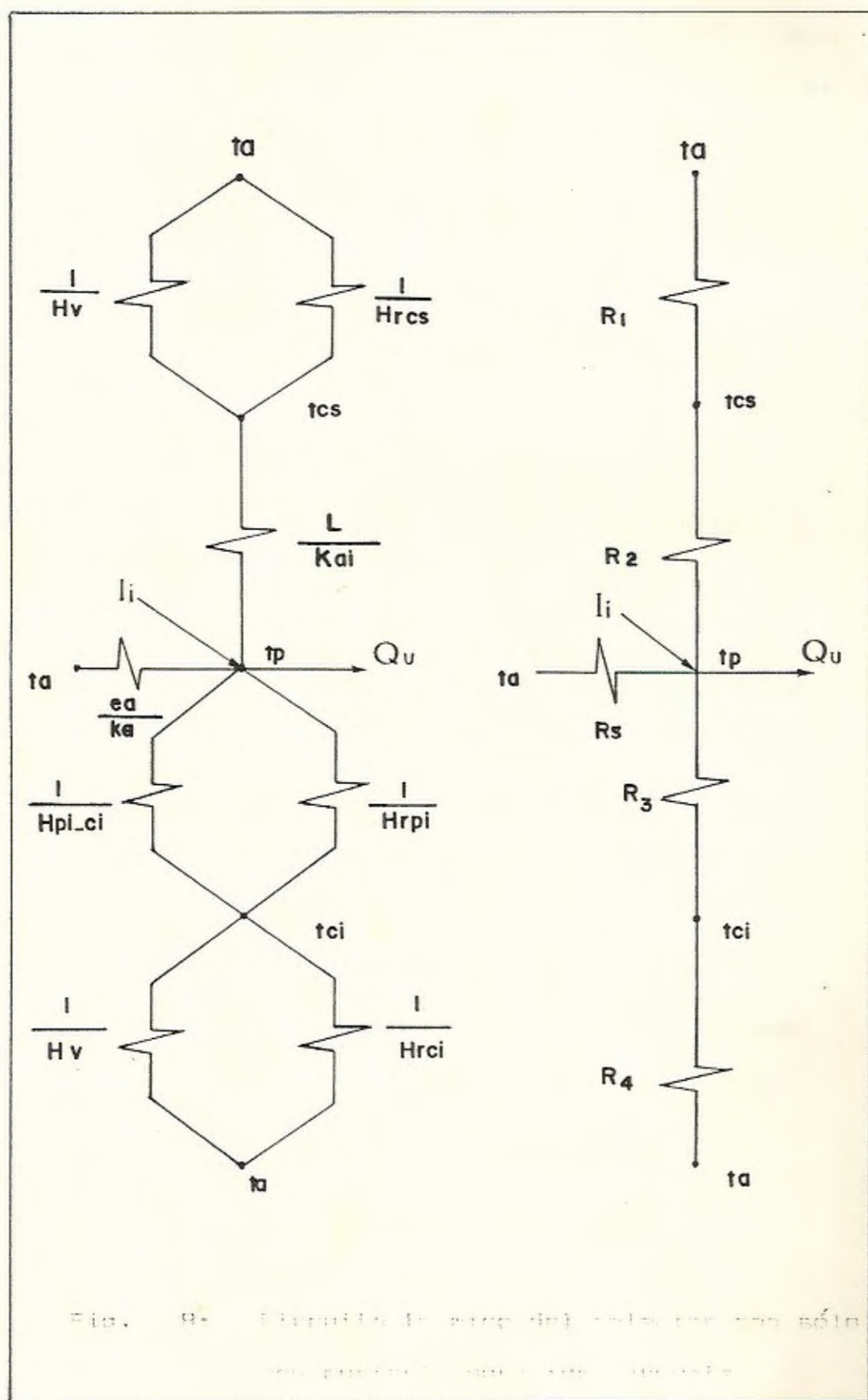
$$R_2 = K_a/L \quad (2.2-21)$$

K_a : conductividad del aire a 50°C

La transmitancia U_1 queda expresada como:

$$U_1 = 1/(R_1 + R_2)$$

$$U_1 = \left[\frac{K_a}{L} + \frac{1}{H_v + H_{rcs}} \right]^{-1} \quad (2.2-22)$$



Las pérdidas por la parte inferior y por los costados son las mismas que en el caso anterior, por lo que el coeficiente global de transferencia de calor será:

$$U_{ai} = \left[\frac{K_a}{L} + \frac{1}{H_v + H_{rcs}} \right]^{-1} + \frac{k_a A_l}{e_a A_a} + \left[\frac{1}{H_{pi-ci} + H_{rpi}} + \frac{1}{H_v + H_{rpi}} \right]^{-1} \quad (2.2-23)$$

2.3 CALCULO DE LA EFICIENCIA.

2.3.1 CAPTANDO ENERGIA POR AMBAS CUBIERTAS.

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

$$\eta = \frac{\text{Calor ganado por el agua}}{\text{Radiación solar} \times \text{Area del Absorbedor}}$$

El calor ganado por el agua, a su vez, está definido por la expresión:

$$Q_u = m c_p (t_s - t_e)$$

De las ecuaciones 2.2-2 y 2.2-3 tenemos que:

$$Q_u = \alpha \tau (I + I_r) A_a - U_a (t_n - t_a) A_a$$

Por lo que la eficiencia del colector funcionando con ambas cubiertas es:

$$\eta = \frac{\alpha \tau (I + I_r) - U_a (t_n - t_a)}{I + I_r} \quad (2.3-1)$$

2.3.2 CAPTANDO ENERGIA POR SU CUBIERTA INFERIOR.

De igual manera, la eficiencia del colector trabajando solamente con la cubierta inferior, por similitud, se expresa como:

$$\eta = \frac{\alpha_r I_r - U_{ai}(t_{ni} - t_a)}{I_r} \quad (2.3-2)$$

CAPITULO 3

PARTE EXPERIMENTAL

3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS.

Para la realización de las diferentes pruebas se colocaron termocuplas en lugares predeterminados. Se fijaron termocuplas para medir la temperatura del agua a la entrada y a la salida del colector, la temperatura de las caras superior e inferior de la superficie absorbadora, la temperatura de las cubiertas de vidrio superior e inferior y la temperatura media del agua del tanque de almacenamiento.

Estas temperaturas fueron medidas con un termómetro digital de ocho canales, con el cual, además se midió la temperatura del aire ambiente. * Los valores de radiación directa total y de radiación reflejada se los obtuvo con un radiómetro de fotocelda y la velocidad del viento de la estación meteorológica, equipos pertenecientes al laboratorio de energía solar de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL.

El tanque de almacenamiento fue abastecido con agua potable y operó a una capacidad aproximada de 100 litros. Cabe indicar que el llenado del tanque y su

reabastecimiento fue muy demorado debido principalmente a la falta de presión en la tubería de conducción del agua, por lo que en casi todas las ocasiones estas operaciones duraron 3 y hasta 4 horas.

Las mediciones de temperaturas se tomaron cada diez minutos, por lo que se dispuso de seis datos para obtener los promedios de cada hora para sendas temperaturas.

Las pruebas comenzaron a partir de las 10h00 y terminaron a las 16h00, considerando que en ese lapso se obtiene en la superficie terrestre alrededor del 90% de la radiación solar diaria. Se procuró realizar las pruebas para diferentes condiciones atmosféricas, esto es, en días soleados, semisoleados y nublados.

Al colector solar se le dio una inclinación de 20° con respecto a la horizontal orientándolo hacia el norte, puesto que esa es la posición más idónea para los colectores solares planos ubicados en la ciudad de Guayaquil.

Las pruebas experimentales fueron de dos tipos: primeramente se operó el colector con ambas superficies de vidrio descubiertas para que exista la doble captación de energía solar incidente. Después se procedió a cubrir la cubierta superior de captación con un material opaco a la radiación solar,

para así trabajar solamente con la cubierta inferior de captación. Como material opaco se utilizó hojas de papel periódico, en función a su poca transmisividad y a que por su espesor no almacena calor.

Estos dos tipos de pruebas lo que persiguen es la comparación del funcionamiento del colector en esas dos maneras de operación en sendos días con características solares similares, para poder evaluar el beneficio neto que representa la adición de una segunda superficie captadora, como es la cubierta inferior de vidrio, en las condiciones particulares de operación, que se las puede calificar de desfavorables.

Los parámetros característicos del colector solar de doble captación son los siguientes:

ABSORBEDOR

Area : 2.05 m²

α : 0.95

τ : 0.90

CUBIERTAS TRANSPARENTES

α : 0.88

τ : 0.88

AISLAMIENTO

k_a : 0.038 W/m°C

Espesor lateral e_a : 20 mm

Distancia absorbedor - cubierta superior : 70 mm

Distancia absorbedor - cubierta inferior : 70 mm

Area lateral : 0.85 m²

Constante de Stefan-Boltzman $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m²°k

Las tablas de datos experimentales van del número I al VI y la simbología utilizada es la siguiente:

T_{ps} : Temperatura de la cara superior del absorbedor
(°C)

T_{pi} : Temperatura de la cara inferior del absorbedor
(°C)

T_{cs} : Temperatura de la cubierta superior de vidrio
(°C)

T_{ci} : Temperatura de la cubierta inferior de vidrio
(°C)

T_e : Temperatura del agua a la entrada del colector
(°C)

T_s : Temperatura del agua a la salida del colector
(°C)

T_m : Temperatura media del agua en el tanque (°C)

T_a : Temperatura del aire ambiente (°C)

I : Radiación solar total incidente (W/m²)

I_r : Radiación solar reflejada que llega a la
cubierta inferior de vidrio (W/m²)

V : Velocidad del viento (m/seg)

HORA	Ta	Tps	Tpi	Tcs	Tci	Te	Tm	Ts	I	Ir	v
10-11	23.40	59.00	55.60	39.60	32.60	30.80	29.40	36.20	662.10	78.80	1.72
11-12	23.80	58.60	58.20	40.20	32.00	27.40	29.40	29.40	670.00	75.70	1.70
12-13	23.30	51.30	48.80	36.60	32.60	34.10	33.00	40.70	407.40	64.90	1.80
13-14	23.30	46.60	44.70	33.20	40.00	34.20	32.20	38.90	275.90	52.30	1.86
14-15	23.60	45.60	46.60	34.70	32.10	34.80	32.30	38.50	344.30	81.30	1.85
15-16	23.40	45.80	45.90	33.50	31.90	34.70	33.20	39.00	273.40	73.50	1.87
Promedio	23.47	51.15	49.63	36.30	33.53	32.67	31.58	37.12	438.85	71.08	1.77

