

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIA**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE UN  
COLECTOR SOLAR PLANO DE AIRE.**

**HERNAN MANUEL RODRIGUEZ VALENCIA**

**Profesor Guía**

CARLOS BALOCCHI CARREÑO

**Propósito**

Trabajo de graduación presentado a la facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al grado de Ingeniero Físico.

Santiago-Chile

2012

**Derechos de autor.**

**Hernán Manuel Rodríguez Valencia**

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

# **DISEÑO, CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE UN COLECTOR SOLAR PLANO DE AIRE.**

**Hernán Manuel Rodríguez Valencia**

Este trabajo de graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Mg. Carlos Balocchi Carreño y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora de candidato; Dr. Ernesto Gramsch Labra, Mg. Oscar Pesse Lohr, Mg. Sergio Acevedo Grifero, Dr. Daniel Serafini SSA.

---

Miembro Comisión Calificadora

---

Miembro Comisión Calificadora

---

Miembro Comisión Calificadora

---

Miembro Comisión Calificadora

---

Miembro Comisión Calificadora

---

Directora Departamento de Física

En objetivo del siguiente trabajo fue fabricar un colector solar plano de aire con un bajo costo, generado a partir de materiales accesibles en el mercado nacional. El estándar internacional indica que cada colector debe tener una eficiencia determinada de acuerdo a condiciones en estado cuasi estacionario, este estado de evaluación de colectores es difícil de alcanzar en la realidad. Solo se logran condiciones acabadas de laboratorio, pero no reflejan el verdadero espectro de radiación solar diaria y las condiciones ambientales a las que se somete un colector solar.

Se realizan mediciones dentro del rango de 1 hora antes y una hora después del medio día solar solo en días despejados, para poner de manifiesto el estado cuasi estacionario de medición y evaluación del colector solar de aire. Manteniendo la inclinación del colector en un ángulo complementario a la elevación solar, es decir; los rayos solares deben incidir perpendiculares a la superficie del colector, y de esa manera tener mayor

Dentro de los resultados obtenidos, se logran eficiencias diarias, en el mejor de los casos experimentados, del orden del 46% con temperaturas de salida del colector del orden de los 60°C. Sin dejar de lado que la premisa de la investigación, es entregar las características esenciales del colector utilizando los diferentes puntos de vistas para la evaluación de colectores solares planos de aire investigados en el estado del arte, que para este caso permite aplicaciones de secado, teniendo un colector fácil de construir y de utilizar.

## TABLA DE CONTENIDOS

i

---

<b>Tabla de contenidos.....</b>	<b>i</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>ii</b>
<b>Capítulo I. Introducción y motivación.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción: panoramas, usos y aplicaciones en energía solar	1
1.2 Motivación.....	9
1.3 Objetivos general y específicos.....	11
<b>Capítulo II. Fundamentos teóricos.....</b>	<b>12</b>
2.1 Transferencia de calor.....	12
2.2 Radiación solar.....	15
2.3 Parámetros y técnicas de caracterización del recurso solar.....	26
<b>Capítulo III. Colectores solares planos.....</b>	<b>32</b>
3.1 Materiales.....	32
3.2 Ecuación de balance energético y rendimiento.....	42
3.3 Requerimientos estandarizados.....	45
<b>Capítulo IV. Diseño y construcción del colector solar.....</b>	<b>50</b>
4.1 Procedimiento de construcción.....	50
4.2 Metodología de Trabajo.....	57

<b>Capítulo V. Experimento de variación de temperaturas con variación de flujo de aire.....</b>	
5.1 Procedimiento experimental.....	65
5.2 Resultados experimentales.....	65
5.3 Análisis de resultados.....	70
<b>Capítulo VI. Experimento de variación de temperaturas con diferentes cantidades de absorbente dentro del colector.....</b>	72
6.1 Procedimiento experimental.....	72
6.2 Resultados experimentales.....	72
6.3 Análisis de resultados.....	79
<b>Capítulo VII. Experimento de variación de temperatura con diferentes modos de operación (extractor o inyector de aire).....</b>	80
7.1 Procedimiento experimental.....	80
7.2 Resultados experimentales.....	80
7.3 Análisis de resultados.....	85
<b>Capítulo VIII. Comparación con otras alternativas de secado.....</b>	86
8.1 Tabla comparativa.....	86
8.2 Análisis costo-beneficio.....	88
<b>Capítulo IX Conclusiones.....</b>	90
<b>Capítulo X Referencias.....</b>	93
<b>Anexo 1 Recta de eficiencia.....</b>	95

### 1.1 Introducción: panorama general de fuentes energéticas, usos y aplicaciones en energía solar.

Chile posee una fuerte dependencia por las fuentes primarias de energías y principalmente combustibles fósiles. Según [12] el balance energético del año 2006 arroja una dependencia del 79% con respecto a fuentes primarias de energías descontando la generación hidroeléctrica (10%), tal como se observa en la figura 1, debido a esto el país debe centrar su esfuerzos en obtener energía capaces de ser renovables, fuentes de energías limpias e inagotables.

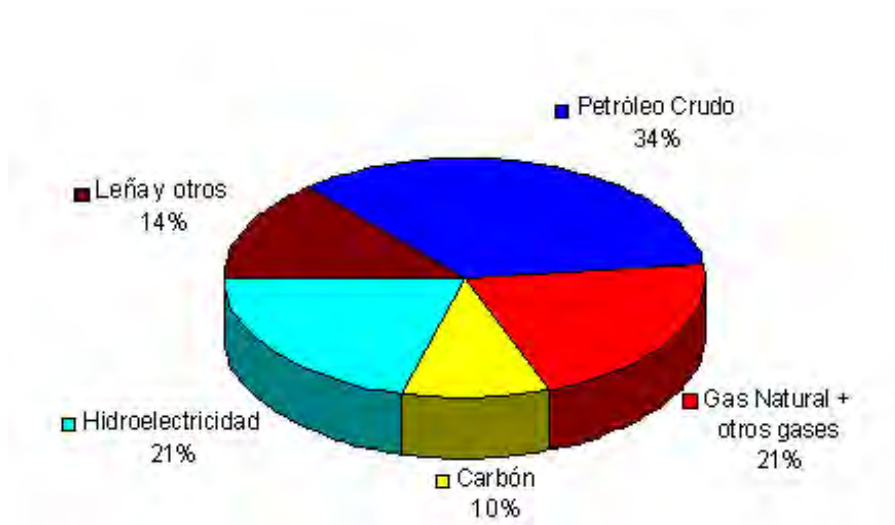


Figura 1: dependencia de las fuentes de energías primarias [12]

La energía solar es el recurso energético mas abundante en la tierra. La energía solar que recibe la superficie del planeta en una hora es equivalente al total de la energía consumida por todos los humanos en un año. [4]

Esta puede ser aprovechada de diversas maneras, tanto para generar electricidad (energía eléctrica) como calor (energía térmica), pero tiene el inconveniente que se recibe solo durante el día, por ello debe combinarse con otros sistemas de generación o la inclusión de algunos sistemas de almacenamiento.

La energía solar puede ser transformada directamente en energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos, aprovechada como calor para generación eléctrica indirectamente, mediante sistemas de concentración solares de potencia o, utilizada para calentar agua a través de colectores solares.

Tanto la tecnología fotovoltaica, como los colectores, son modulares y escalables, desde pequeños sistemas para uso domestico hasta grandes instalaciones para fines industriales.

Algunas de las tecnologías para el aprovechamiento de la radiación solar son:

- **Fotovoltaica**(PV; photovoltaic): los sistemas fotovoltaicos convierten de manera directa la energía solar en electricidad, el bloque mas básico de un sistema PV es la celda PV, compuesta por un semiconductor capaz de convertir la energía solar en electricidad de corriente continua. Entre el 85%y 90% de los módulos de paneles solares están basados en cristales de silicio, se clasifican en los que usan una capa (monocristalino) y las de dos o más capas (policristalino), se trata de una tecnología con elevado nivel de madurez. Dentro de estos sistemas se encuentran: Silicio monocristalino que poseen una eficiencia de conversión entre 15%-19%y se proyecta que esta eficiencia de conversión aumente para el año 2020 a 23%, en Chile se encuentra



presente en sistemas de pequeña escala, tales como proyectos de telecomunicaciones, desarrollo social, electrificación rural. Silicio policristalino ofrecen una eficiencia de conversión de 14%-20%, es una tecnología mas antigua y que requiere mayor superficie de extensión. Las “thin film” poseen eficiencias de conversión del orden 6% y 12%, son de mas bajo costo se desarrollan a partir de material fotovoltaico depositado en una superficie delgada. Silicio amorfo se forman mediante el depósito de diferentes tipos de silicio tratado sobre un sustrato de vidrio, poseen eficiencia de conversión del orden de 6% al 9%. Y la concentración fotovoltaica son sistemas que concentran la luz solar mediante un elemento óptico unas 250 a 1000 veces sobre 1 cm<sup>2</sup> de celdas solares, por ello la eficiencia de estos sistemas se aproxima al 40%.



*Figura 2: sistema fotovoltaico paneles de silicio policristalino.[4]*

- **Concentración solar de potencia:** estos sistemas generan energía eléctrica mediante el uso de espejos para concentrar la energía solar, de modo de calentar un fluido calor-transportador, que posteriormente genera vapor que ingresa a una turbina. Dentro de este tipo de tecnología se encuentran: Cilindro parabólico que consiste en un semicilindro reflectante en cuyo eje existe una tubería por la cual fluye un fluido que es calentado cuando los rayos se concentran en el eje del semi cilindro posee una eficiencia solar-térmica del orden del 60% y una eficiencia solar-eléctrica del orden del 15%[4], en EEUU existen varias de estas plantas operando desde la década de los 80 con una capacidad de 350MW. Tecnología lineal de Fresnel, esta tecnología utiliza largas filas de espejos planos para reflejar la luz a una línea tubular por donde circula un fluido de trabajo, similarmente a los cilindros parabólicos, la eficiencia de conversión ronda el 30%. Las torres de concentración son sistemas que se componen de miles de reflectores pequeños para concentrar los rayos en un receptor central, ubicado en lo alto de un torre, posee eficiencia de conversión de 20% a 35%[4].



Figura 3: sistema de concentración solar parabólica.[4]

- **Energía solar térmica:** Un sistema solar térmico transforma la energía radiante emitida por el sol en energía térmica y la acumula. En general, son proyectos que pueden aplicarse desde una escala doméstica, comercial hasta industrial, con potencias de orden de  $700 \text{ W/m}^2$  [4]. Dado que la energía térmica no se puede transportar eficientemente a través de grandes distancias, este tipo de tecnologías son especialmente adecuadas en áreas donde se concentra la demanda, como empresas, casas, edificios, u otros.

Los principales componentes de estos sistemas son el sistema de captación de energía solar, el sistema de almacenamiento de agua, el sistema de intercambio, sistema de apoyo, la red hidráulica y el sistema eléctrico y de control. La eficiencia de conversión que alcanzan estos sistemas se encuentra normalmente entre 40% a 65% [4].

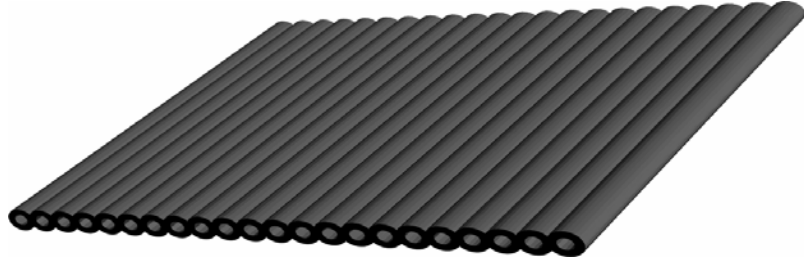
Las principales barreras están asociadas con la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y sus subsidios, la poca conciencia de temas ambientales, y los costos de inversión altos, lo que hace que estas tecnologías no sean accesibles para todos los hogares. A nivel local, las barreras de falta de profesional capacitado de diseñar, implementar y mantener estos sistemas.

Un colector de 2,4m<sup>2</sup> y 150 litros oscila entre USD 270 en China, y USD 950 en Grecia. En Chile el costo promedio de estos sistemas oscila entre \$300.000 a \$500.000 pesos Chilenos [4].

Debido al enorme potencial que posee Chile en términos del recurso, en particular en la zona norte y centro, se prevé que estas tecnologías aumente su participación en la generación nacional de energía térmica en los próximos años. Aunque es factible de aplicar a todo el país, se obtiene mayor eficiencia y economía en el norte y zona central de Chile.

Las tecnologías presentes dentro de este tipo de captación termo-solar son:

- Colectores sin cubierta: consisten en placas planas absorbentes sin cubiertas, conformadas por un arreglo de tubos por donde circula el fluido de trabajo, comúnmente agua. Se utilizan en el calentamiento de sistemas simples, ya que funcionan bajo un rango pequeño de temperaturas (10 ° C a 40 ° C). Su eficiencia de conversión es variable, ya que disminuye a medida que la diferencia de temperatura entre la salida del colector y la temperatura ambiente es grande. Con 400 W/m<sup>2</sup> de radiación y una diferencia de temperatura entre el colector y el medio ambiente de 20°C, la eficiencia es del orden del 50%. Con una diferencia de temperatura de 40°C esta decae al 20% [4]. El principal uso de esta tecnología en Chile, es el calentamiento de agua para piscinas.



*Figura 4: colectores sin cubierta.[4]*

- Colectores tubos al vacío: esta tecnología se utiliza para calentamiento de agua sanitaria y procesos térmicos industriales. La base del funcionamiento consiste en la colocación de placas absorbentes de energía y tubos con fluidos de trabajo dentro de un tubo al vacío, permitiendo mayor temperaturas en la placa (sobre 100°C). Su eficiencia de conversión es variable, la que aumenta a menor diferencia de temperatura entre el ambiente y el colector. Con 400W/m<sup>2</sup> y una diferencia de temperatura entre el medio ambiente y el colector de 20°C se logra un eficiencia del 75% y con una diferencia de temperatura de 40°C decae a 65% [4].



*Figura 5: colectores tubos al vacio, los más conocidos en el mercado de calentadores de agua [4].*

- Colectores planos: Esta tecnología se aplica para generar energía térmica, principalmente para obtener agua caliente sanitaria tanto a nivel residencial, como en aplicaciones de mayor demanda, ya que funcionan en un rango de temperaturas entre 10 y 80°C. Son colectores planos que poseen una cubierta, generalmente de vidrio. Estas cubiertas poseen un espesor mínimo de 4mm, deben ser capaces de soportar inclemencias del clima y tienen un alto grado de transparencia, sobre el 90%, pudiendo llegar a 95% con películas antirreflectoras. Su eficiencia de conversión es variable, la que disminuye a mayor diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y el colector, pero aumentan ante mejores condiciones de radiación. Con 400 W/m<sup>2</sup> y una diferencia de temperatura entre el medio ambiente y el colector de 20°C, se logra una eficiencia de 65% y con una diferencia de temperatura de 40°C, esta decae a 45%. [4]



*Figura 5: colectores solares planos de agua, los principales componentes de estos sistemas son la cubierta, placa absorbente, tubos por donde circula el fluido de trabajo, un aislante térmico y soporte. Es una tecnología de mantención e instalación sencilla [4].*

Las zonas del desierto otorgan grandes extensiones de tierras disponibles. Se estima que el potencial bruto de capacidad instalable que posee Chile para generación de energía eléctrica a partir de energía solar es de 100.000 MW [4]. A pesar de la existencia de sectores con gran cantidad de radiación solar incidente en el país, en la actualidad el desarrollo industrial de la energía solar en Chile es aún incipiente, siendo las aplicaciones de pequeña escala de sistemas fotovoltaicos y colectores solares, las que se han posicionado como una alternativa utilizada.

Uno de los principales factores para preferir y utilizar las tecnologías renovables, es el impacto menor que producen en el medio ambiente, es por ello que se han realizado esfuerzos políticos y empresariales para motivar el

uso y generar incentivos en el desarrollo de aplicaciones en energías renovables, principalmente solar. Entre ellos cabe mencionar la franquicia tributaria para sistemas solares térmicos (SST) [5], este beneficio tributario que establece la ley 20.365 para SST esta dirigido principalmente a las empresas inmobiliarias y constructoras, que busca promover el uso de esta tecnología y extender sus beneficios en casas y edificios de todo el país. Que beneficia hasta con el 100% del costo d estos sistemas instalados para producir agua caliente en viviendas nuevas, aun esta en tramite lo que sucederá con viviendas ya usadas.[5]

La ley también resguarda la calidad de los SST, pues establece la obligación de responder ante un falla durante los primeros 5 años y financiar una inspección dentro de un año de recepcionado el inmueble. A su vez las empresas constructoras accederán al crédito siempre que cumplan con los requisitos estipulados por la ley.

## **1.2 Motivación**

Debido a los puntos anteriores, en relación a las ventajas y beneficios que puede tener un proyecto en energía termosolar, además de los patrocinios, esfuerzos y apoyo que se han realizado a nivel de gobierno. Es claro que Chile esta teniendo una fuerte participación en el uso de energías renovables, además que posee cualidades que son optimas para el aprovechamiento de la radiación solar incidente en la zona norte y centro del país. Sin dejar de lado, que actualmente existen aun procesos o costumbres alimenticias que se desarrollan de manera artesanal, como es el secado de pasas o frutas, sobre todo por aquellos agricultores que viven aislados o alejados de medios comunes de generación energética( no solo eléctrica).

Ante esto, el siguiente articulo es una investigación desarrollada en virtud de la escasa información que se tiene de colectores solares planos de aire, y de



los beneficios que pueden obtenerse a partir de materiales de bajo costo y accesibilidad a en su construcción para aplicarlo en la agro-industria del secado de frutas. Por supuesto, que el colector de aire también puede tener un nicho en aplicaciones de calefacción. Cualquiera sea los usos de este colector solar plano de aire, la finalidad del estudio es entregar la información técnica en relación a su forma de operar.

### **1.3 Objetivos generales y específicos.**

#### **Objetivo general:**

Construir y estudiar las ventajas de un colector solar plano de bajo costo aplicado a secado y calefacción.

#### **Objetivos específicos:**

- Identificar, Determinar y cuantificar las características esenciales de diseño y construcción del colector solar, como: tipo de superficie captadora, ángulo de inclinación, ubicación geográfica, tamaño, flujos de aire a utilizar y rendimiento de los colectores solares, los cuales están normados internacionalmente. A su vez explicar el fenómeno y modelo de balance energético para colectores solares planos.
- Estudio paramétrico de las condiciones ambientales del lugar, tales como: temperatura ambiental, radiación solar, flujo de aire pasivo (sin uso de medios de transporte de aire), flujo de aire activo (usando ventiladores y extractores de aire). Generación de procesamiento de datos de acuerdo a modelo presentado del fenómeno (planillas de datos, gráficos simples y dobles comparando las diferentes curvas: rendimiento vs tiempo, temperaturas de salida o entrada vs tiempo, radiación en el tiempo, y otros).
- Estudiar, comparar y cuantificar el rendimiento de un colector solar de aire, con otras fuentes de secado y calefacción tanto convencional y no convencional.
- Estudio costo-beneficio del sistema y comparación con otras alternativas de obtención de energía calórica.

## **2.2 Transferencia de calor:**

El calor es transferido de un medio a otro mediante tres maneras: Radiación, convección y conducción. A estos tres tipos de transferencia de calor se debe agregar una forma artificial, llamada convección forzada, mediante algún fluido que es calentado para transferir calor de un medio a otro.

**2.1.1 Conducción:** El calor se transmite de una sustancia a otra mediante conducción, es decir si dos sustancias se tocan el calor se propaga de una a otra. La ecuación básica de transferencia de calor mediante conducción es

$$Q = \frac{KA}{L} \Delta T$$

(1)

Donde Q es la tasa de calor transferido, k es la conductividad térmica del material, L es el espesor, A es el área para la transferencia de calor y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura en la transferencia de calor. La figura 8 señala las relaciones físicas mencionadas.

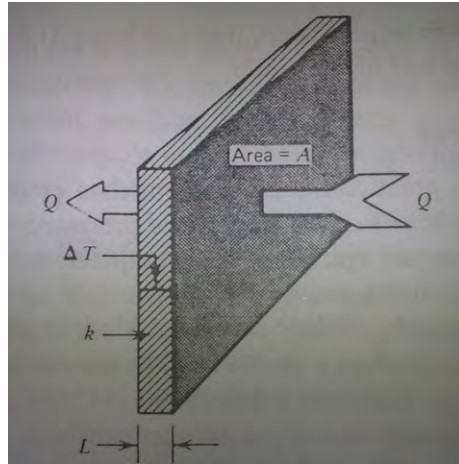


Figura 8: transferencia de calor mediante conducción[2].

**2.1.2 Convección:** Este tipo de transferencia de calor, necesariamente involucra el movimiento de un líquido o un gas. La convección natural ocurre cuando un gas es calentado mediante una superficie o a la inversa.

Este gas al ser calentado se vuelve más ligero en densidad y posteriormente se eleva. La convección natural es un proceso importante cuando el calor se pierde desde una ventana hacia el aire exterior o cuando el calor se pierde desde un colector solar.

La razón de calor transferido por convección también es proporcional a la diferencia de temperatura  $\Delta T$ , y se expresa como

$$Q = h * A * \Delta T \quad (2)$$

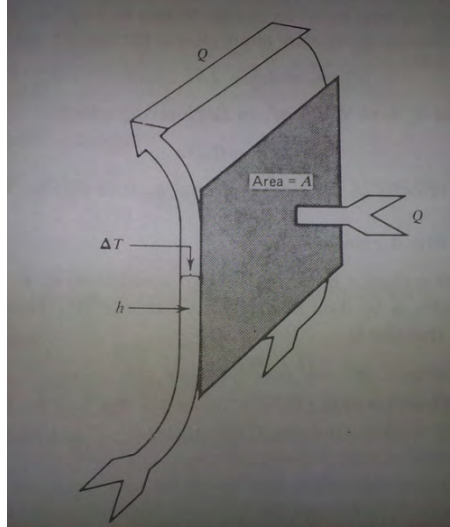


Figura 9: transferencia de calor por medio de convección,  $h$  es el coeficiente de convección que ocurre en una lamina de área  $A$  [2].

### 2.1.3 Radiación:

Si dos cuerpos no se tocan, la transferencia de calor se realiza del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura mediante radiación (sin existe un gas entre tales cuerpos también puede ocurrir transferencia de calor mediante convección). La ecuaciones que reflejan la transferencia de calor mediante radiación es

$$Q = 5.673 \cdot e \cdot A \cdot \left[ \left( \frac{TH}{100} \right)^4 - \left( \frac{TL}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

Donde Q es el calor transferido en Watts, A es el área en m<sup>2</sup> y Th y Tl, son las temperaturas altas y bajas respectivamente, en la expresión e es la emisividad de la superficie, que es la propiedad de perder calor a los alrededores. La emisividad varía desde 1 para superficies negras hasta 0,02 para superficies reflectantes como metales bien pulidos. Los materiales más usados tienen emisividad de 0,8.

**2.1.4 Combinación de los coeficientes de radiación y convección:** Si se compara la transferencia de calor de mediante conducción, convección o radiación, las pérdidas debido a radiación y convección son del mismo orden de magnitud, y pueden ocurrir simultáneamente (según [2]). Por lo tanto, en la mayoría de las situaciones de transferencia de calor, es deseable considerar ambos términos en una sola ecuación, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T \quad (4)$$

Donde U es el coeficiente combinado de transferencia de calor.

**2.1.5 Transferencia de calor por medio de un flujo de fluido:** Si el agua lleva el calor de un colector a un radiador o si el aire caliente tempera una casa, la transferencia de calor es por medio del flujo de un fluido o

por convección forzada. La ecuación básica que describe este proceso es

$$Q = W * c * \Delta T \quad (5)$$

Donde  $W$  es la tasa de flujo de masa del fluido,  $c$  es el calor específico del fluido a presión constante y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura de salida y entrada.

## 2.2 Radiación Solar.

El rendimiento de cualquier tipo de colector solar depende de la radiación disponible en el lugar a instalarlo. La radiación solar varía durante el día, obteniéndose un máximo al medio día, cuando la trayectoria solar es la más corta a través de la atmósfera. La altitud y acimut solar varían diariamente, reduciendo el máximo potencia de calor colectado. Las horas de luz diaria también se reducen de estación a estación, siendo más cortas en invierno, cuando las necesidades de calor son mayores.

La irradiación o intensidad de la energía radiante del sol a la distancia promedio sol-tierra, medida en plano normal a la línea de la distancia sol-tierra fuera de la atmósfera, se llama constante solar,  $I_{sc}$ . El valor de  $I_{sc}$  se ha estimado en  $1353 \text{ W/m}^2$  con un nivel de precisión de  $\pm 1,5\%$ . Este valor ha sido obtenido de numerosas medidas de flujos de radiación solar directa a

hechas a través de la atmosfera para varios ángulos solares cenitales. Estas mediciones han sido confirmadas por observaciones de aeronaves de vuelos altos, globos aerostáticos y sondas espaciales.

La radiación extraterrestre es aproximadamente la radiación proveniente del cuerpo negro a 5762 K, pero muestra picos y valles en el espectro debido a las propiedades radiactivas de los gases incandescentes del sol. El espectro del cuerpo negro y de la irradiación se muestra en la figura siguiente

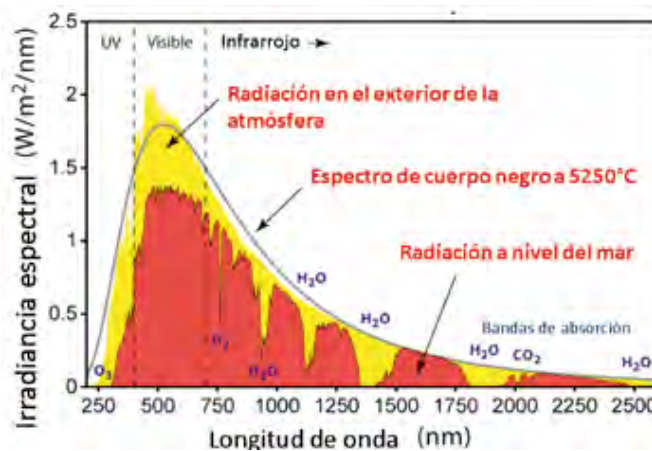


Figura 10: espectro de radiación solar, curva estándar, con constante solar de  $1353 \text{ w/m}^2$  comparado con la radiación de cuerpo negro.[4]

La radiación solar extraterrestre aparente  $I_0$  varía durante el año así como varía la distancia de la tierra al sol en las estaciones, se hace un 3,5 % mas grande que  $I_{sc}$  en febrero y 3,5% mas pequeña en junio. Los valores se pueden predecir aproximadamente mediante la formula empírica



$$I_0 = I_{sc} \left[ 1 + 0.033 * \cos \left( \frac{360N}{370} \right) \right]$$

(6)

Donde N es el número de días en el año.

Un cambio más grande en la radiación extraterrestre durante cada estación es debido al aparente cambio en la trayectoria del sol en el cielo. Estos cambios están asociados a la altitud solar y a los ángulos de azimut relativos al colector solar y el tiempo que el sol emplea en estar sobre el horizonte, cumplen un papel importante en la radiación total recibida por el colector solar.

El cambio estacional en la trayectoria solar a través del cielo, se debe a la inclinación del eje de la tierra de 23.45°. Debido a esto aquellas zonas cercanas a los polos, reciben más luz durante el verano que en invierno.

La inclinación aparente del eje de rotación de la tierra entorno al sol con respecto a un cilindro y perpendicular a la órbita de la tierra es  $\delta$ , el ángulo de declinación. La declinación varía de -23.45° a +23.45 durante un año.

La siguiente ecuación empírica permite calcular la declinación

$$\delta_{\text{grados}} = 23.45 * \sin \left[ \left( \frac{N - 80}{370} \right) * 360 \right]$$

(7)

Donde N es el número del día en el año.