TABLA I: PRUEBA 1 : COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

FECHA : 2 / AGOSTO / 89 DIA NUBLADO

HORA	Ta	Ips	Toi	Tes	Tci	Te	Tm	Ts	I	Ir	y
10-11	24.30	60.00	58.20	42.50	33.30	38.10	27.20	41.60	846.90	135.30	1.54
11-12	25.70	71.60	70.60	50.10	39.30	44.10	35.20	50.60	1072.00	157.70	1.67
12-13	25.60	65.50	64.80	46.90	40.00	48.30	41.00	52.30	804.00	139.40	1.28
13-14	24.90	75.30	75.40	50.10	42.60	54.40	47.80	58.70	683.30	336.40	2.78
14-15	26.00	71.00	72.10	46.00	41.10	56.80	50.90	60.00	832.40	145.70	1.98
15-16	27.40	67.00	67.70	43.80	40.10	53.30	30.60	57.50	646.40	111.60	2.78
Promedio	25.65	68.40	68.13	46.57	39.40	49.17	42.12	53.45	814.17	171.02	2.01

TABLA II: PRUEBA 2: COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

FECHA: 2 / AGOSTO / 89 DIA SEMI-SOLEADO

HORA	Ta	Tps	Tpi	Tca	Tci	Te	Tm	Ts	I	Ir	V
10-11	24.80	73.20	72.20	52.00	39.60	42.80	52.60	49.60	882.80	126.10	1.90
11-12	24.10	68.80	67.50	47.10	37.60	42.00	55.00	47.60	916.90	139.40	2.07
12-13	24.70	73.80	73.40	49.60	40.30	50.20	42.30	54.60	1046.40	160.20	2.08
13-14	24.90	75.30	75.40	50.10	42.60	54.40	47.80	58.70	980.60	157.70	2.78
14-15	26.00	71.00	72.10	46.00	41.10	56.80	50.90	60.00	831.80	157.70	1.98
15-16	27.40	67.00	67.70	43.80	40.10	53.30	50.60	57.50	654.20	122.20	2.78
Promedio	25.32	71.52	71.38	48.10	40.22	49.92	45.20	54.67	885.78	143.88	2.27

TABLA III: PRUEBA 3: COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

FECHA : 15 / AGOSTO / 89 DIA SOLEADO

HOPA	Ta	Tps	Tpt	Tcs	Tci	Te	Tm	Ts	I	Ir	V
10-11	26.20	34.80	33.80	33.80	28.80	30.80	31.40	32.20	567.50	126.10	1.33
11-12	24.70	37.10	35.60	36.30	30.70	32.10	39.90	33.90	640.00	150.40	1.14
12-13	26.00	38.00	36.90	36.90	32.20	34.40	35.70	35.40	773.10	124.50	2.00
13-14	24.20	45.10	42.80	44.50	37.20	37.70	43.20	44.30	964.80	151.30	2.00
14-15	25.20	44.80	43.30	42.70	38.40	40.00	41.70	41.50	743.50	123.60	1.11
15-16	25.70	44.40	43.20	40.60	37.90	40.80	40.00	41.90	640.10	116.70	1.00
Promedio	25.33	40.70	39.27	39.13	34.20	35.97	38.65	38.20	721.50	132.10	1.43

TABLA IV : PRUEBA 4 : COLECTOR CON SOLO SU CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

FECHA : 16 / AGOSTO / 89 DIA SOLEADO

HORA	Ta	Tps	Tpi	Tcs	Tci	Te	Tm	Ts	I	Ir	v
10-11	22.20	30.60	30.40	28.80	27.00	28.40	26.60	29.20	409.90	78.80	1.50
11-12	25.90	31.50	31.20	29.90	27.70	28.70	27.20	30.10	470.40	92.40	1.33
12-13	24.70	36.60	35.50	34.30	30.90	31.70	28.70	35.70	702.20	139.40	1.50
13-14	24.60	40.40	39.00	39.30	34.10	35.30	30.70	37.10	985.30	186.90	1.35
14-15	26.70	41.60	40.60	39.30	35.50	37.60	33.60	39.30	848.80	153.60	1.20
15-16	28.10	42.20	41.80	39.00	35.80	38.60	35.20	40.00	680.40	126.10	1.72
Promedio	25.03	37.15	36.38	35.10	31.83	33.38	30.33	34.90	682.83	129.53	1.62

TABLA V : PRUEBA 5 : COLECTOR CON SOLO SU CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

FECHA : 17 / AGOSTO / 89

DIA NUBLADO

HORA	Ta	Tps	Tpi	Tcs	Tci	Te	Tm	Ts	I	Ir	V
10-11	23.60	37.80	36.60	34.20	29.00	33.40	29.80	34.80	662.10	110.40	1.46
11-12	24.00	40.30	39.70	36.70	30.80	35.80	31.20	36.40	804.00	130.50	1.98
12-13	23.70	45.10	44.20	43.00	34.70	37.00	33.20	40.00	1081.50	169.30	1.74
13-14	24.30	44.10	43.40	42.70	36.50	39.60	35.70	41.40	829.20	137.80	2.78
14-15	24.50	42.60	42.30	40.00	36.30	39.80	37.10	41.40	656.80	124.50	1.74
15-16	26.70	43.10	42.90	39.50	37.10	39.80	38.20	41.60	630.60	117.30	1.94
Promedio	24.47	42.17	41.52	39.35	34.07	37.23	34.20	39.27	777.37	131.63	1.87

TABLA VI : PRUEBA 6 : COLECTOR CON SOLO SU CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

FECHA : 23 / AGOSTO / 89 DIA SEMI-NUBLADO

De las tablas VII a la XII se encuentran anotados los cálculos pertinentes para el colector solar de doble captación, usando la siguiente simbología:

- Hps-cs : Coeficiente de convección del absorbedor a la cubierta superior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Hrps : Coeficiente de radiación del absorbedor a la cubierta superior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Hv : Coeficiente de convección debido al viento ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Hrcs : Coeficiente de radiación de la cubierta superior al ambiente ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Hpi-ci : Coeficiente de convección del absorbedor a la cubierta inferior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Hrpi : Coeficiente de radiación del absorbedor a la cubierta inferior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Hrci : Coeficiente de radiación de la cubierta inferior al ambiente ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- U1 : Coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- U2 : Coeficiente de pérdidas por la parte inferior del colector ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- U3 : Coeficiente de pérdidas laterales ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Ua : Coeficiente de pérdidas totales del colector con ambas cubiertas de captación expuestas ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Uai : Coeficiente de pérdidas totales del colector

con sólo su cubierta inferior de captación
expuesta ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Q_u/A_a : Ganancia energética por unidad de area
(W/m^2)

Q_{pa}/A_a : Pérdidas de energía por unidad de area del
absorbedor (W/m^2)

$\%n$: Eficiencia de captación del colector (%)

HOPA	Hps-es	Hros	Hv	Hros	Hpi-ci	Hrpi	Hrci	U1	U2	U3	Ua	Qu / Aa	Qpa / Aa	%n
10-11	2.33	6.09	7.96	5.64	2.48	5.80	5.44	5.20	5.12	0.79	11.12	242.42	376.97	32.72
11-12	2.30	6.09	7.90	5.67	2.58	5.86	5.43	5.18	5.17	0.79	11.14	277.96	385.44	31.91
12-13	2.16	5.79	8.20	5.55	2.24	5.62	5.44	5.04	4.97	0.79	10.82	105.40	289.44	30.77
13-14	2.12	5.57	8.38	5.46	1.52	5.70	5.65	4.94	4.77	0.79	10.50	93.53	234.67	28.50
14-15	1.98	5.58	8.35	5.51	2.17	5.54	5.43	4.89	4.94	0.79	10.62	116.85	238.95	27.46
15-16	2.06	5.56	7.81	5.47	2.16	5.46	5.46	4.84	4.83	0.79	10.47	65.42	224.53	18.86
Promedio	2.16	5.78	8.10	5.55	2.19	5.66	5.48	5.02	4.97	0.79	10.78	150.26	291.53	28.37

TABLA VII : PRUEBA 1 : COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

FECHA : 2 / AGOSTO / 89 DIA NUBLADO

HORA	Hps-ns	Hrs	Hv	Hrcs	Hpi-ci	Hrpi	Hrci	U1	U2	U3	Ua	Qu / Aa	Qps / Aa	%n
10-11	2.25	6.20	7.42	5.75	2.53	5.90	5.49	5.15	5.19	0.79	11.13	433.80	387.32	44.17
11-12	2.35	6.77	7.81	6.00	2.67	6.43	5.69	5.49	5.44	0.79	11.72	495.93	532.10	40.33
12-13	2.27	6.49	6.64	5.91	2.50	6.27	5.71	5.16	5.13	0.79	11.08	350.47	438.21	37.11
13-14	2.25	6.45	6.64	5.88	2.65	6.29	5.72	5.13	5.19	0.79	11.11	291.97	560.50	28.63
14-15	2.30	6.94	7.00	6.16	2.55	6.72	5.34	5.45	5.30	0.79	11.52	295.53	524.16	30.00
15-16	2.30	6.94	6.55	5.99	2.48	6.53	5.34	5.32	5.22	0.79	11.33	180.49	453.20	23.81
Promedio	2.29	6.63	7.01	5.95	2.56	6.36	5.73	5.29	5.25	0.79	11.32	341.03	482.58	34.01

TABLA VIII : PRUEBA 2 : COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS
FECHA: 3 / AGOSTO / 8 DIA SEMI-NUBLADO

HORA	Hps-cs	Hrcs	Hv	Hrcs	Hpi-ci	Hrpi	Hrci	U1	U2	U3	Ua	Qu / Aa	Qpa / Aa	%n
10-11	2.33	6.88	9.01	6.04	2.70	6.48	5.68	5.71	5.65	0.79	12.15	261.46	581.98	25.91
11-12	2.37	6.60	9.04	5.87	2.65	6.29	5.60	5.60	5.55	0.79	11.94	357.11	525.96	33.81
12-13	2.44	6.83	11.14	5.96	2.70	6.48	5.69	6.01	5.94	0.79	12.74	387.40	622.89	32.06
13-14	2.46	6.89	8.74	5.98	2.69	6.47	5.75	5.72	5.61	0.79	12.12	340.17	611.45	29.86
14-15	2.48	6.63	7.00	5.85	2.66	6.52	5.76	5.33	5.34	0.79	11.46	304.64	522.58	39.24
15-16	2.43	6.45	6.55	5.90	2.58	5.86	5.76	5.18	5.01	0.79	10.98	210.97	438.10	27.17
Promedio	2.42	6.71	8.58	5.93	2.66	6.35	5.71	5.59	5.52	0.79	11.90	310.29	550.51	31.35

TABLA IX : PRUEBA 3 : COLECTOR CON SUS DOS CUBIERTAS EXPUESTAS

FECHA : 15 / AGOSTO / 89 DIA SOLEADO

HORA	Hv	Hrcs	Hpi-ci	Hrpi	Hrci	U1	U2	U3	Uai	Qu / Aa	Qpa / Aa	%n
10-11	6.79	5.56	1.58	5.12	5.41	3.88	4.32	0.79	8.99	50.09	55.33	39.72
11-12	6.22	5.41	1.57	5.31	5.42	2.11	4.32	0.79	7.23	46.94	78.79	31.21
12-13	7.81	5.65	1.54	5.29	5.50	2.17	4.51	0.79	7.47	22.69	81.39	18.25
13-14	8.80	5.80	1.61	5.57	5.59	2.20	4.79	0.79	7.78	18.22	144.70	12.04
14-15	6.13	5.78	1.55	5.62	5.65	2.13	4.46	0.79	7.38	30.20	133.53	24.43
15-16	5.80	5.73	1.53	5.60	5.59	2.11	4.40	0.79	7.30	30.25	127.81	21.92
Promedio	6.93	5.65	1.57	5.42	5.53	2.43	4.47	0.79	7.69	33.07	103.59	24.59

TABLA X : PRUEBA 4 : COLECTOR CON SOLO SU CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

FECHA : 16 / AGOSTO / 89

DIA SOLEADO

HORA	Hv	Hrcs	Hpi-ci	Hrpi	Hrci	U1	U2	U3	Uai	Qu / Aa	Qpa / Aa	%n
10-11	7.30	5.31	1.46	5.00	5.26	2.15	4.27	0.79	7.20	6.79	59.09	8.65
11-12	6.79	5.38	1.42	5.03	5.32	2.15	4.27	0.79	7.20	24.64	52.60	26.67
12-13	7.30	5.53	1.52	5.21	5.43	2.16	4.40	0.79	7.35	38.60	77.94	27.70
13-14	8.35	5.63	1.56	5.39	5.51	2.19	4.63	0.79	7.61	46.66	109.57	24.97
14-15	8.20	5.63	1.57	5.47	5.61	2.18	4.66	0.79	7.63	23.84	104.57	15.52
15-16	8.02	5.75	1.65	5.51	5.66	2.18	4.70	0.79	7.67	34.00	105.08	26.98
Promedio	7.66	5.54	1.53	5.27	5.47	2.17	4.49	0.79	7.44	29.09	84.31	21.75

TABLA XI : PRUEBA 5 : COLECTOR CON SOLO SU CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

FECHA : 17 / AGOSTO / 89

DIA NUBLADO

HORA	Hv	Hrcs	Hpi -ci	Hrpi	Hrci	U1	U2	U3	Uai	Qu / Aa	Qpa / Aa	%n
10-11	7.18	5.49	1.80	5.20	5.35	2.15	4.49	0.79	7.43	4.29	96.59	3.89
11-12	8.74	5.57	1.88	5.49	5.51	2.19	4.86	0.79	7.84	13.95	123.05	10.69
12-13	8.02	5.74	1.90	5.55	5.51	2.18	4.80	0.79	7.77	17.75	159.28	10.48
13-14	11.14	5.75	1.72	5.57	5.57	2.25	5.07	0.79	8.11	15.98	98.94	11.60
14-15	8.02	5.68	1.65	5.54	5.58	2.18	4.70	0.79	7.67	13.33	90.51	10.70
15-16	7.42	5.73	1.63	5.52	5.66	2.16	4.62	0.79	7.57	19.33	78.73	16.48
Promedio	8.42	5.66	1.76	5.48	5.53	2.19	4.76	0.79	7.73	14.11	107.85	10.64

TABLA XII : PRUEBA 6 : COLECTOR CON SOLO SU CUBIERTA INFERIOR EXPUESTA

FECHA : 23 / AGOSTO / 89 DIA SEMI-NUBLADO

3.2 VARIACION DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN EL COLECTOR.

De la figura 9 a la 13 se muestra la variación de la temperatura del agua tanto a la entrada, a la salida del colector y en el tanque de almacenamiento versus el tiempo de prueba para diferentes condiciones climáticas.

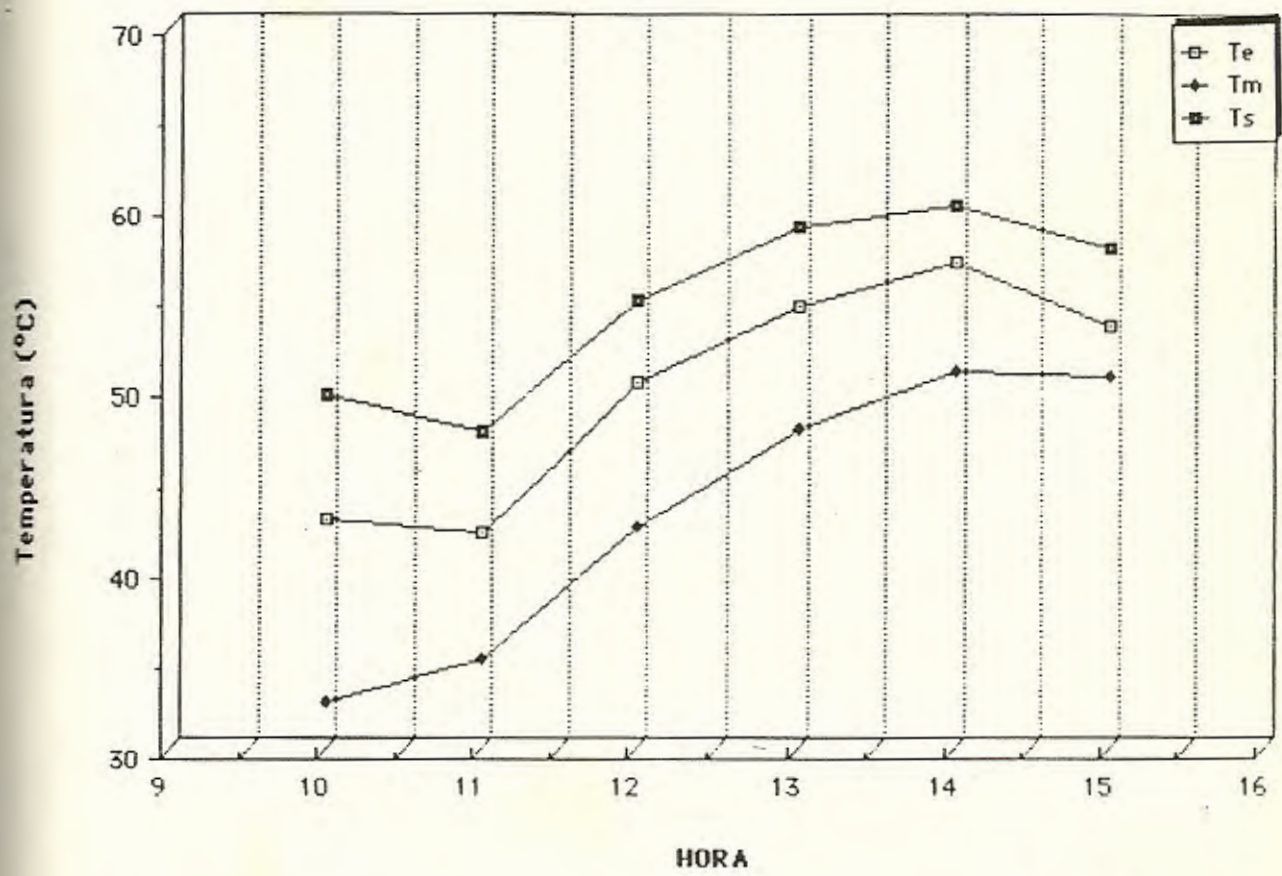


Fig. 9 : Variación de la temperatura del agua en el colector. Fecha: 15 / Agosto / 89 Día soleado.

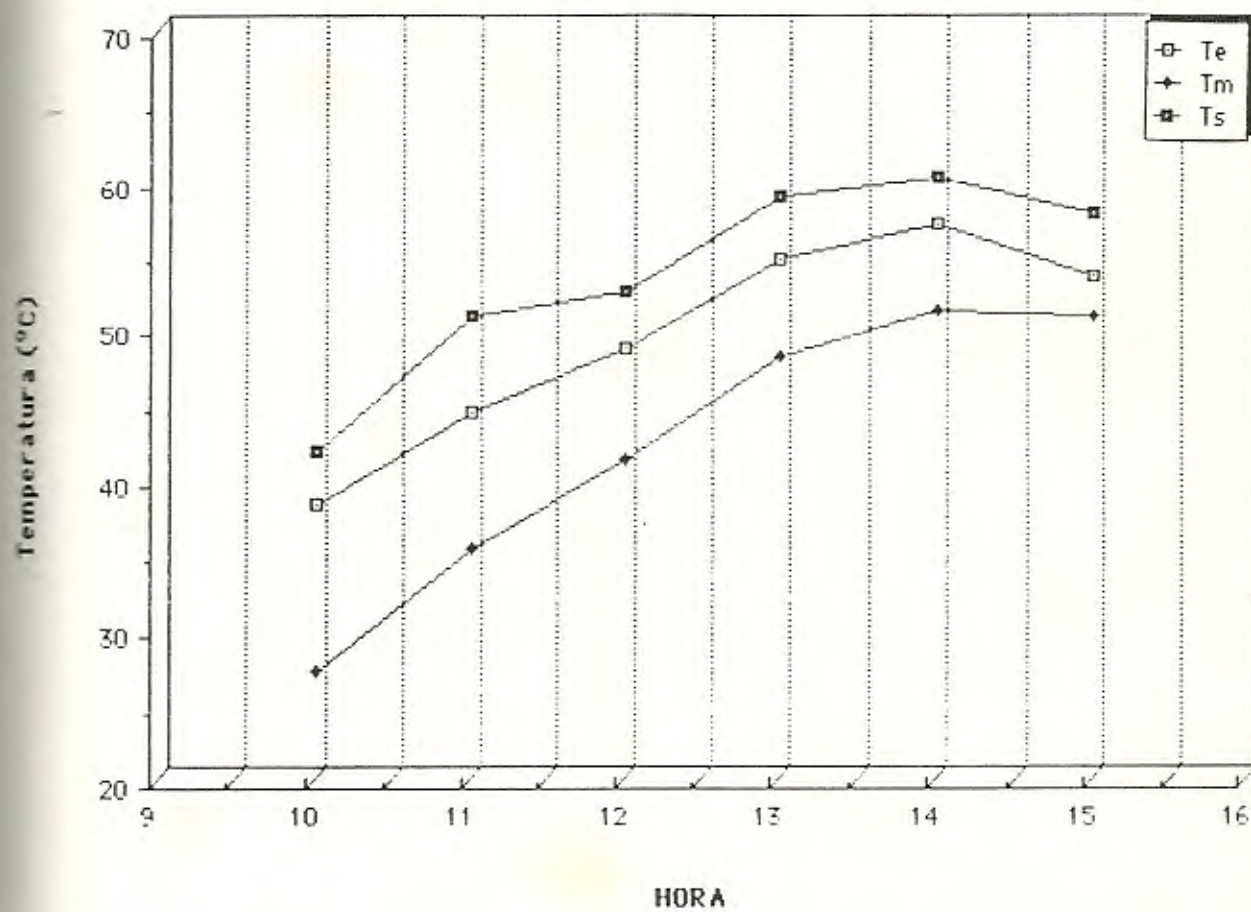


Fig. 10 : Variación de la temperatura del agua en el colector. Fecha : 3 / Agosto / 89 Dia semi-nublado.