Otro de los efectos que posee la trayectoria solar en el cielo, lo que debe ser tomado en cuenta cuando se realizan actividades de análisis de un sistema de conversión de energía solar. La siguiente figura de la universidad de Oregón y su programa sunchart, muestra la trayectoria solar de Santiago, durante el año.

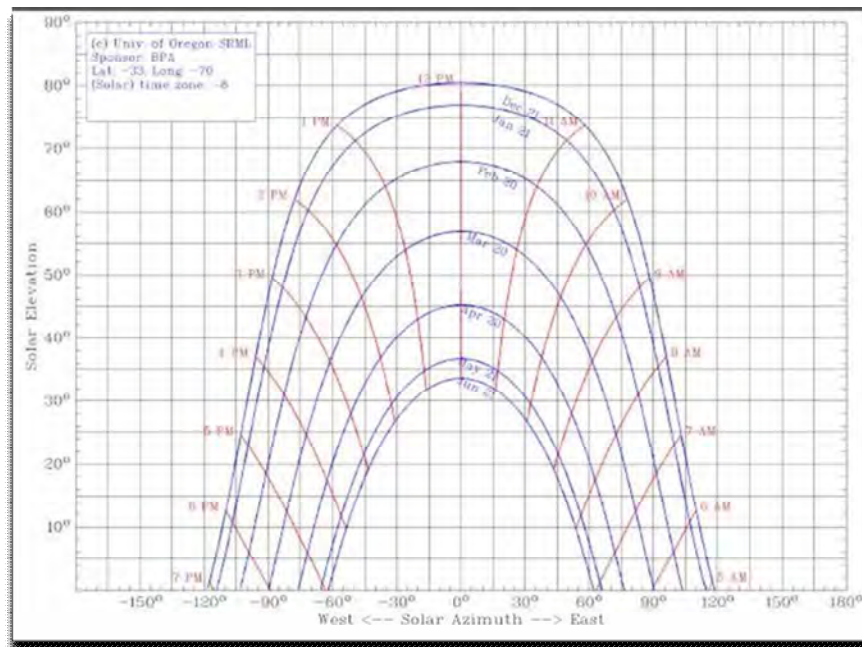


Figura 11: trayectoria solar durante el día para algunos meses del año, en Santiago.[13]

**Las estaciones** también producen un cambio en la radiación incidente sobre la Tierra. La figura 12 muestra las noches y días de los hemisferios en los 4 extremos de las estaciones, mirado desde el plano sobre el planeta.

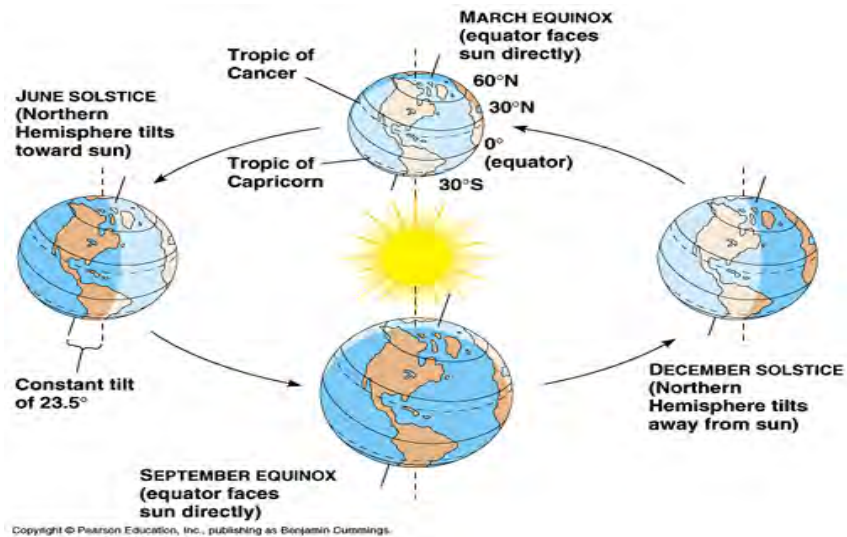


Figura 12: cambios en las estaciones de la iluminación, visto desde el plano de la órbita terrestre.[4]

En equinoccios de primavera y otoño (alrededor de marzo y septiembre 21) los rayos solares están perpendiculares a los ejes de rotación diario, y las noches y días son de 12 horas.

Para el solsticio de verano ( invierno en el hemisferio sur), alrededor de junio 21, para la porción del globo terrestre norte de  $90^\circ - 23.5^\circ = 66.5^\circ\text{N}$  de latitud disfrutan de radiación diaria, mientras la porción sur de  $66.5^\circ\text{S}$  no posee radiación solar directa. Para el solsticio de invierno, alrededor del 21 de diciembre, la situación es la inversa.

### Irradiación solar en días despejados:

**Efectos atmosféricos:** Como la radiación debe pasar a través de la atmosfera, la cual atenúa esta radiación en proporción a la longitud del camino recorrido, de acuerdo al coeficiente de extinción B, para la radiación directa en plano normal (DNI: direct normal irradiance en ingles) en la superficie de la tierra. Esta es la radiación que incide perpendicularmente a una superficie.

$$I_{DN} = A \exp\left(\frac{-p}{P_0} \cdot \frac{B}{\cos \theta_z}\right) \quad (8)$$

Donde  $\theta_z$  es el ángulo zenit y  $P/P_0$  es la presión para la localidad relativa a

la presión atmosférica estándar, dado por

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-0.0001184 \cdot \text{altitud en metros sobre el nivel del mar}) \quad (9)$$

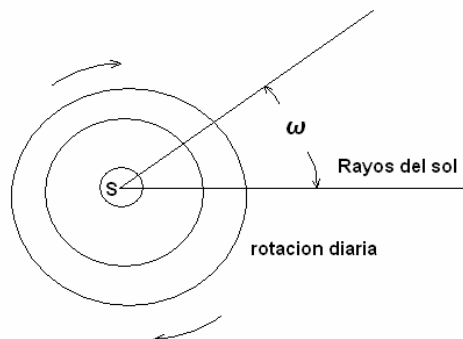
Los valores A y B, son la intensidad solar aparente extraterrestre y el coeficiente de extinción, respectivamente, los cuales se pueden obtener de tablas de acuerdo al lugar que se estudia[2].

La DNI es la energía de los haces directos del sol incidiendo en una área perpendicular al az en la superficie de la tierra. Esto permite obtener la radiación global, junto a la radiación difusa que se refleja de las nubes. La radiación difusa, en días despejados es aproximadamente el 5% a 10% de la radiación total o global.

Mucha de la energía se pierde en pasar a través de la atmosfera, debido a la absorción de radiación infrarroja por el vapor de agua atmosférico. Cuando la humedad es alta la radiación global se reduce a un 15% debajo de lo normal, debido a las absorciones infrarrojas del espectro.

La radiación también se puede ver reducida por factores atmosféricos de cada localidad, como la contaminación ambiental de ciudades, debido a la sal en áreas costeras y debido a niebla.

Usando el tiempo solar, la altitud y el azimut del sol pueden determinarse por el siguiente procedimiento. Las figura 13 a 15, indica cada componente angular necesaria.



*Figura 13: ángulos para calcular la radiación directa en plano normal, vista del polo sur para el ángulo horario  $\omega$ [2].*

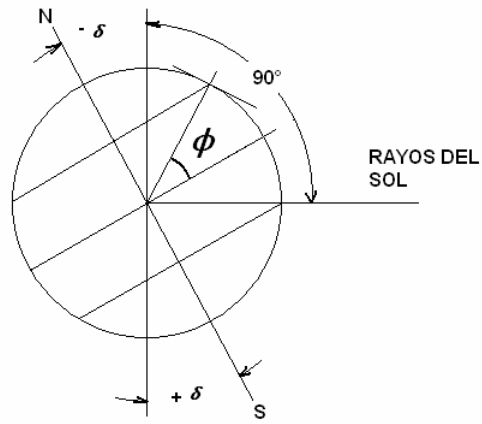


Figura 14: ángulos para calcular la radiación directa en plano normal, vista que

muestra la relación de la latitud  $\phi$  y el ángulo de declinación  $\delta$ . [2]

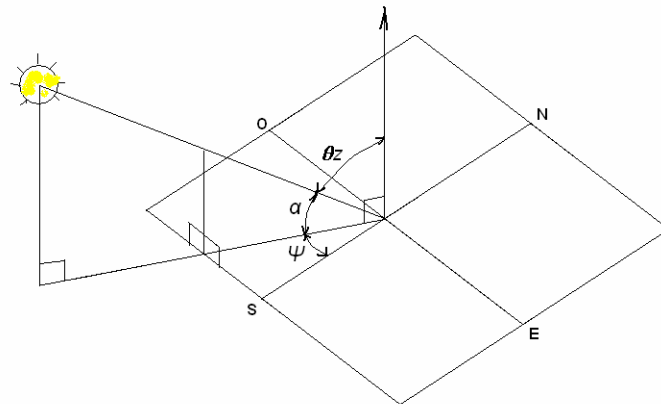


Figura 15: ángulo cenital  $\theta_z$ , altitud  $\alpha$ , y azimut  $\Psi$ , se muestran en relación a una

*superficie plana horizontal en la superficie de la tierra.[2]*

El ángulo  $\omega$  es el ángulo de la posición localizada del medio día solar causada por la rotación de la tierra. Se expresa  $\omega$  en grados, se multiplica las horas desde el medio día solar por  $360/24$ . Se define, según[2],  $\omega$  como negativo en las mañanas y positivo en las tardes. El ángulo cenital  $\theta_z$  y su

complemento la altitud  $\alpha$  están dados por.

$$\cos \theta_z = \text{sen} \alpha = \cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta \quad (10)$$

Donde  $\Phi$  es la latitud (positiva en cada hemisferio) y  $\delta$  es la declinación solar.

El azimut  $\Psi$ , medido en grados esta dado por

$$\sin \Psi = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}$$

(11)

Donde  $\Psi$  es negativo en las mañanas y positivos en las tardes. Notar que esta función es multi-evaluada, con  $|\Psi| \geq 90^\circ$ , cuando la altitud solar es menor ocurre cuando el azimut del sol es  $\pm 90^\circ$ . Esa altitud esta dada por

$$\sin \alpha = \frac{\sin \delta}{\sin \Phi}$$

(12)

Recordar que  $\theta_z = 90 - \alpha$ , entonces  $\cos \theta_z = \sin \alpha$ . La irradiación difusa esta

dada por el parámetro C veces DNI, y la radiación global en superficie plana horizontal es la suma de las componentes difusa y directa, es decir

$$H_{\text{global}} = I_{DN} \sin \alpha + C I_{DN}$$

(13)

El parámetro C, se obtiene de igual manera que los parámetros A y B. A partir de la tabla 1.

fecha nominal	día	ángulo de declinación	A [W/m2]	B [adimensional]	C [adimensional]
21-ene	19,850	-20,000	390,000	0,142	0,058
21-feb	54,060	-10,000	385,000	0,144	0,060
21-mar	80,000	0,000	376,000	0,156	0,071
21-abr	110,470	11,600	360,000	0,180	0,097
21-may	140,150	20,000	350,000	0,196	0,121
21-jun	172,500	23,450	345,000	0,205	0,134
21-jul	201,840	20,600	344,000	0,207	0,136
21-ago	232,490	12,300	351,000	0,201	0,122
21-sep	265,000	0,000	365,000	0,177	0,092
21-oct	292,340	-10,500	378,000	0,160	0,073
21-nov	324,200	-19,800	387,000	0,149	0,063
21-dic	357,500	-23,450	391,000	0,142	0,057

Tabla 1: parámetros usados para estimar la intensidad de radiación solar. [2]



El ángulo horario al atardecer o amanecer,  $\omega_s$ , se puede obtener resolviendo la ecuación (10), para  $\omega$  cuando  $\alpha=0$ .

Para encontrar  $\omega_s$  en horas desde el medio día solar, usar

$$\omega_s = \frac{\pm 24}{360} * \arcsin(-\tan\phi * \tan\delta)$$

(14)

**Irradiancia en una superficie plana e inclinada:**

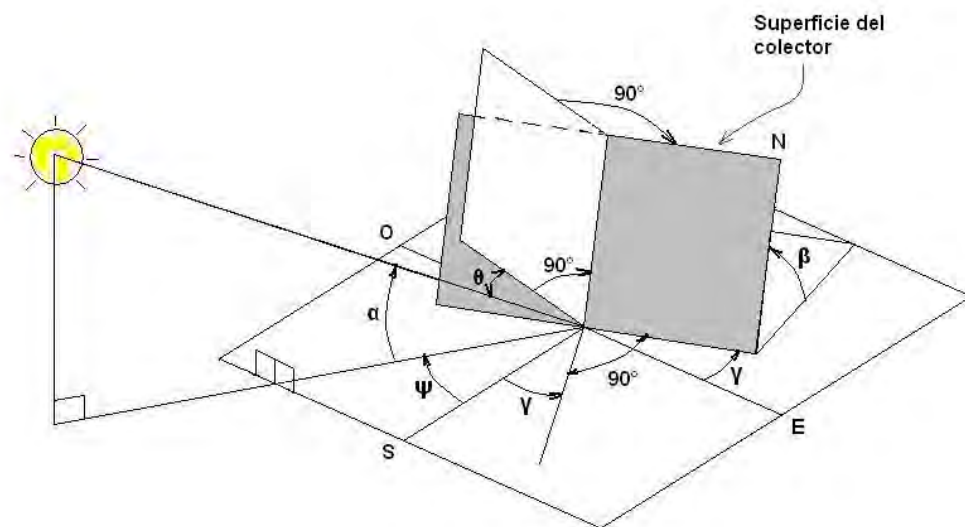


Figura 16: ángulos utilizados para calcular la irradiancia en un superficie inclinada. La inclinación del colector es  $\beta$ , su ángulo de azimut es  $\gamma$  y el ángulo incidente a la

normal del colector es  $\theta$ . [2]

Las relaciones existentes entre los ángulos involucrados con una superficie de un colector inclinado en un ángulo  $\beta$ , se muestra en la figura 16. El ángulo incidente  $\theta$  es el ángulo entre la radiación directa desde el sol y una línea

normal al plano de superficie inclinada sobre el ángulo de inclinación  $\beta$  desde la horizontal. Se puede determinar de la ecuación

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta$$

(15)

El ángulo  $\omega_s$  de la hora potencial de amanecer o atardecer sobre el colector esta dado por

$$\cos \omega_s = -\tan(\phi - \beta) \tan \delta$$

(16)

Si el colector no mira hacia el sur,  $\theta$  se encuentra a partir de la altitud solar  $\alpha$ ,

azimut  $\Psi$ , y el ángulo positivo o negativo de azimut  $\gamma$  que el plano mira hacia el sur. El ángulo  $\gamma$  es negativo cuando la superficie mira al este con respecto al sur, positivo cuando mira al oeste con respecto al sur. Expresado analíticamente

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos(\Psi - \gamma) \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta$$

(17)

Si la irradiación en plano normal o la directa en plano horizontal son conocidas, el flujo de radiación directo en la superficie esta dado en termino del ángulo incidente y la altitud solar por la siguiente expresión

$$I_{directa} = H_{directal} \frac{\cos\theta}{\sin\alpha} = I_{DN} \cos\theta \quad (18)$$

Donde  $\frac{\cos\theta}{\sin\alpha}$  se llama a veces un factor de magnificación M, donde  $I_{directa}$  no puede ser negativa,  $\cos\theta$  puede ser cero solo si las ecuaciones (15) o (17),

llegan a un resultado de  $\theta$  mayor que  $90^\circ$ , lo que indica que el sol esta detrás

del colector.