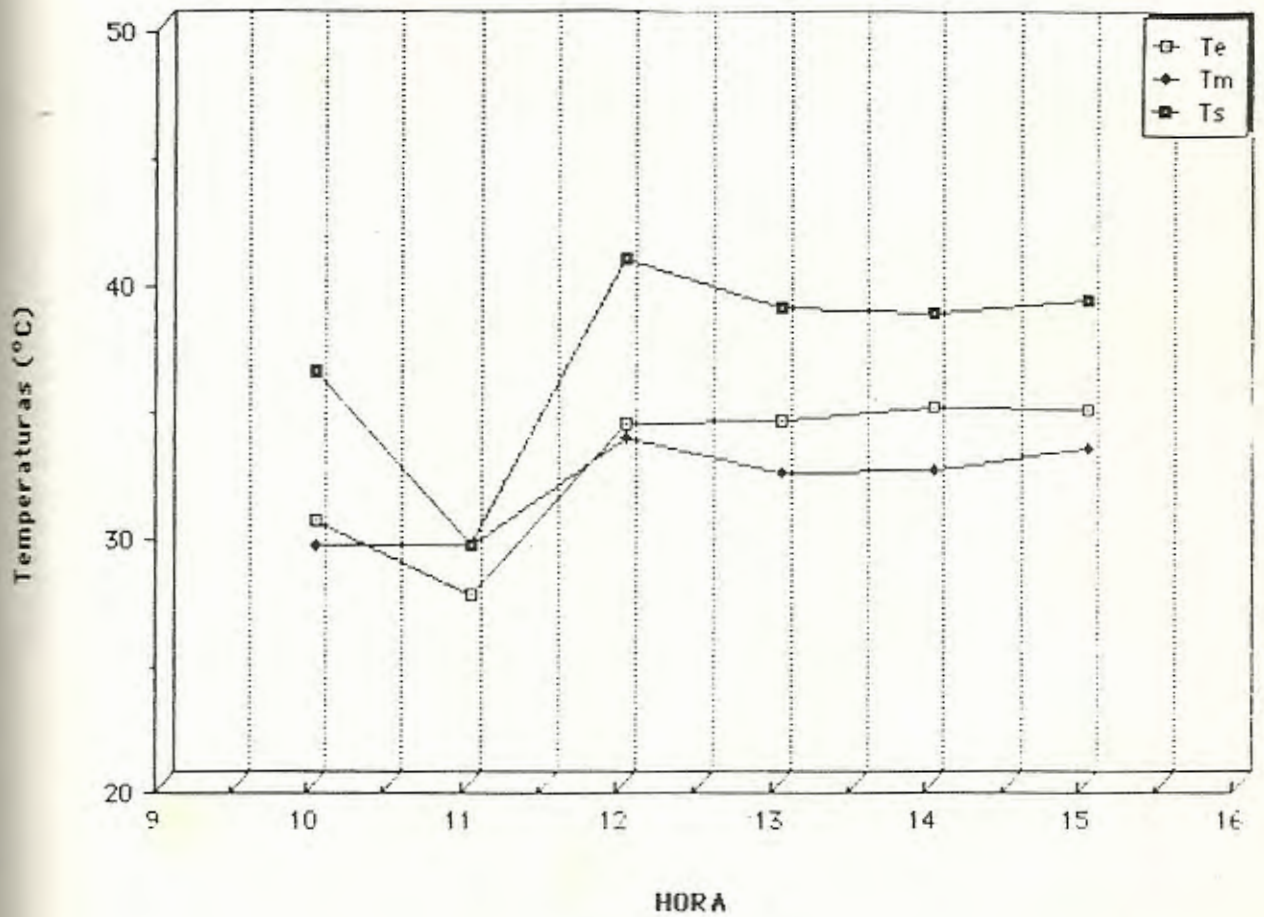


Fig. 11 : Variación de la temperatura del agua en el colector. Fecha : 2 / Agosto / 89 Dia nublado.

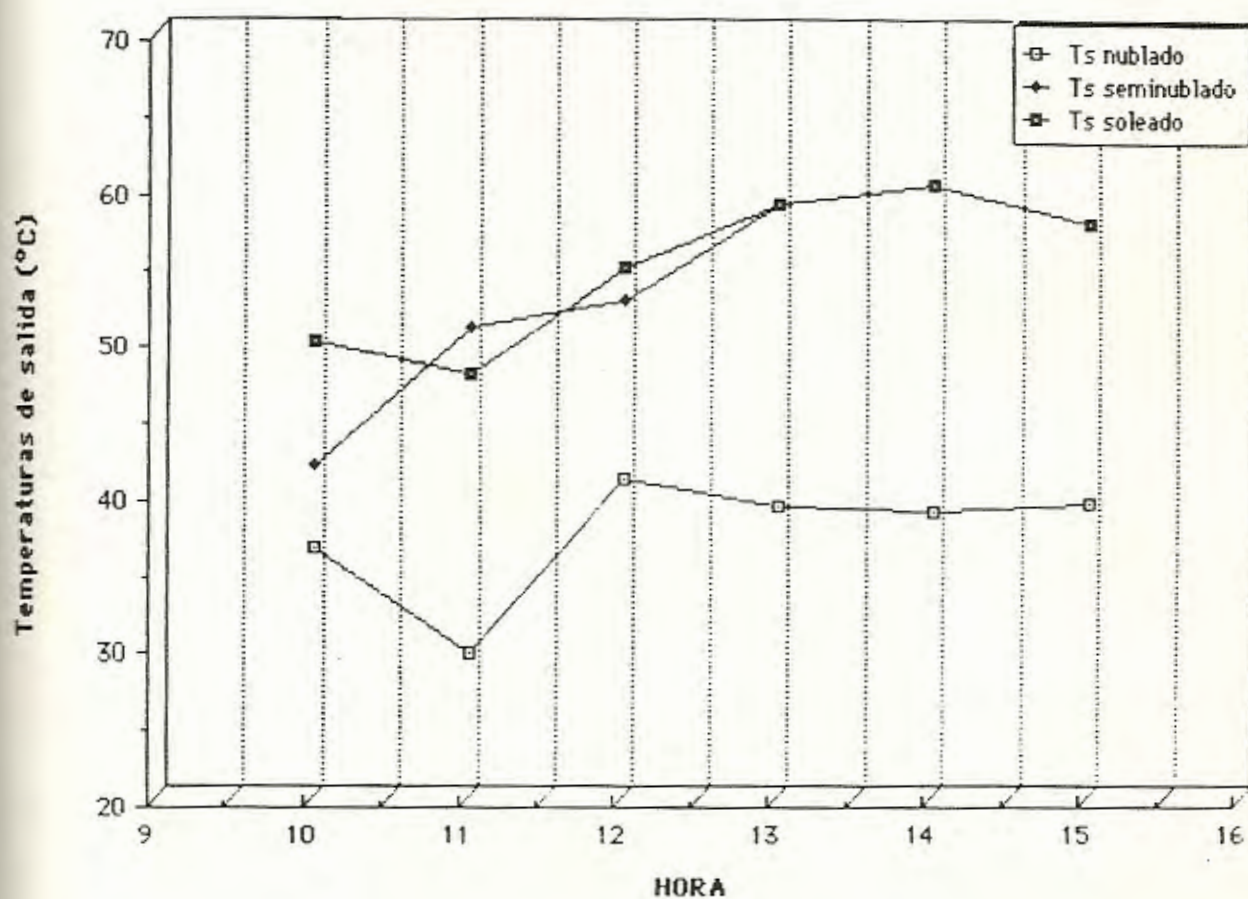


Fig. 12 : Temperatura de salida del agua del colector con sus dos cubiertas expuestas.

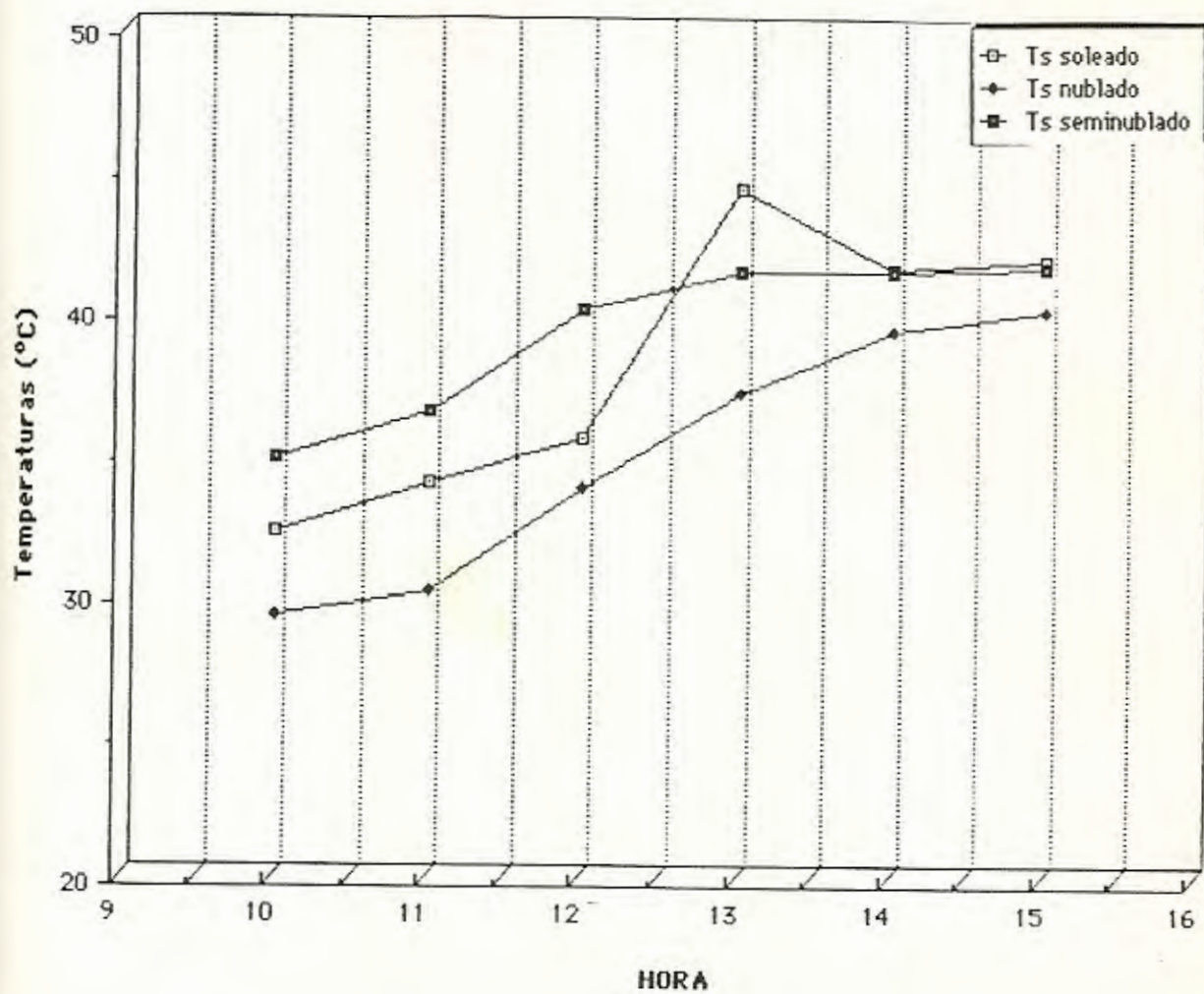


Fig. 13 : Variación de la temperatura de salida del agua del colector con sólo la cubierta inferior expuesta.

3.3 COMPARACION DE LA ENERGIA UTIL GANADA.

Las figuras 14 a 16 presentan los gráficos comparativos de la ganancia energética que se obtiene en el colector cuando se trabaja con ambas cubiertas de captación y con sólo la cubierta inferior de captación versus las horas de pruebas en días soleados, semi-soleados y nublados.

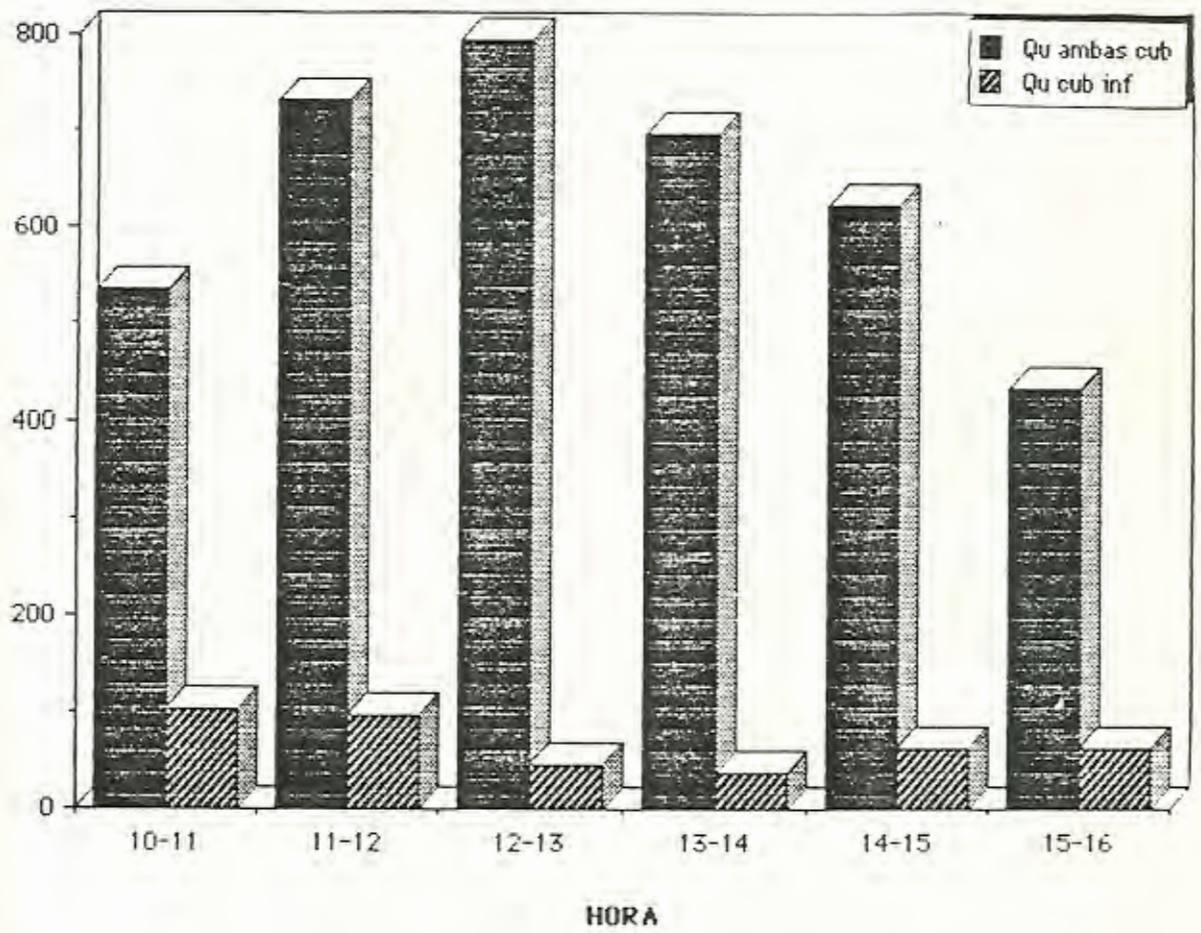


Fig. 14 : Energía útil ganada por el colector en un día soleado.

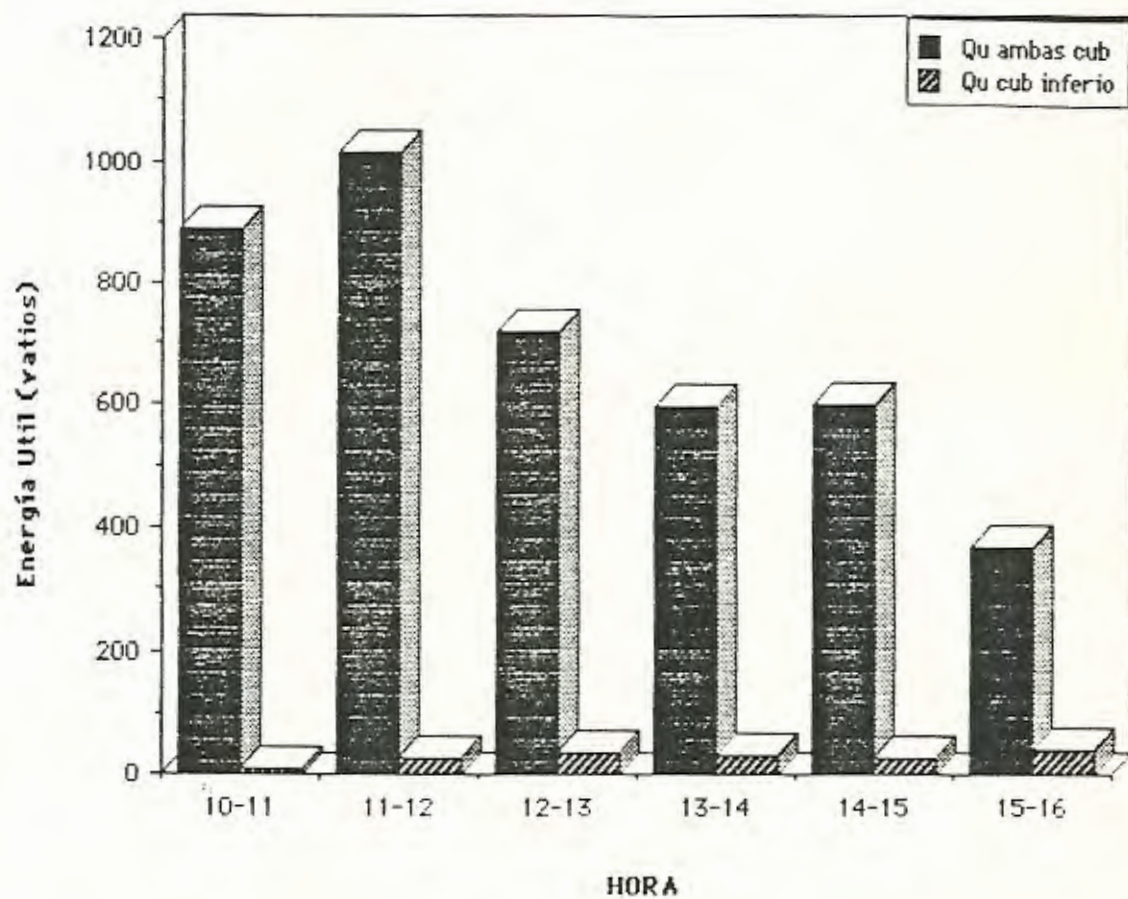


Fig. 15 : Energía útil ganada por el colector en un día semi-soleado.