La irradiación difusa en la superficie inclinada del colector esta dada por

$$I_{difusa} = H_{difusa} \frac{1 + \cos\theta}{2} \quad (19)$$

Esto asume que los alrededores no son reflectantes y que la distribución de radiación difusa es uniforme en el cielo.

Si los alrededores tienen una reflectancia  $\rho$ , luego

$$I_{\text{difusa}} = H_{\text{difusa}} \frac{1 + \cos\theta}{2} + \rho \frac{(H_{\text{directa}} + H_{\text{difusa}})(1 - \cos\theta)}{2}$$

(20)

Donde  $\rho$  es aproximadamente 0.2 para el suelo común o vegetación, 0.8 para nieve y 0.15 para pisos de gravilla.

A continuación se expresa la irradiación difusa en términos del flujo de radiación directa en plano normal. Se combinan las ecuaciones (13) y (20)

$$I_{\text{difusa}} = I_{\text{DN}} \left[ C \frac{1 + \cos\theta}{2} + \frac{\rho(C + \sin\alpha)(1 - \cos\theta)}{2} \right]$$

(21)

Finalmente la irradiación global horizontal en plano inclinado se determina a partir de la suma de los valores de las ecuaciones (18) y (21), es decir

$$I_{\text{global}} = I_{\text{directa}} + I_{\text{difusa}}$$

(22)

Cuando se tiene los datos de medición de  $I_{\text{global}}$  no es necesario realizar el cálculo de las otras variables, basta tener un sensor de radiación que permite medir la radiación incidente en plano inclinado [1].

### **2.3 Parámetros y técnicas de caracterización del recurso solar.**

La fuente de energía más constante con la que cuenta nuestro planeta es la proveniente del sol, la que en la capa exterior de la atmósfera tiene un valor medio constante de  $1.354 \text{ W/m}^2$ . La energía recibida en la superficie de la tierra se conoce como irradiación, la que depende de la hora del día, la inclinación de los rayos del sol y la cobertura de nubes. Esta energía puede ser aprovechada de diversas maneras, tanto para generar energía como calor, pero tiene el inconveniente de que sólo se recibe durante el día, por lo que se requiere combinarla con otras fuentes de energía o con sistemas de almacenamiento.

La radiación proveniente del sol es emitida por medio de ondas electromagnética, cuyo rango de variación de la longitud de onda de la radiación solar va desde los 200 a 4000 nm. El rango del espectro de radiación electromagnética que un ser humano puede observar se le llama el espectro visible, y tiene en promedio un rango de longitud de onda de 400-700 nm.

La radiación solar alcanza su máxima intensidad cuando el sol se encuentra en el cenit y el ángulo de incidencia es de  $90^\circ$ . Naturalmente no todos los lugares del planeta reciben la misma cantidad de radiación diaria, debido a la posición (latitud y longitud), posición del sol, estación del año, inclinación de la tierra, u otros. Debido a esto es necesario conocer las características físicas del lugar durante la prospección del recurso solar, mediante mediciones terrestres y satelitales, simulaciones y modelos.

El manejo de datos solares involucra el conocimiento de las variables y componentes de la radiación solar: la radiación global recibida en una superficie es la suma de las componentes directa y difusa. La radiación directa

es aquella que proviene del disco solar, mientras que la radiación difusa tiene su origen en la dispersión de radiación en la atmosfera y proviene de todo el cielo excepto del disco solar (figura 17).

$$\text{Global} = G = \text{Directa} + \text{difusa}. \quad (23)$$

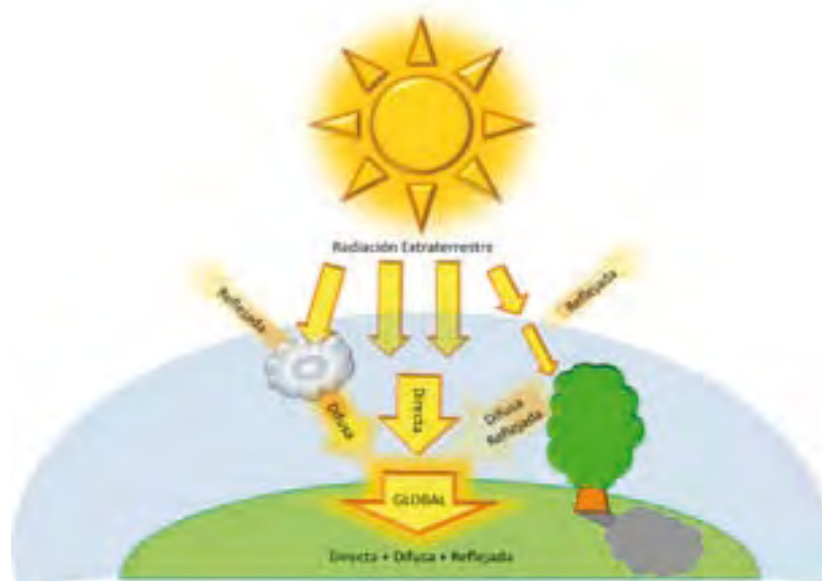


Figura 17: distribución de las componentes de radiación solar [4].

Para obtener los valores y magnitudes de las componentes antes mencionadas, se utilizan diferentes tipos de instrumentos y arreglos de ellos.

- **Piranómetros:** Como el de la figura 2, miden en un rango espectral de 300-3000 nm, según norma ISO 9060. Miden radiación global, con un sistema de sombreado miden la componente difusa de la radiación global. Con ángulo de visión de 180°. El domo de cuarzo o cristal sirve para evitar el polvo o la suciedad y evitar absorciones por efecto de superficies del ambiente.



*Figura 18: piranómetro Kipp and Zonen [14].*

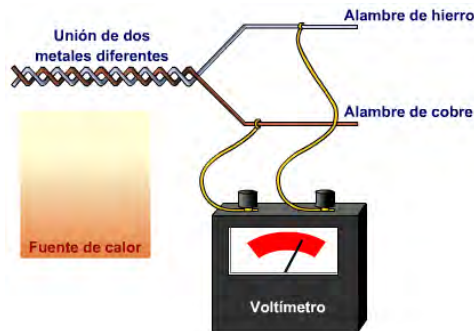


*Figura 19: piranómetro Epley black and white [9].*

### **Principio de funcionamiento de los sensores, Principio termoelectrico:**

Este principio proviene del efecto termoelectrico, que es la conversión directa de temperatura en un voltaje. Este efecto es conocido como efecto Seebeck. El efecto que es la diferencia de voltaje generado por una diferencia de temperatura, se crea por la diferencia de temperaturas entre dos metales o

semiconductores diferentes. El voltaje creado es del orden de los micro-volts por kelvin de diferencia.



*Figura 20: Esquema del funcionamiento del principio termoeléctrico, dos metales de diferente composición generan una diferencia de tensión al aplicar le una diferencia de temperatura en el extremo al cual se unen[4].*

La radiación es convertida en energía térmica mediante una superficie ennegrecida, cuya absorción de esta superficie es de un 99%. El crecimiento de temperatura de estas superficies puede ser el orden de 1 a 10 K. Tal crecimiento de temperatura se debe a un conjunto de termocuplas o termopilas, las cuales están conectadas en serie o serie-paralelo. Posteriormente generan como señal de salida una señal eléctrica (generalmente una tensión entre los extremos de las termocuplas). Principalmente se prefiere el uso de termopilas, ya que no requieren uso de pilas, baterías o fuentes de poder para su funcionamiento.

### **Características de las series de datos:**

La radiación solar en la superficie terrestre para un punto en particular presenta marcados ciclos y variabilidad en diversas escalas temporales. La variación diaria de la radiación solar para un día despejado y uno con presencia de



nubes, puede verse en las figuras 21 y 22. De las figuras puede observarse que existe variabilidad diaria, horaria y en escalas de tipo menores a una hora.

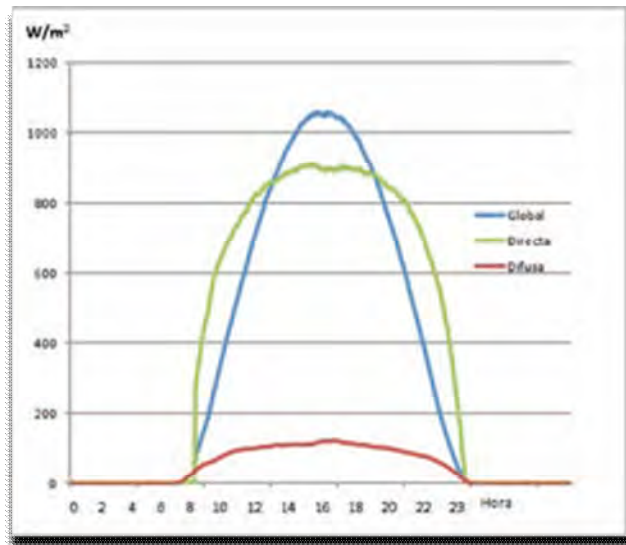
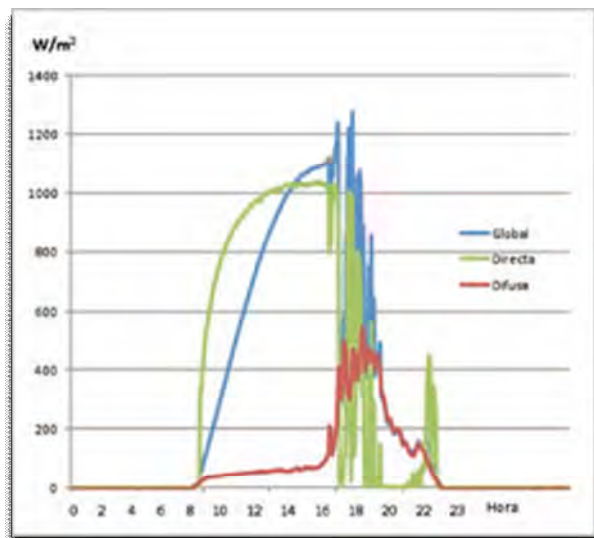


Figura 21: componentes de la radiación global en plano horizontal para un día despejado, datos del 25 de diciembre de 2010 de Santiago, tomados de la red del campus San Joaquín de la PUC ( informe de practica profesional).[4]



*Figura 22: componentes de la radiación global en plano horizontal para un día nublado, datos del 3 marzo del 2011 de San Pedro de Atacama, tomados de la red de suntracker de la PUC.[4]*

## **Capítulos III      Colectores solares planos**

---

Los colectores solares son un tipo especial de intercambiadores de calor, que transforman la radiación solar en energía interna del medio de transporte. Es un dispositivo que absorbe la radiación solar incidente, convirtiéndola en calor, y transfiere el calor a un fluido (aire, agua o aceite) que fluye a través del colector. El calor generado, se puede usar para sistemas de calefacción o para calentamiento de agua, en cuyo caso se puede almacenar en estanques térmicos que permitan utilizar el agua caliente de noche.

Existen básicamente dos tipos de colectores solares: los no concentradores o estacionarios y los concentradores. Un colector sin concentración tiene la misma área de intercepción y absorción de radiación solar, mientras colector solar de concentración con sistema de seguimiento solar usualmente tiene una superficie cóncava reflectante para interceptar y enfocar la radiación directa del sol en un área receptora menor, estos incrementan el flujo de radiación. Los colectores de concentración son adecuados para aplicaciones de alta temperatura. Los colectores solares también pueden ser reconocidos mediante el tipo de fluido usado para transferir calor (agua, aire o algún tipo de aceite) y si están cubiertos o descubiertos. La siguiente tabla muestra una lista de tipos de colectores solares.

### **3.1 Colectores solares:**

Los colectores solares se distinguen básicamente por su movimiento-estacionario, sistema de seguimiento de un eje, sistema de seguimiento de dos ejes- además del rango de temperatura que opera. Para el caso de esta memoria se examinara el caso de los colectores estacionarios, particularmente los colectores planos (flat plate collector o FPC).