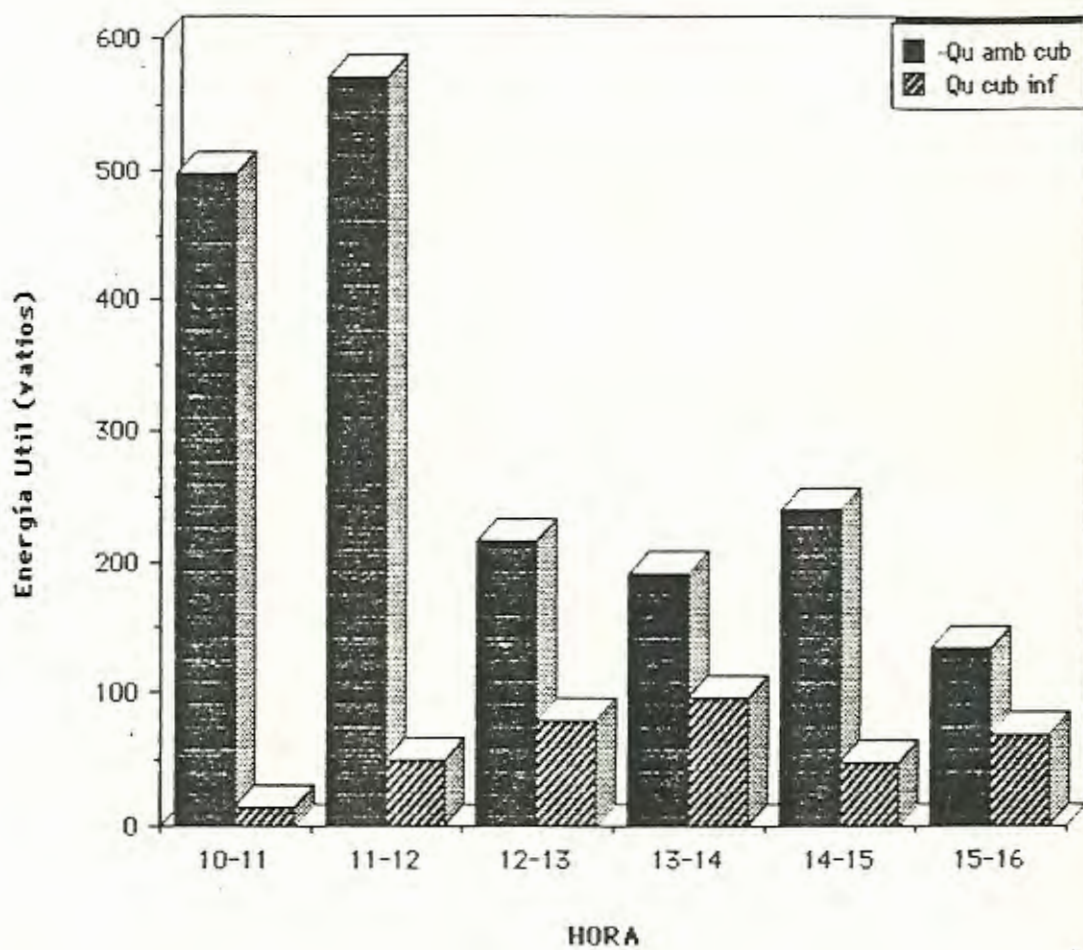


Fig. 16 : Energía útil ganada por el colector en un día nublado.

3.4 COMPARACION DE LAS PERDIDAS TERMICAS.

Para analizar comparativamente las pérdidas de energía que se obtienen en el colector versus el tiempo, expresado en horas de prueba, trabajando con sus dos cubiertas de captación y luego con su cubierta inferior de exposición, se muestran las figuras 17 a la 19.

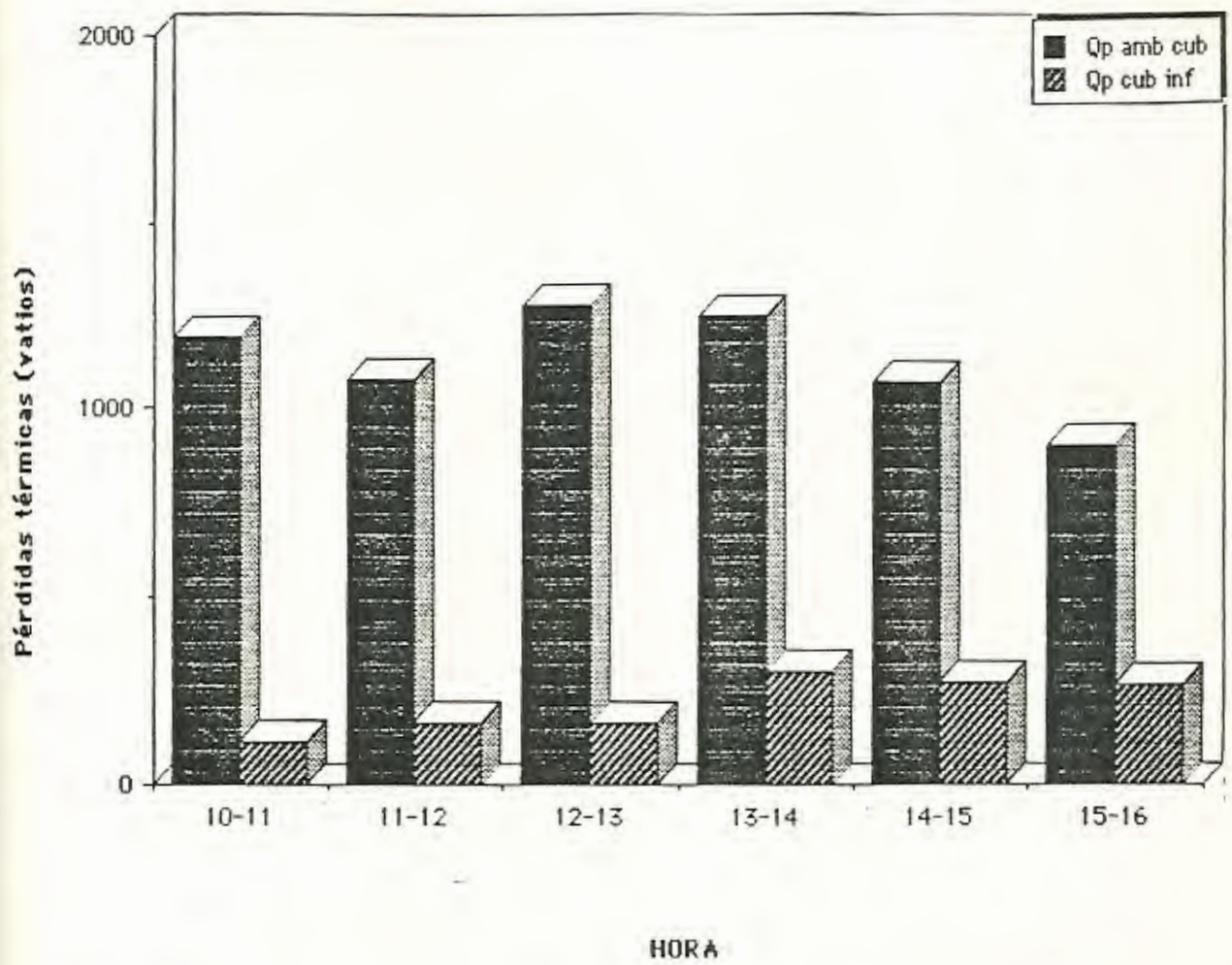


Fig. 17 : Pérdidas térmicas en el colector en un día soleado.

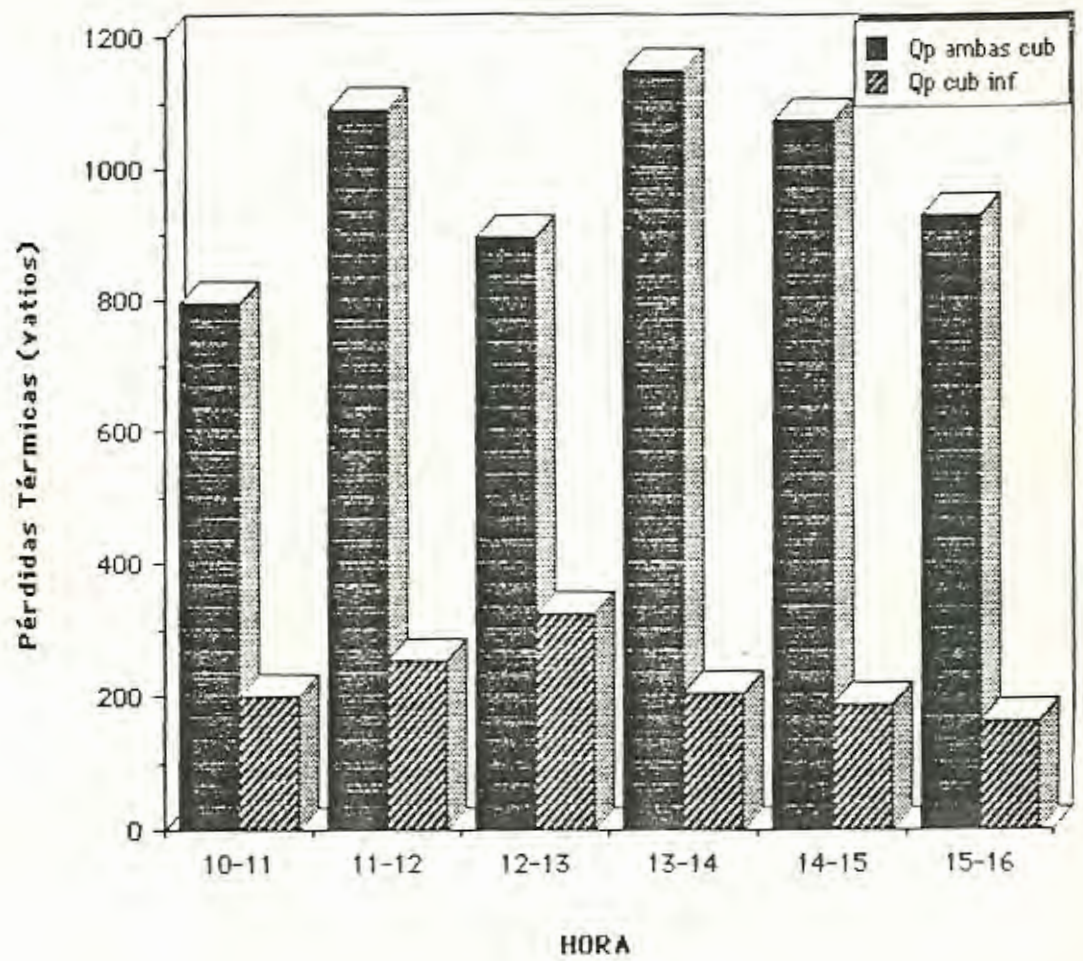


Fig. 18 : Pérdidas térmicas en el colector en un día semi-nublado.