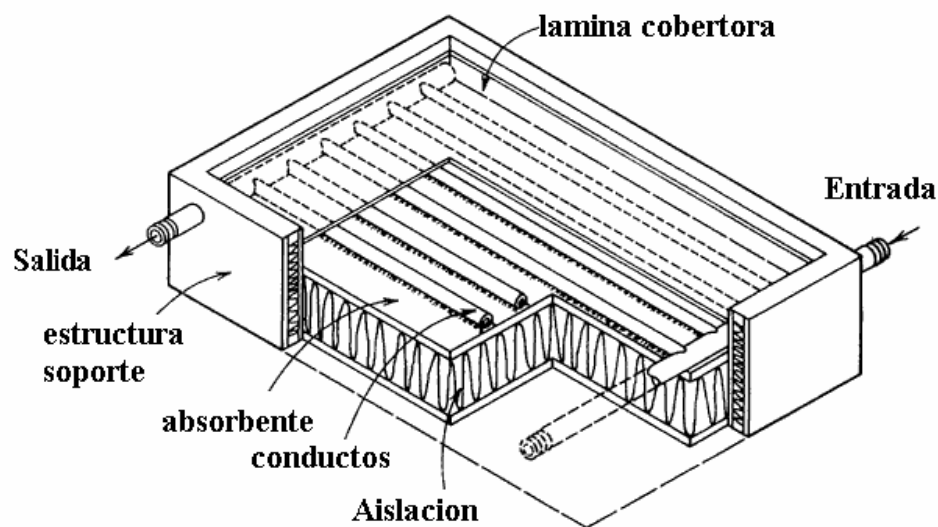


Figura 23: típica composición y distribución del colector solar.[1]

### 3.1.1 Materiales:

Un típico colector solar plano se observa en la figura 23. Cuando la radiación solar pasa a través de una cubierta transparente e incide en una superficie absorbente ennegrecida de alta absorción, una gran cantidad de esta energía es absorbida por el plano y transferida por medio del fluido, para ser almacenado o usado. La parte baja del plano absorbente está cubierta con un material aislante para reducir las pérdidas por conducción. Un diseño típico para los colectores solares son los tubos con cabezal. Otra alternativa son los diseños de serpentín. Este ultimo tipo de colector no presenta el problema de la distribución desigual del fluido en los diferentes tubos, pero los colectores tipo serpentín no pueden trabajar bien en el modo termosifón (circulación natural del

fluido). El plano adsorbente puede ser una sola lámina donde todos los tubos están fijos, o cada tubo puede quedar fijo en láminas separadas, como se muestra en la figura.

La cobertura transparente es usada para reducir las pérdidas por convección desde la placa absorbente a través de la restricción del paso de aire en la cámara compuesta por la placa absorbente y el vidrio. Este también reduce las pérdidas de radiación desde el colector por que el vidrio es transparente a la onda corta de radiación recibida por el sol, pero es casi opaca a la onda larga de radiación térmica emitida por la placa absorbente (algo así como un efecto invernadero).

La ventaja de los colectores de placa plana es que son económicos en su fabricación, recogen radiación directa y difusa, y están permanentemente en una posición, por lo que no requieren sistema de seguimiento del sol. Los colectores deben estar orientados directamente al ecuador, mirando al norte en el hemisferio sur. El ángulo óptimo de inclinación es igual a la latitud de la localidad, con ángulos de variación de  $10^\circ$  a  $15^\circ$  más o menos, dependiendo de la aplicación, de esta manera el sol debe estar perpendicular al colector en épocas de verano. Si la aplicación es de calefacción solar, luego el ángulo óptimo de funcionamiento es la latitud  $+ 10^\circ$ .

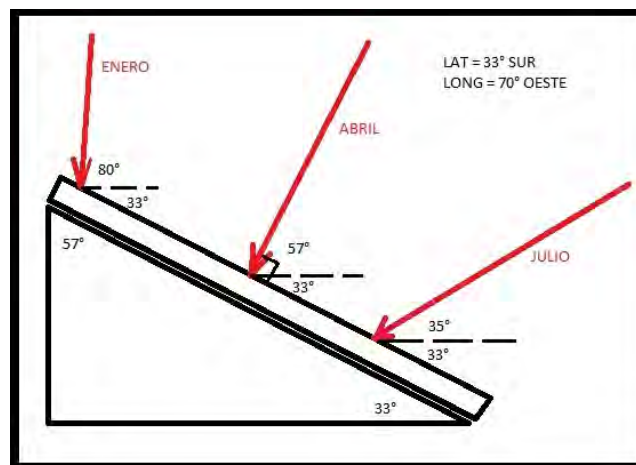


Figura 24: ángulo óptimo para Santiago, cuya latitud es de 33°S, se verifica que a medio semestre los rayos inciden perpendicular a la superficie del colector.

Tal como se vio en el capítulo 3, la trayectoria solar en verano para Santiago alcanza máximo 80° de altitud solar, en cambio en invierno alcanza los 30° como mínimo, para luego aumentar su altitud en los meses luego de agosto. La siguiente figura detalla el proceso de altitud solar para cada mes, durante el periodo de estudio.

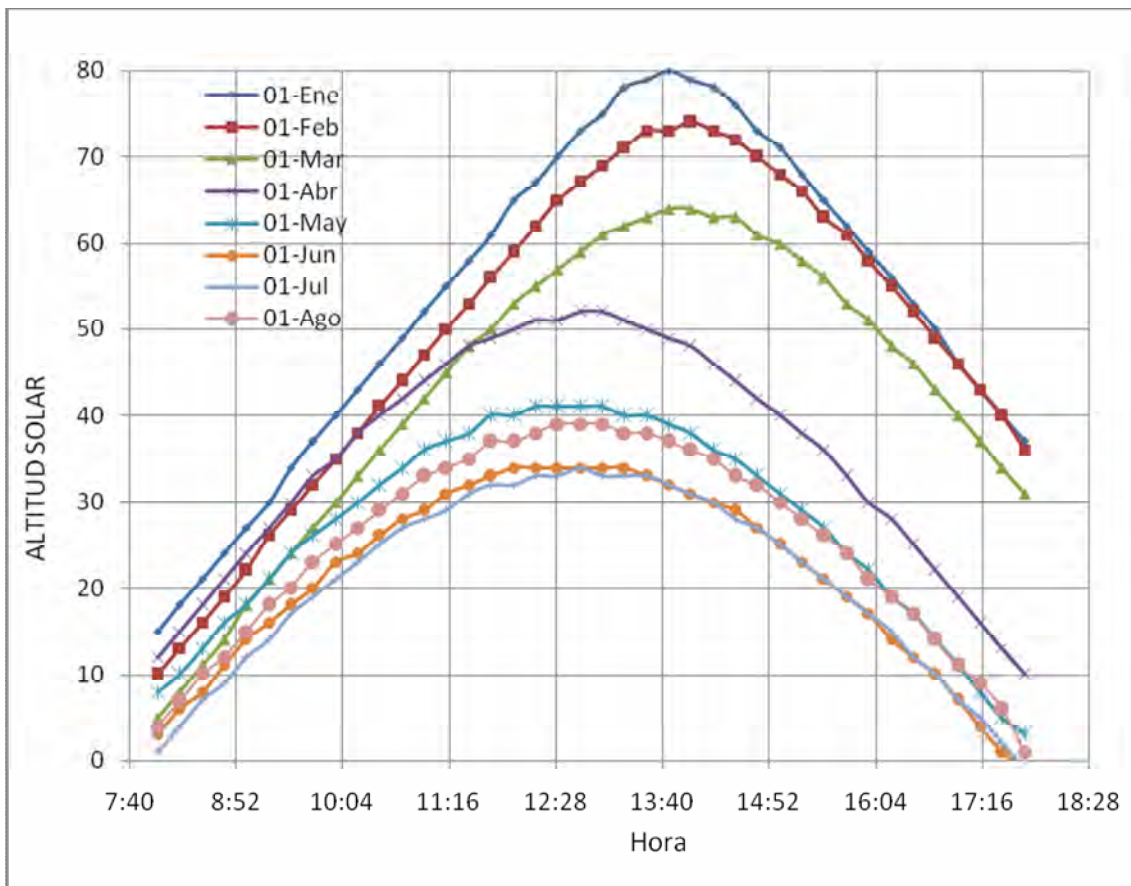


Figura 24: elevación solar es el valor máximo de las curvas durante el medio día solar, datos obtenido con el programa sunposition.info [8].

Los principales componentes de un colector solar plano, como se muestra en la figura 23, son los siguientes:

- Cubierta: uno o más laminas de vidrio o algún material que permita la transmisión de radiación.
- Pasajes para remover el fluido calentado: tubos, laminas delgadas, o pasajes que conducen o dirigen la transferencia de calor con el fluido desde adentro hacia afuera.
- Placa absorbente: plana, corrugada o placas ranuradas, donde los tubos, láminas delgadas o pasajes están unidas. Un típico método de unión es la fijación integrada mostrada en detalle en la figura. La placa esta usualmente recubierta por una capa de alta absorción y de baja emisión.
- Cabezales y colectores: tubos y ductos para admitir y descargar el fluido.
- Aislación: usado para minimizar las pérdidas de calor de atrás y de los lados del colector.
- Contenedor: encajonamiento que permite unir los componentes mencionados anteriormente y proteger el sistema de la suciedad, humedad u otro material.

Los colectores solares planos han sido construidos en una amplia variedad de diseños y de diferentes materiales. Han sido usados para calentar fluidos como agua, agua adicionada con anticongelante o aire. El mayor propósito es coleccionar la mayor cantidad de energía solar disponible idealmente al menor costo total posible. El colector además debe tener una vida útil muy larga, a

pesar de los efectos de la radiación ultravioleta y de la corrosión y acidez, alcalinidad, o dureza de la transferencia de calor por medio del fluido, deposiciones de suciedad o humedad en el vidrio o quiebres del vidrio debido a la expansión térmica, granizos, vandalismo u otras causas.

A continuación se detallan mas detalles de los materiales usados para la cobertura o la placa colectora.

- **Materiales para la cubierta:** el material más usado para la cubierta es el vidrio, puede transmitir cerca del 90% de la radiación solar de onda corta incidente y virtualmente no transmite nada de la radiación de onda larga hacia el exterior por medio de la placa absorbente.

Las laminas de plástico y filmes delgados también poseen una alta transmitancia a la onda corta. Sin embargo los plásticos tienen limitantes en que se deterioran con altas temperaturas, hasta pueden tener cambios dimensionales. Solo algunos tipos de plásticos pueden permanecer largos periodos intactos frente a la radiación ultravioleta solar. Sin embargo, los materiales plásticos no se pueden romper con piedras o granizos, y en forma de láminas delgadas poseen la ventaja de tener baja masa.

Los materiales comerciales disponibles de ventanas tipo invernadero tienen factores de transmitancia alrededor del 0.85 a 0.87 [1].

Las cubiertas antirreflectoras y las superficies texturadas pueden mejorar la transmisión significativamente.

El cristal debería admitir la mayor cantidad de irradiación solar como sea posible y reducir las pérdidas de calor. Ante esto, el vidrio es uno de los materiales virtualmente opaco a la radiación de onda larga emitida por la placa colectora, la absorción de radiación produce un crecimiento de la

temperatura del vidrio y pérdida de calor al medio ambiente que lo rodea por medio de radiación o convección.

Varios prototipos de colectores planos plásticos se construyeron y examinaron en los noventas. Son de bajo costo, se desarrollaron materiales aislados que soportan altas temperaturas, de esta manera la comercialización de estos colectores se hizo más factible. Sin embargo los colectores construidos a partir de materiales plásticos aun no han sido comercializados.

- **Placa absorbente del colector:** La placa absorbente del colector debe absorber la mayor cantidad de irradiación como sea posible a través de la cobertura, así como también las pérdidas deben ser mínimas hacia la atmosfera y hacia la parte trasera del encajonamiento(o caja). La placa absorbente debe transferir el calor al fluido de transporte. Para maximizar la colección de energía, el absorbente del colector debe tener un revestimiento que posea alta absorción para la radiación solar (onda corta) y baja emisividad para la re-radiación (onda larga). Una superficie referida son las superficies selectivas. La absorción del colector para onda corta de la radiación solar depende de la naturaleza y color del revestimiento. Usualmente se usa el color negro.

Mediante tratamientos electrolíticos o químicos, las superficies pueden producirse con alto valores de absorción ( $\alpha$ ) y bajos valores de emisividad ( $\epsilon$ ) de onda larga. Esencialmente una superficie selectiva consiste en una lamina delgada que es altamente absorbente a la onda corta de la radiación solar, pero relativamente transparente a la onda larga de radiación térmica, estas superficies poseen un depósito que es altamente reflectante y de baja emisión para radiación de onda larga. Las



superficies selectivas son importantes cuando la temperatura de la superficie del colector es mucho mayor que la temperatura del aire ambiente. La superficie mas económica es aquella que es pintada de negro; sin embargo, esta no es selectiva, y el rendimiento del colector es bajo, especialmente para operar en temperaturas 40°C mayor que la temperatura ambiente.

Un colector solar eficiente debe absorber la radiación solar incidente, convertirla en energía térmica, y entregar la energía térmica por medio de calor transferido al medio con el mínimo de pérdidas.

- **Construcción del colector:**

Para los colectores de calentamiento de algún fluido, los conductos deben estar integrados o firmemente unidos a la placa absorbente. Un problema ocurrente es obtener buenos sellos entre los conductos que llevan el fluido y la placa absorbente sin necesidad de incurrir en costos excesivos para trabajo o materiales. Los materiales más usados para la placa colectora son: el cobre, aluminio y acero inoxidable. Plásticos resistentes a la radiación UV son usados para aplicaciones de baja temperatura. Si toda la superficie del colector esta en contacto con el fluido para transferir el calor, la conductividad térmica no es importante. El coeficiente de pérdidas por convección es insensible al espacio contenido entre la placa absorbente y la cubierta en el rango de 15-40mm [1]. La aislación de la parte trasera del colector plano esta hecha de fibra de vidrio o alguna fibra mineral que no permita que el gas se escape a elevadas temperaturas.