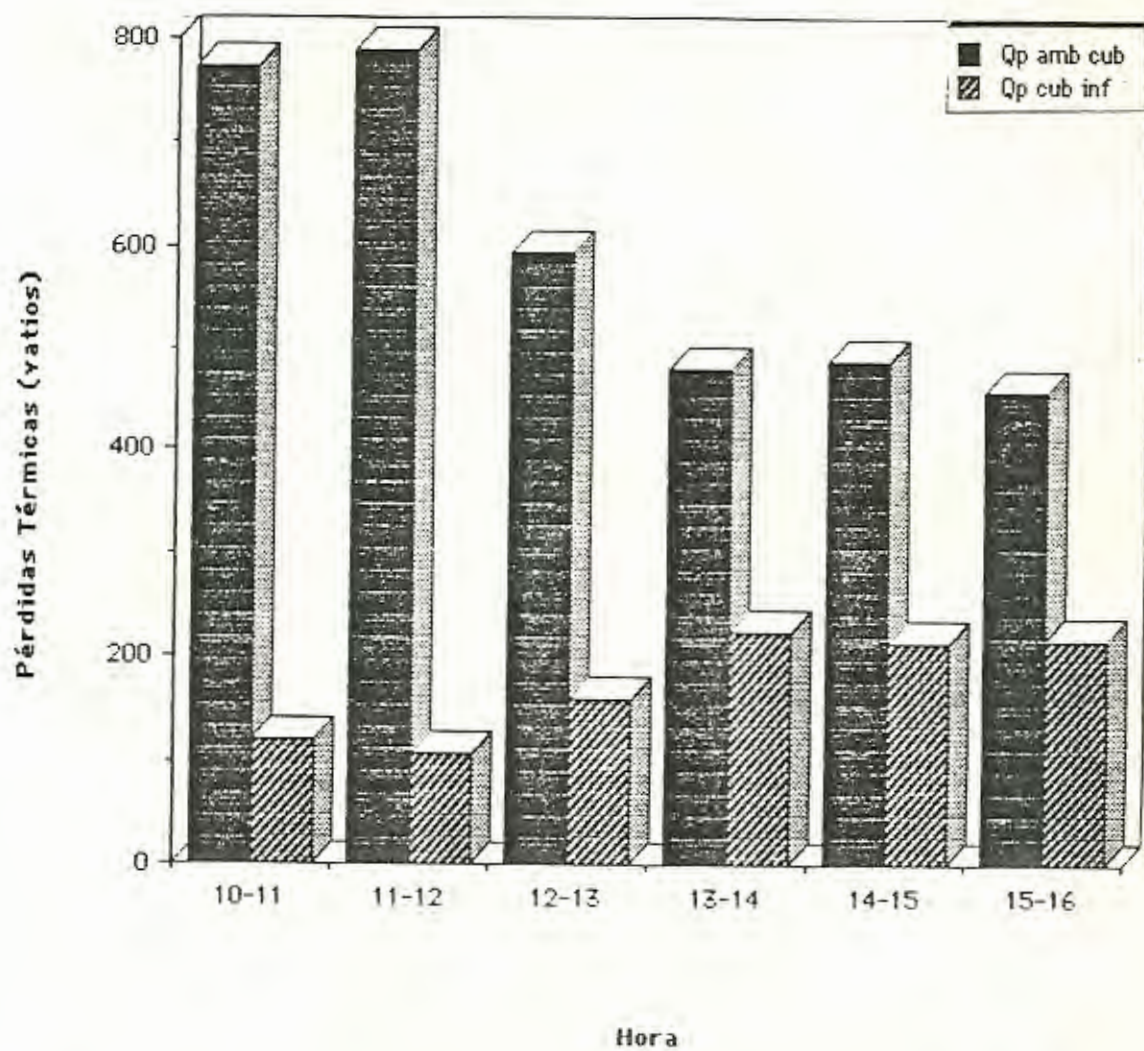


Fig. 19 : Pérdidas térmicas en el colector en un día nublado.

3.5 VARIACION DE LA EFICIENCIA DE CAPTACION.

El gráfico 20 muestra la variación de la eficiencia del colector con respecto al tiempo para cada hora de prueba en diferentes condiciones climáticas a saber, es decir, en días soleados, semi-soleados y nublados.

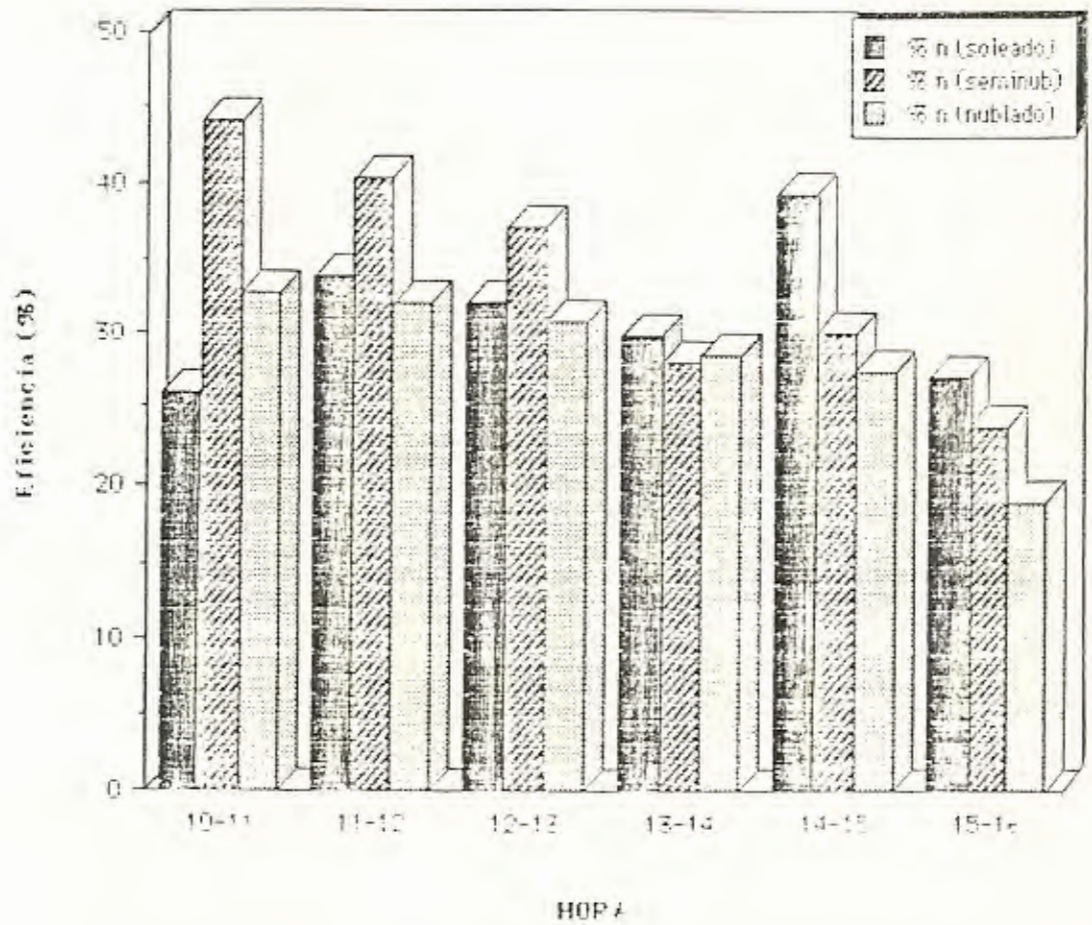


Fig. 20 : Eficiencias del colector con ambas cubiertas expuestas.

3.6 ANALISIS DE RESULTADOS.

Comparando los valores de los múltiples coeficientes de transferencia de calor obtenidos, se puede observar que el fenómeno que más incidencia tiene sobre las pérdidas térmicas es la radiación, tanto por la parte superior como inferior de la placa absorbadora, pues el colector al recibir energía por las dos superficies, alcanza mayores temperaturas y eso produce que emita o pierda más energía en el rango infrarrojo.

El coeficiente global de pérdidas térmicas del colector aumenta en proporción a la heliofania; es decir, se obtienen mayores pérdidas en un día soleado que en uno nublado, debido a que en días con sol se obtienen mayores temperaturas en el agua, aumentando por ende las pérdidas de calor.

Cuando se trabaja solamente con la cubierta inferior de captación, se reduce el coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector en un 50%, ya que no recepta energía solar por ese lado.

El coeficiente de pérdidas globales al trabajar con sólo la cubierta inferior disminuyó, en términos generales, en un 10%, porque al disminuir la recepción de energía solar se obtienen menores temperaturas del agua.

Las pérdidas laterales se mantuvieron en igual valor al no variar el espesor de aislamiento.

De las figuras 9 a 11 se puede observar que las mayores temperaturas se obtienen a partir del mediodía hasta las 14:00 horas, tendiendo a disminuir dichos valores en horas posteriores.

En un día nublado la máxima temperatura del agua a la salida del colector es de 40°C, que se obtienen al mediodía, existiendo una diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del agua del colector de 5°C a 7°C promedio. Estas bajas temperaturas se producen por la poca energía radiante difusa que se capta principalmente por la cubierta superior.

En un día semi-soleado, la temperatura de salida del agua máxima fue de 60°C, registrada a partir de las 14:00 horas, con una diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua de 4°C al mediodía y de 5°C al empezar y comenzar las pruebas. La mayor temperatura del agua en el tanque de almacenamiento fue de 51°C y, en general, era menor en aproximadamente 10°C a las respectivas temperaturas de salida del agua del colector, debido a las pérdidas de calor en las tuberías de conducción y en el tanque de almacenamiento.

En un día soleado se obtiene una temperatura máxima de salida del agua del colector de 60°C, con un gradiente de temperaturas casi constante entre la entrada y la salida del agua del colector de 5°C a 7°C al mediodía. Observando la figura 11 se nota claramente que todas las temperaturas

tienen la tendencia de ir aumentando hasta las 15:00 horas, lapso en el cual se receipta la mayor cantidad de energía. Se alcanzaron los 51°C en el agua del tanque de almacenamiento y, como en el caso de un día semi-soleado, esta temperatura fue menor en 10°C a 12°C a las sendas temperaturas del agua a la salida del colector, confirmando que las pérdidas térmicas a través de la tubería de conducción de agua, que es de PVC, son muy similares.

En todo caso, al observar la figura 12, se nota que tanto en días soleados como en días semi-nublados, la tendencia de la temperatura del agua a la salida del colector es semejante, cosa que no ocurre en días nublados, donde se obtienen valores bajos de temperaturas, de alrededor de 40°C del mediodía en adelante. Lo anterior se debe a que en periodos nublados la energía radiante que incide es de caracter difuso y es captada principalmente por la cara superior del absorbedor.