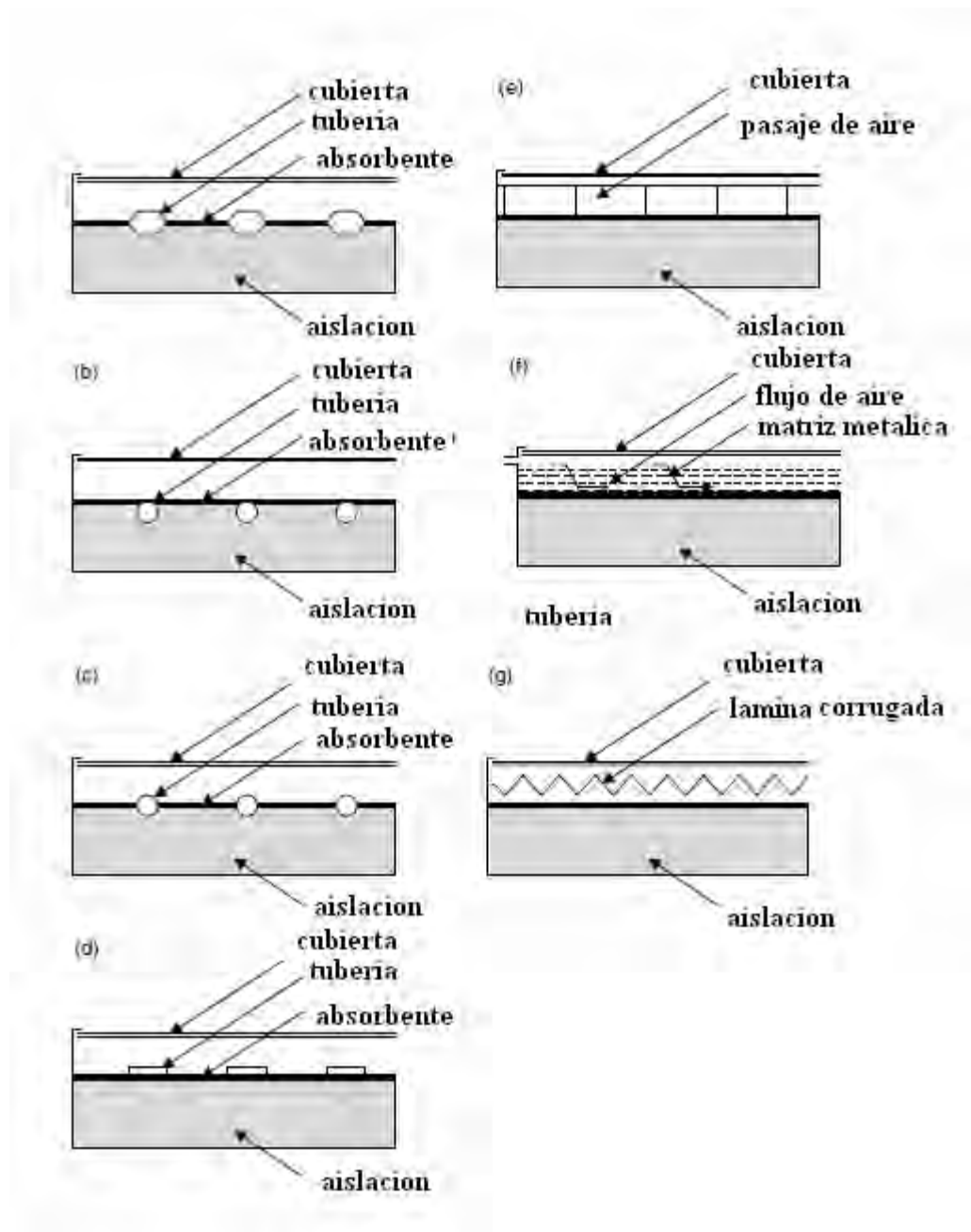


Figura 25: varios tipos de configuraciones de absorbente para colectores solares planos de agua y aire.[1]

La figura 25 muestra un número de aplicaciones de absorbentes para colectores solares planos para calentar agua o aire que han sido usados con variados grados de éxitos. Figura a muestra un diseño en que los conductos del fluido están integrados a la placa absorbente, de manera de minimizar las pérdidas térmicas.

Figura b y c es un diseño que muestra como los tubos del fluido están adheridos, soldados o unidos a la placa absorbente arriba o debajo de la placa absorbente. Los tubos de cobre se usan mayormente, ya que tienen una resistencia superior a la corrosión.

La figura d muestra el uso de un tubo rectangular, para obtener una área mayor de transferencia de calor entre el tubo y la placa absorbente. La soldadura suave y el cemento térmico se usan para realizar las uniones, pero se deben evitarlos defectos, ya que las altas temperaturas generadas por la placa absorbente, pueden fundir los materiales de unión.

La diferencia mayor entre los colectores basados en agua o aire es la necesidad de diseñar un absorbente capaz de superar la causa de los bajos coeficientes de transferencia de calor entre el aire y el absorbente solar. El aire u otros gases pueden ser calentados con colectores solares planos, para contrarrestar los bajos coeficientes de transferencia de calor entre el aire y el metal.

Figura f muestra el tipo de colector diseñado en esta memoria, el cual se fabrica de metal o matrices metálicas o como láminas delgadas corrugadas como en la figura g. El principal requerimiento para este tipo de colector es la gran superficie requerida para que el aire interactúe con el absorbente. La capacidad térmica del aire es mucho menor que la del agua, por ende una gran tasa o flujo de volumen de aire se requiere, resultando en grandes necesidades de bombeo.

### 3.2 Ecuación de balance energético y rendimiento:

**Balance energético:** El parámetro básico a considerar es la eficiencia térmica del colector. Esta se define como la razón o cociente entre la energía útil por la energía incidente en la apertura del colector. El flujo de energía solar incidente consiste en radiación directa y difusa, es decir radiación global. De esta manera los colectores solares planos pueden recolectar ambas radiaciones o la radiación global. Mientras los concentradores solo usan radiación directa.

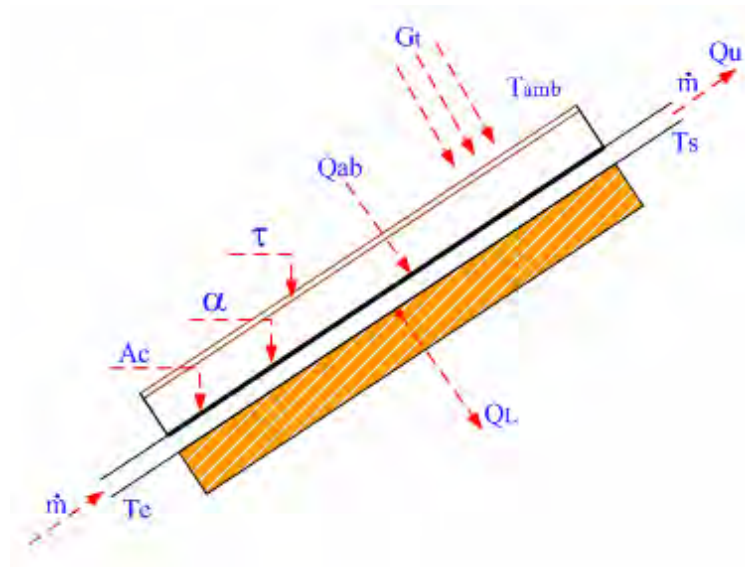


Figura 26: Balance energético de un colector solar plano [7].

El punto de partida para realizar el análisis de un colector solar es un simple balance de calor o energético, tal cual lo indica la figura 26, el calor colectado es igual al calor absorbido menos las pérdidas al medio ambiente:

$$Q_u = Q_a - Q_l \quad (24)$$

El calor absorbido es igual al producto del flujo de radiación  $G_t$  por la área  $A_c$  del colector y el producto de la transmitancia  $\tau$  y absorptancia  $\alpha$  de la cubierta de la placa absorbente, referida como la eficiencia óptica

$$Q_a = \tau \alpha * G_t * A_c \quad (25)$$

El calor perdido del sistema es el cual se pierde desde el colector a temperatura promedio  $T_p = (T_s + T_e)/2$  [7], (para [16] existe dificultad a medir  $T_p$ , por ello se debe tomar como  $T_p$  la temperatura de entrada del fluido al colector) hacia el medioambiente a temperatura  $T_a$ . Existen pérdidas desde los lados y parte trasera del colector por medio de conducción, otras pérdidas por medio de convección y radiación hacia la temperatura ambiente y por radiación hacia el cielo y alrededores. Se sugiere [2] un coeficiente de pérdida de calor del colector combinado  $U_l$ , mencionado en el capítulo II, de esta manera las pérdidas de calor se anotan como sigue

$$Q_l = U_l * A_c * (T_p - T_a) \quad (26)$$

Combinando los términos en la ecuación 24, se obtiene

$$Q_u = \tau * \alpha * G_t * A_c - U_l * A_c * (T_p - T_a) \quad (27)$$

Nota que la irradiación  $G_t$  es expresada como flujo de energía por unidad de área, mientras que el calor colectado o útil  $Q_u$  se expresa como la potencia colectada por toda el área  $A_c$ . Dividiendo la última expresión por el área del colector  $A_c$ , se verifica

$$q = \tau * \alpha * G_t - U_l * (T_p - T_a) \quad (28)$$

Donde  $Q/A_c=q$ . Donde  $q$  se define como el flujo de calor colectado (energía colectada por unidad de área). Esta última expresión es conocida como la ecuación de Hottel-Whillier, investigadores que fueron los responsables de esta formulación solar.

**Eficiencia del colector:** Se define la eficiencia del colector [2], como el cociente entre  $q$  y  $G_t$ . Es decir

$$\eta = \frac{q}{G_t} \quad (29)$$

El valor de la eficiencia usualmente se encuentra entre cero y uno, pero valores negativos de eficiencia resultan cuando el flujo de radiación no puede hacer frente a las pérdidas.

Así también, se puede obtener los valores de la eficiencia  $\eta$  en términos de las variables instantáneas de medición ( $T_a$ ,  $G_t$ ,  $m$ ,  $T_s$  y  $T_e$ ), cuando se refiere a convección forzada de algún fluido que transporta el calor obtenido por la irradiación solar dentro del colector, siendo la ecuación básica que describe tal transferencia de calor del fluido dentro del colector

$$Q_u = m \cdot c \cdot (T_s - T_e) \quad (30)$$

De esta manera la ecuación 24, queda de la siguiente manera

$$m \cdot c \cdot (T_s - T_e) = \tau \cdot \alpha \cdot G_t \cdot A_c - U_l \cdot A_c \cdot (T_p - T_a) \quad (31)$$

Y de esta forma se puede obtener una expresión para la eficiencia en función de las variables instantáneas de medición, considerando  $q=m \cdot c \cdot (T_s - T_e)/A_c$ ,

$$\eta = m \cdot c \cdot \frac{T_s - T_e}{A_c} \cdot G_t \quad (32)$$

O escrito de otra manera

$$\eta = \tau * \alpha - \frac{U_l(T_p - T_a)}{G_t} \quad (33)$$

### 3.3 Requerimientos estandarizados:

Como se menciona en párrafos anteriores, el rendimiento térmico de un colector solar puede determinarse mediante un análisis de las características ópticas y térmicas de los materiales del colector así como de su diseño o mediante experimentos de rendimiento. En general, las verificaciones experimentales de los colectores son necesarias y deben realizarse en todos los colectores construidos. En algunos países, el mercado de los colectores solares es permitido solo después de ensayos certificados en laboratorios certificados para proteger a los clientes.

En los siguientes párrafos, se describen una serie de procedimientos de ensayos para el rendimiento térmico de los colectores solares. Los mas conocidos son las ISO 9806 y las ANSI/ASHARE. Estos pueden ser usados para evaluar el rendimiento de los colectores solares planos y de los colectores solares concentradores. El rendimiento de los colectores solares se determina obteniendo valores instantáneos de eficiencia  $\eta$  para diferentes combinaciones de radiación incidente, temperatura ambiente y temperatura de salida del fluido. Todo esto requiere mediciones experimentales de la cantidad de radiación solar incidente sobre el colector solar así como también la cantidad de energía que posee el fluido que pasa a través del colector, todo ello bajo condiciones de estado estacionario o cuasi-estado estacionario.

Según [7] las condiciones para utilizar la metodología de evaluación de colectores solares en estado estacionario son:

- Radiación constante: es una situación bastante difícil de lograr, considerando que es un parámetro variable a lo largo del día, sin embargo dentro del medio día solar, la radiación se encuentra dentro

del mismo orden de magnitud. Por ende ya no son condiciones de estado estacionario, sino más bien de cuasi-estacionario. Según se pueden utilizar lámparas eléctricas incandescentes, realizando experimentos en laboratorio, pero estas lámparas no simulan toda la distribución del espectro solar, obteniéndose resultados no confiables.

- Variaciones de temperaturas constantes: al igual que en el caso anterior, evaluar un colector solar para funcionamiento en el medioambiente, es difícil de realizar, sin dejar de lado que frente a factores ambientales tales como el viento o incluso el punto de rocío, es difícil de tener condiciones de estado estacionario. Por ende las condiciones de estado cuasi-estacionario, cuyos únicos requerimientos son realizar mediciones dentro del medio día solar.

La ISO 9806 y el estándar ASHRAE, dan información en los ensayos de energía solar, usando un fluido de fase única y almacenamientos pequeños. La información permite detallar las características del colector bajo cualquier condición climática o de radiación.

El método para los ensayos de estado semi-estacionario esta bien documentado para colectores de vidrio en la ISO 9806. En estos ensayos, tal como se menciona en párrafos anteriores, las condiciones ambientales y del colector deben ser constantes durante el periodo de ensayos. Para localidades de días despejados y de ambiente seco, las condiciones de estado semi estacionario se satisfacen fácilmente, por lo tanto los ensayos toman algunos días, en cambio para algunas localidades los ensayos pueden tomar mucho mas tiempo que tan solo las épocas de verano.

Para los ensayos se requieren medir los siguientes parámetros:

1. Radiación solar global en el plano del colector  $G_t$ .



2. Temperatura ambiente  $T_a$ .
3. Temperatura del fluido a la salida.
4. Flujo del fluido  $m$ .

Existen dos tipos de ensayos que se pueden realizar, a circuito abierto o circuito cerrado, tal como lo muestra la figura 27. Para el caso de la memoria se trabaja a circuito abierto.