En las figuras 14 a 19 se grafican la energía útil y las pérdidas energéticas trabajando el colector con ambas cubiertas de captación y con sólo la cubierta inferior de captación versus el tiempo de prueba, tanto para días soleados, semi-soleados y nublados.

→ En un día soleado la cubierta inferior de captación aporta con el 11% aproximadamente de la energía total ganada. Esto es debido a que la cubierta inferior capta alrededor

del 13% de la energía total incidente, lo que confirma que un piso de concreto sin enlucir no es una buena superficie reflectora de la energía solar. En cambio, esta misma cubierta aporta con el 19% de las pérdidas globales, puesto que es una superficie sin aislar; además, las pérdidas por radiación al ambiente y las convectivas debido al viento son muy parecidas a las que se producen por la cubierta superior.

En un día soleado el colector, a medida que transcurre el tiempo, gana mayor cantidad de energía solar, alcanzando su valor máximo, de aproximadamente 400 W/m^2 entre las 13:00 y 14:00 horas, para luego decaer en la tarde. Las pérdidas térmicas fueron más regulares, notándose una tendencia a bajar en la tarde.

En un día semi-nublado se capta mayor energía en horas de la mañana, decayendo la absorción de energía por la tarde. Las pérdidas térmicas, como en el caso de un día soleado, presentan pequeñas variaciones de una hora a otra en la mañana, con una tendencia a ser menores en la tarde, al disminuir las temperaturas alcanzadas. En todo caso, por la cubierta inferior se capta un porcentaje muy bajo de la energía total ganada, aproximadamente un 4%, mientras que aporta con el 22% de las pérdidas totales, en razón de que al presentarse temporalmente nubosidades, el colector empieza a enfriarse entregando calor al ambiente, lo que no implica que el flujo de agua se invierta.

En periodos o días nublados se capta la menor cantidad de energía, en vista de los valores bajos de radiación solar incidente directa y reflejada alcanzados. Por la cubierta inferior se capta aproximadamente el 19% de la energía útil ganada, mientras que emite el 30% de las pérdidas globales.

Las eficiencias alcanzadas por el colector en diferentes periodos se grafican en la figura 20, notándose que en días soleados y semi-soleados son mayores a las obtenidas en periodos nublados en alrededor de 3% a 6%, en concordancia a la mayor cantidad de energía recibida.

La eficiencia promedio del colector es de 31%, valor que demuestra las bondades del equipo trabajando incluso en condiciones no tan favorables.

CAPITULO 4

ANALISIS ECONOMICO.

En este capítulo se presenta el análisis económico que justifique la inversión en el colector solar de placa plana de doble captación, funcionando bajo las condiciones ya descritas, para poder obtener un ahorro en el consumo eléctrico destinado al calentamiento de agua de uso doméstico.

Este análisis es referencial y fácil de entender, porque no toma en cuenta variaciones en las tasas de interés y en los precios de los elementos que constituyen el equipo.

En primer lugar, se estimará el costo de construcción del colector actualizando los precios.

ELEMENTO	PRECIO (SUCRES)
Colector	82438
Tanque de almacenamiento	25500
Pedestal y castillo	27670
Accesorios	13234
TOTAL	148342

El ahorro económico derivado de la utilización del colector lo definiremos como el ahorro anual A.A en sucres, que es el producto de la ganancia energética solar anual captada por el sistema y el valor del kilowatio-hora

(Kw-hr) eléctrico que se cobra actualmente por consumo eléctrico.

Para calcular la energía útil captada anualmente por el equipo se procede de la manera siguiente:

- a) Se obtiene la ganancia total energética durante los días de prueba en que el colector funcionó con sus dos superficies captadoras de energía radiante.
- b) Dividiendo el valor anterior para el número de días de prueba se tiene la ganancia promedio diaria en Kw.
- c) Multiplicando por el número de horas de prueba se obtiene los kilowatios-hora.
- d) multiplicando por 365 se calcula los Kw-hr de ganancia anual.

Por lo tanto:

Qu total	= 9.78 Kw	Potencia útil total
Qu diario	= 3.26 Kw	Potencia útil diaria
Qu diaria	= 19.56 Kw-hr	Energía útil diaria
Qu anual	= 7139.4 Kw-hr	Trabajo útil anual

El costo del kilowatio-hora eléctrico para consumo doméstico en vigencia es de 16 sucres, por lo que el ahorro anual será:

$$A.A = 114230.4 \text{ sucres}$$

Asumiendo que el equipo tenga una vida útil de 10 años, el costo de inversión se amortiza antes del segundo año de funcionamiento, lográndose un ahorro efectivo en los ocho años subsiguientes de 1'190736 sucres.

Otro tipo de análisis económico se obtiene comparando el el colector solar con un sistema convencional de calentamiento de agua como es un tanque eléctrico.

Para este análisis utilizaremos un tanque calentador de agua de las siguientes características:

Voltaje = 120 voltios

Amperaje = 12.5 amperios

Potencia = 1.5 Kw

Capacidad = 20 galones

Costo = 92972 sucres

Tomando en cuenta que este aparato funcione 4 horas diarias, la energía eléctrica consumida por día será:

$$E = P \times t$$

$$E = 1.5 \text{ Kw} \times 4 \text{ hr}$$

$$E = 6 \text{ Kw-hr}$$

En un año por consumo eléctrico para calentamiento de agua se gastarán:

Consumo = 6 Kw-hr x 16 sucres x 365 días

Consumo = 35040 sucres.

De acuerdo a las cifras anteriores, el colector solar comparándolo con un tanque calentador de agua, resulta conveniente a partir del segundo año de funcionamiento, puesto que de esa fecha en adelante se ahorraría 35040 sucres anualmente, o lo que es equivalente, 2920 sucres por mes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Realizados los dos tipos de pruebas propuestas y hechos los cálculos pertinentes, se está en capacidad de emitir las conclusiones y recomendaciones del caso.

CONCLUSIONES

- 1.- En la ciudad de Guayaquil es factible utilizar colectores solares de placa plana destinados al calentamiento de agua en vista del alto valor de radiación solar alcanzado, que promedialmente es de 4.32 Kw-hr/m² por día.
- 2.- El colector eleva la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento hasta los 51°C, en días soleados y semi-soleados y, en días nublados es del orden de 34°C por lo que convendría utilizar el equipo en aplicaciones que requieran bajas temperaturas, como por ejemplo, agua para ducharse.
- 3.- Como era lógico de suponer, el equipo gana más energía en días soleados y semi-soleados, puesto que se presentan mejores condiciones de radiación solar, por lo que aumenta la captación de energía incidente en la parte superior del absorbedor, como de la reflejada por el piso y captada en la parte inferior del mismo. En días nublados no ocurre lo mismo, ya que se recepta

aproximadamente la mitad de la energía incidente.

- 4.- El colector pierde mayor cantidad de energía cuando aumenta la heliofanía. Expresado en otras palabras, las pérdidas energéticas son mayores en días con sol que en periodos nublados.
- 5.- Analizando el comportamiento de la cubierta inferior de captación en el funcionamiento global del colector de doble exposición para las condiciones particulares de prueba, se puede indicar que aporta con el 11% de la energía total transferida al agua, en tanto que emite el 24% de las pérdidas totales.
- 6.- Dado el hecho que a través de la cubierta transparente inferior se pierde más del doble de la energía que gana cuando se trabaja sin las superficies reflectoras, es conveniente suprimirla, aislando térmicamente la parte inferior de la placa absorbedora, lo que equivale a utilizar un colector solar de placa plana convencional.
- 7.- Las eficiencias alcanzadas por el colector exponiendo sus dos cubiertas de captación, como lo muestra la figura 20, son mayores en periodos soleados que en días nublados, en alrededor de un 4%, lo que da una idea de la regularidad del funcionamiento del equipo, lográndose obtener una eficiencia promedio de 31%, indicando las bondades del colector aún trabajando en

condiciones desfavorables.

- 8.- Económicamente el proyecto es viable, porque el costo del colector se lo puede amortizar en menos de dos años de funcionamiento a partir de los cuales, el beneficio económico se acentúa.
- 9.- Es ventajoso utilizar la energía solar para el calentamiento de agua a nivel doméstico, ya que es un recurso abundante, inagotable, no contaminante, económico en su uso y aprovechable a costos competitivos con otras tecnologías, aunque presenta la desventaja de ser intermitente, por lo que a veces se necesita utilizar un sistema acumulador o almacenador de energía.

RECOMENDACIONES

- 1.- El equipo debe funcionar en un lugar amplio, como por ejemplo, la terraza, el patio o la cubierta de una vivienda, para evitar el sombreado sobre el colector.
- 2.- Utilizar en las cubiertas transparentes vidrio de buena calidad.
- 3.- Disminuir las pérdidas térmicas mejorando el aislamiento lateral y aislando térmicamente la parte

inferior del colector, que resulta más conveniente en términos de eficiencia y economía, que el de construir superficies reflectoras de planchas de acero inoxidable.

- 4.- Limpiar periódicamente las cubiertas transparentes del colector, para que no disminuya la recepción de energía.
- 4.- Mejorar el aislamiento térmico del tanque de almacenamiento y de las tuberías de conducción de agua del colector al tanque, para evitar que el agua que sale del colector se enfríe.
- 5.- Realizar futuras pruebas utilizando un equipo auxiliar de calentamiento colocado en el tanque de almacenamiento de agua que funcione cuando el recurso solar no sea suficiente o al aumentar la demanda de agua caliente.

A P E N D I C E



Fig. A1 : Fotografía del colector de doble captación.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- DUFFIE, John & BECKMAN, W. "Solar Engineering of Thermal Processes". Wiley, USA. 1980.
- 2.- INSTITUTO NACIONAL DE ENERGIA. "Primeras Jornadas de Energía Solar en el Ecuador". INE. 1984.
- 3.- LEON, Milton. "Diseño y Construcción de un Colector Solar de Placa Plana de Doble Exposición". Tesis, FIM, ESPOL, 1984.
- 4.- MORNING STAR. "MSC Series Collector Specifications". USA, 1981.
- 5.- SAYIGH, A.A.M. "Solar Energy Engineering". Academic Press. USA, 1977.
- 6.- THRELKELD, James. "Ingeniería del Ambito Térmico". Prentice Hall. España, 1977.
- 7.- WILLIAMS, J. Richard. "Solar Energy: Technology and Applications". Ann Arbor Science. USA, 1977.