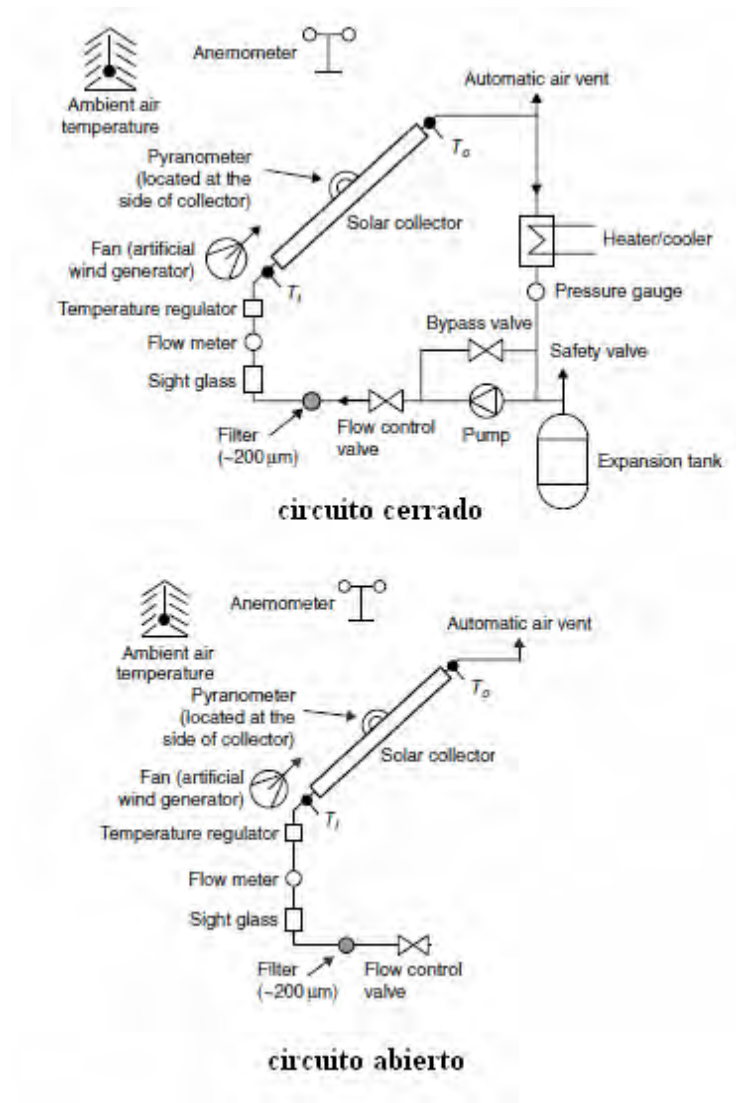


Figura 27: tipos de ensayos para colectores de vidrio [1].

### **3.3.1 Estándar para colectores solares de vidrio:**

Para caracterizar un colector de vidrio según la ISO 9806 se requieren ciertas condiciones ambientales:

1. Radiación solar mayor a 800 w/m<sup>2</sup> (se obtiene mayoritariamente en días despejados).
2. Reducir la velocidad del viento, se debe encontrar dentro de márgenes de 2 a 4m/s.
3. Flujos del fluido deben estar cercanos a 0,02kg/s.

### **3.3.2 Calidad de los colectores:**

Los materiales para la construcción del colector deben ser capaces de resistir, además de los efectos creados debido a la circulación del fluido (corrosión, depósitos de sarro, u otros), los efectos adversos de la radiación solar UV, y el colector debe tener una vida operativa de más de 20 años. Los colectores solares también deben soportar condiciones externas como el vandalismo. La mayoría de estos factores ocurre simultáneamente.

Según la ISO 9806, los colectores son requeridos para soportar un sin número de influencias, como altas presiones, altas temperaturas y penetración de lluvia. La lista completa de ensayos de calidad son:

- 1. Ensayo de presión interna:** principalmente para colectores que funcionan con agua como fluido intercambiador de calor.

- 2. Ensayo de resistencia a alta temperatura:** Este ensayo permite discernir rápidamente si el colector soportara altos niveles de irradiación solar para evitar fallas como quiebres del vidrio, derretimiento del plástico o deformaciones de la cobertura plástica.
- 3. Ensayos de exposición:** Este tipo de ensayo permite tener indicaciones de bajo costo en cuanto al envejecimiento del colector. Las condiciones bajo las cuales el colector debe operar deben ser similares a las que operara en futuro, es decir en el clima al cual será puesto en marcha. Para esto el colector debe operar e condiciones ambientales por un periodo de 30 días con las siguientes condiciones ambientales.
- 4. Ensayo de choque térmico:** La ISO 9806 enuncia que los colectores solares deben ser sometidos a repentinas e intensas lluvias, a días despejados, causando diferencias bruscas de cambios de temperatura. Esto permite demostrar la capacidad del colector para superar cambios repentinos sin ninguna falla. Se utiliza una manguera que entrega una cantidad uniforme de agua sobre el colector, durante 10 min, luego es enfriado con otro dispositivo durante 15 min, todo esto mientras esta operando.
- 5. Ensayo de resistencia a algún impacto:** Este ensayo permite demostrar la capacidad del colector de sobre llevar algún tipo de vandalismo o algún tipo de golpe que puede sufrir el colector durante su instalación. Para esto se utilizan bolas de acero de 150 g, para simular el efecto de caída o golpes sobre el colector. Los lanzamientos del impacto se realizan a no más de 5 cm de algún borde del colector o a menos de 10 cm de la parte superior. Se realizan 10 lanzamientos simultáneos, luego se realiza un nuevo ensayo, así hasta conseguir ver daño sobre el colector.

Otras referencias a la ISO, se remiten a continuación:

- ISO 12952: Durabilidad de la superficie absorbente.
- ISO 9495: Ensayos de envejecimiento para coberturas transparentes.
- ISO/TR 10127: Guía de selección de materiales para sistemas de calentamiento de agua.
- ISO 9553: Componentes de sellado usado en los colectores.

## Capítulo IV

## Diseño y construcción del colector

---

**4.1 procedimiento de construcción:** En vista de lo mencionado en el capítulo III, en cuanto a las características generales de los colectores solares y los materiales utilizados para su fabricación. Se mencionan a continuación el detalle de fabricación del colector a caracterizar. La referencia grafica la muestra la figura 28.

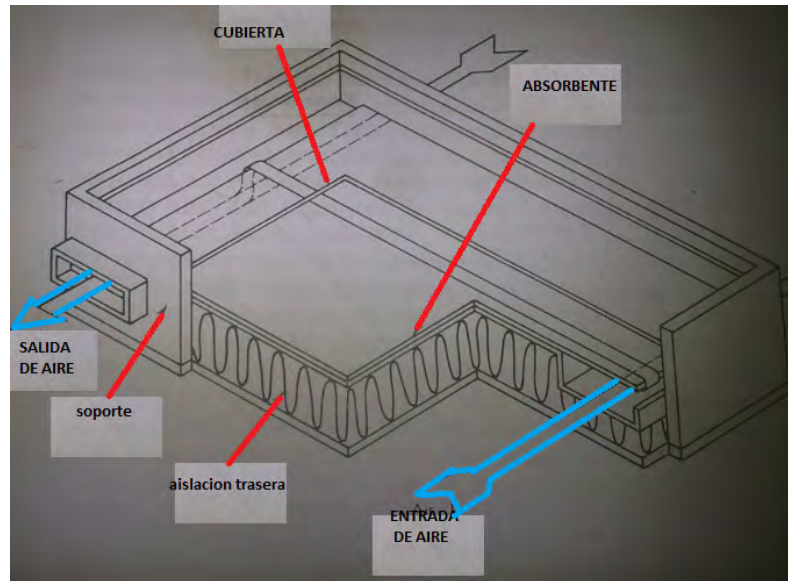


Figura 28: Ensamblado genérico de un colector de aire [1].

- 1. Estructura de soporte del colector:** La estructura del colector solar es generalmente fabricada de aluminio, acero o madera. Para este estudio se diseña a partir de acero inoxidable, principalmente por la accesibilidad de compra y por su alta resistencia a golpes y choques, sin dejar de lado su poder para resistir inclemencias del clima como la corrosión, según [1] pueden durar hasta 30 años. Se requieren perfiles tipo U para facilitar el montaje o desmontaje cuando sea requerido. Se utiliza un sellador de silicona entre las juntas del soporte y los otros componentes tal cual lo indica la figura 29. Como el colector estándar es de  $2\text{m}^2$ , se requieren 6 metros de perfil de tipo u de acero inoxidable de medidas  $0,85\text{mm}$  de espesor,  $10\text{ cm}$  de ancho y aletas de  $5\text{ cm}$ . No existe gran diferencia entre como se fabrica un colector hecho en casa y uno en una fabrica, mas que solo el hecho que en una fabrica posee mayor control de calidad, eficiencia y es una labor mas económica por las

automatización del proceso. Sin embargo, el colector fabricado en casa puede ser menos atractivo, pero es más económico, ya que no requiere ser transportado.



*Figura 29: soporte de la estructura de acero inoxidable.*



*Figura 30: perfil sellado con cinta aislante, silicona y tornillería.*

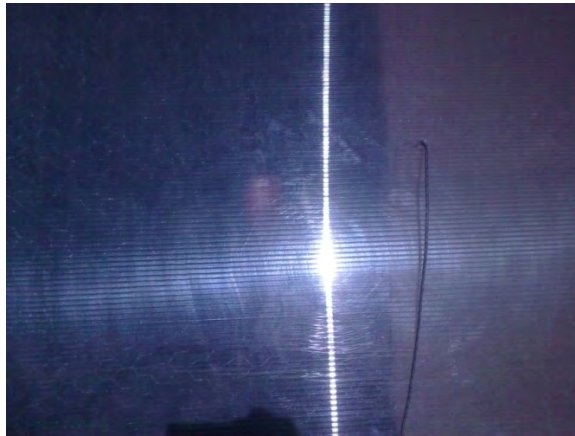
- 2. Cubierta:** El material debe poseer una gran transmisibilidad, el material más usado para la placa cubierta es el vidrio, a su vez es el material que requiere mas cuidados por su fácil fractura y poca resistencia a golpes. Para este caso se utiliza una cobertura hecha de policarbonato transparente, con transmisibilidad del orden del 90% (según especificaciones del fabricante) [6], su alta resistencia a golpes y su alta tolerancia a temperaturas sobre 130°C. Además, el policarbonato es flexible y ligero. Se requiere una lámina de policarbonato de 1x2 m.



*Figura 31: lamina de policarbonato ensamblada al soporte de metálico, sin absorbente.*

- 3. Placa absorbente del colector:** Como se menciona en el capítulo III, la placa absorbente es el material que permite la absorción de la radiación y transformación de radiación en calor, calentando el aire para los usos requeridos. Esta placa absorbente se compone de

viruta metálica como absorbente adherido a una lamina de madera masisa, para que el cambio o elevación de temperatura no sea brusca y queme el material aislante. La elección de la viruta metálica radica en su bajo precio, además de sus cualidades térmicas favorables para la conducción de calor.



*Figura 31: Colector con la mitad de absorbente, viruta metálica.*



*Figura 32: viruta metálica.*



- 4. Aislante:** El material más económico y accesible es el poliestireno, cuya marca comercial es el plumavit. Una de las desventajas de este material es su fácil combustión, sin embargo, como se menciona en el punto anterior se agrega a la placa absorbente una lamina de masisa, para frenar el calentamiento brusco del aislante, y evitar su degradación rápida.



*Figura 33: capas y etapas dentro del colector, se observa que el aislante de 6 cm de espesor esta protegido por la lámina de madera de 6 mm de espesor, el espaciado entre el policarbonato y la placa de madera es de 4 cm sin absorbente.*

- 5. Boquillas de polietileno:** Para inyectar o extraer el aire, se utilizan mangas de polietileno transparente. Para mantener una buena circulación del aire desde el extractor-inyector, y evitar las pérdidas por carga, las mangas de polietileno se modifican para instalarlas a la entrada y salida del marco del colector. La figura 35b, muestra un esquema de las boquillas.



*Figura 34: la boquilla de polietilenos, permite el intercambio de aire desde el exterior, en modo extractor o inyector*

**4.2 Metodología de trabajo:** Una vez dispuesto e instalado el colector mirando hacia el norte (figura 35 a), y ubicado en una zona donde no este sombreado. Se realizan los siguientes procedimientos de montaje y de trabajo

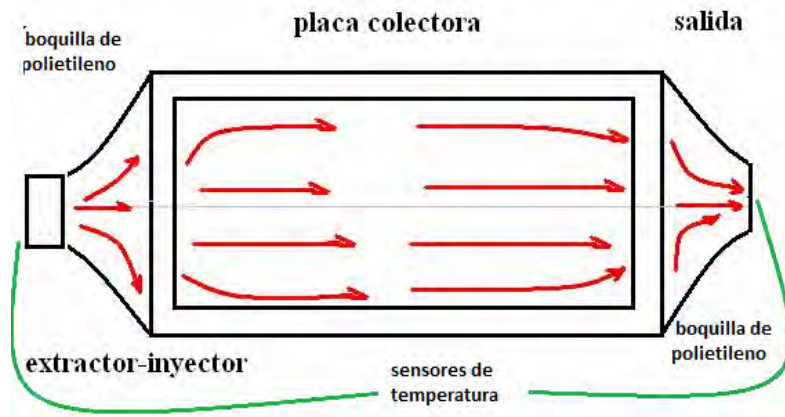


Figura 35 a y 35 b: a) Colector instalado sin material absorbente, b) disposición de sensores y forma general.



*Figura 36: colector instalado con la mitad de densidad absorbente.*

- 1) Instalar termocuplas ( anexo 1) a la salida y entrada del colector (figura 35 b), ubicar el anemómetro (anexo 1) para medir la velocidad de flujo dentro de la entrada de polietileno tal como lo indican los procedimientos de medición.
- 2) Instalar un medidor o sensor de radiación perpendicular a la radiación o sobre la superficie colectora (Piranómetro epley black and White , anexo 1).
- 3) Se realizan toma de datos solo los días despejados y a medio día solar, para obtener un estado cuasi estacionario. En cual debe incluir la altura solar, mediante el procedimiento de sombra de alguna

plomada o perfil vertical (figuras 36 y 37). De esta manera se indica el horario de medio día solar. Para cada día el colector debe estar inclinado en el ángulo complementario a la altura solar, para que los rayos solares incidan perpendiculares a la superficie. La figura 38, muestra el gráfico de cómo cambio la elevación solar durante el periodo de estudio además de la inclinación del colector, también se indica la comparación de la elevación solar con el programa “sunposition”, en promedio se midió la elevación solar cambia  $0.23^\circ$  grados por día, es decir cada 4 días cambia aproximadamente  $1^\circ$  [4].



*Figura 37: sombra del vertical a medio día solar, indicando el ángulo de elevación solar, el ángulo complementario es el ángulo de inclinación del colector.*



Figura 38: verificación de verticalidad.

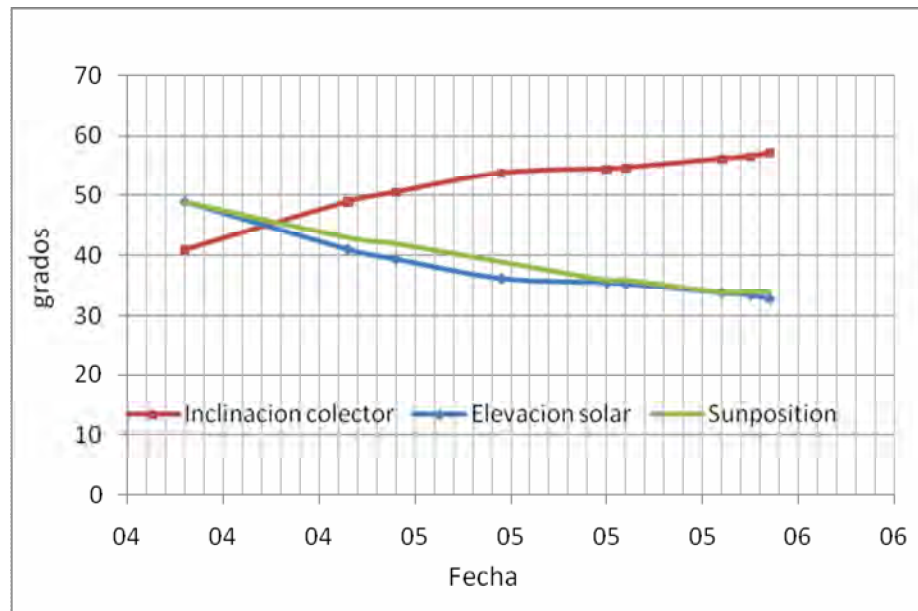


Figura 39: medición de la elevación solar para el periodo en estudio, además de la inclinación del colector para cada día, se compara con programa sun position, los datos reales están entre un 0 a 7% de error con respecto al programa[8].

- 4) La toma de datos se realiza durante periodos anteriores al medio día solar, una hora antes y una hora después, y durante intervalos de 2, 5 o 15 minutos, dependiendo del tipo de experimento realizado. Se recogen datos de temperatura de salida del colector  $T_s$ , temperatura ambiente  $T_a$ , radiación solar incidente en plano inclinado  $G_t$ , velocidad del aire  $v$  (m/s) dentro del colector para luego transformarla a flujo de aire  $m$  (kg/s), multiplicando la velocidad del fluido por el área de entrada a la placa absorbente y multiplicando por la densidad del aire que para el caso se considero fija (  $1,18 \text{ kg/m}^3$ ).



*Figura 40: Anemómetro usado para medir la velocidad y posteriormente el flujo de aire.*



Voltaje (Volts)	Velocidad (m/s) ±	Flujo (kg/s)
2,500	0,000	0,000
34,400	0,500	0,015
57,400	0,770	0,024
81,100	1,100	0,033
105,400	1,120	0,034
130,800	1,210	0,037

*Tabla 2: conversión de voltaje de alimentación al extractor-ventilador, en velocidad del flujo de aire medida por el anemómetro, a flujo de aire.*



*Figura 41: multímetro medidor de la temperatura ( anexo 1).*

5) Los experimentos se especifican a continuación:

- Experimento de variación de temperatura de salida con variación de flujo de aire: Experimento diseñado para determinar el flujo con mayores prestaciones dentro del tema general. Como el motor del extractor-ventilador se alimenta de una fuente de poder, los flujos están determinados en función del voltaje de entrada, tal como lo indica la siguiente tabla de conversión de voltajes a flujo. Por ende al variar el voltaje de alimentación del motor, se varía el flujo.
- Experimento de variación de temperatura de salida con variación de cantidad de absorbente dentro del colector: Este tipo de experimento determina cual es la cantidad de absorbente necesaria para utilizar el colector, de esta manera se puede establecer la necesidad de cubrir toda la superficie del colector o tan solo un área.
- Experimento de variación de temperatura según el modo de utilización (extractor o inyector): la finalidad de este experimento permite determinar o visualizar para cual modo se produce mayor o mejor rendimiento del colector.

- 6) Para mantener una buena resolución de datos, se realiza limpieza al colector, como lo estipula el estándar internacional, de tal manera de que el polvo o la suciedad en la cubierta de policarbonato no afecte el rendimiento del colector. Para ello se utiliza un paño húmedo y otro seco, se humedece la cubierta y luego se seca.
  
- 7) Obtenido los datos relevantes se adjuntan en planillas para su posterior análisis y cálculo de los parámetros involucrados en el fenómeno. Las variables involucradas  $T_s$  y  $T_a$  permite calcular el calor útil por unidad de área  $q$ , que se obtiene a partir de la ecuación (30). Como se mide la radiación solar global en plano inclinado  $G_t$ , este término divide a  $q$ , obteniendo la eficiencia  $\eta$  instantánea del colector, que es el valor importante y relevante de la investigación.
  
- 8) La premisa del trabajo es determinar  $\eta$ , para diferentes configuraciones o flujos del colector, es el parámetro que se utiliza para determinar el factor de conversión de energía solar en energía térmica, por ende es el único mecanismo de comparación frente a otras alternativas de producción de energía térmica.

## **Capítulo V Experimento de variación de temperatura con variación de flujo**

---

### **5.1 procedimiento experimental**

Para este experimento se realizaron ensayos en los que se vario el flujo del inyector, se tomaron datos cada 2 minutos en un periodo de 1 a 2 horas para diferentes días, se midió la temperatura de salida del colector, la temperatura ambiente, la radiación solar y el flujo de aire. La cantidad de absorbente cubre los 2m<sup>2</sup> del colector.

### **5.2 resultados**

Para algunos días del periodo de análisis, se entregan los siguientes gráficos de las variables involucradas.

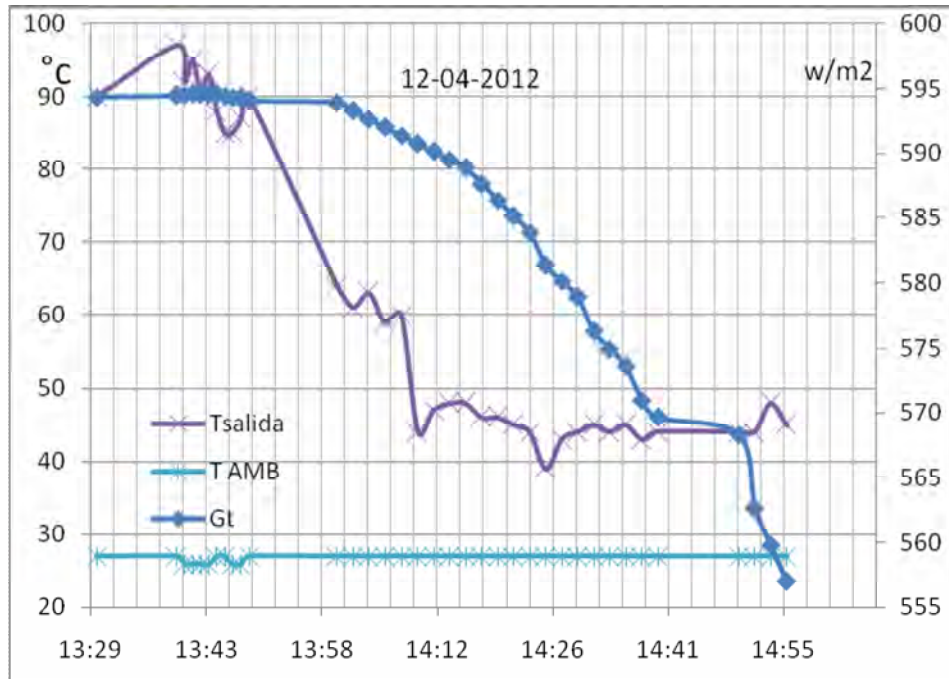


Figura 42: Grafico para el día 12 de abril, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector.

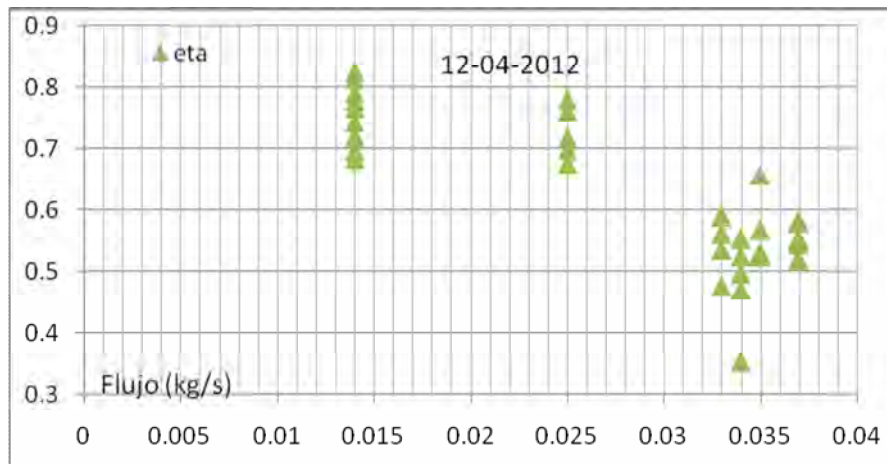


Figura 43: Grafico para el día 12 de abril, eficiencia del colector para diferentes flujos de aire.

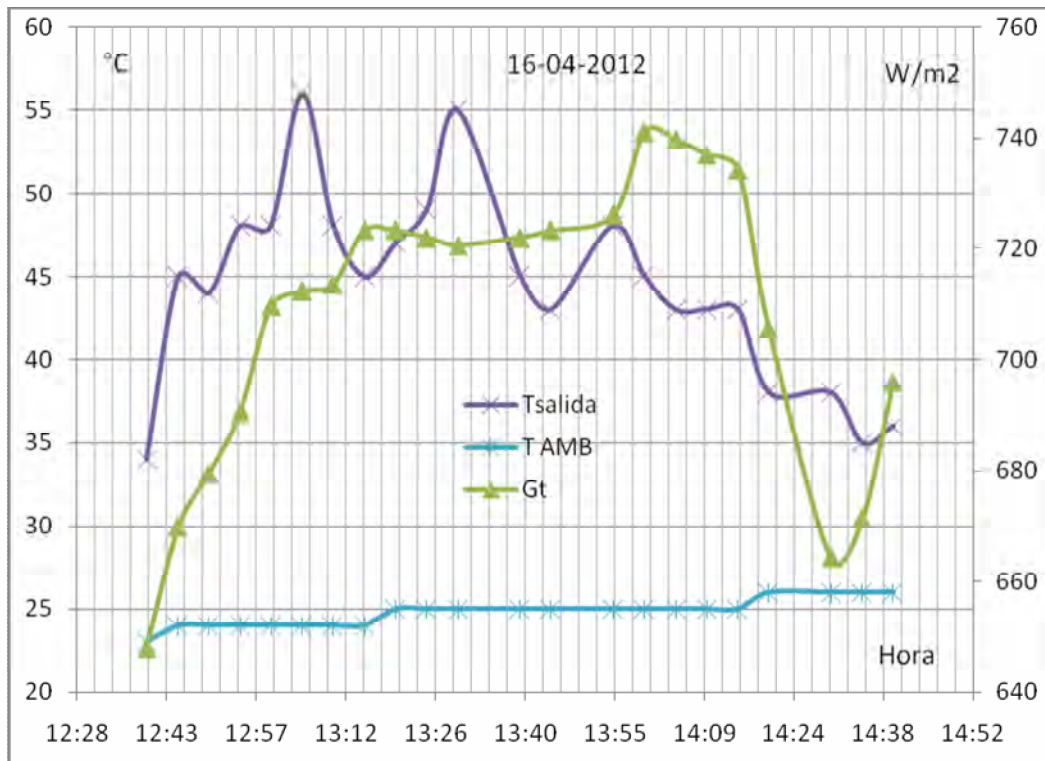


Figura 44: Grafico para el día 16 de abril, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector, colector debuto su funcionamiento entre las 13:30 y 13:45

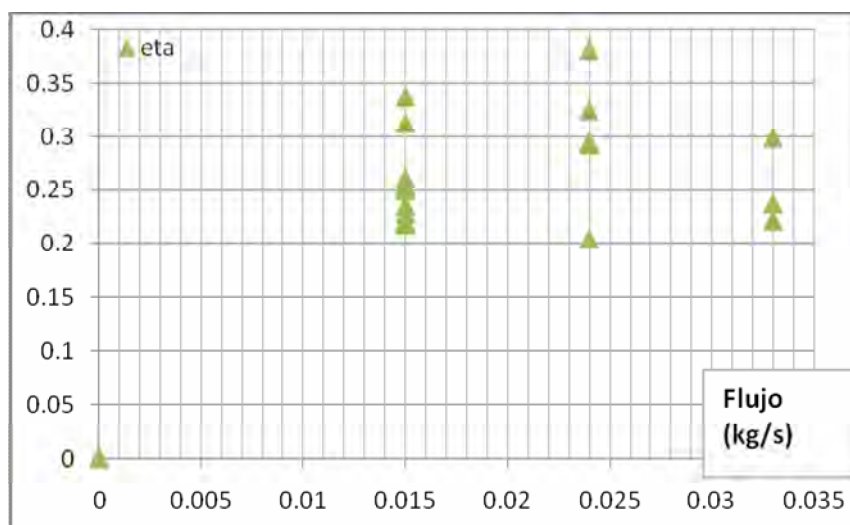


Figura 45: Grafico para el día 16 de abril, eficiencia del colector para diferentes flujos de aire, se verifica un aumento de eficiencia en flujos cercanos a los 0,025 kg/s, a diferencia de los días anteriores.

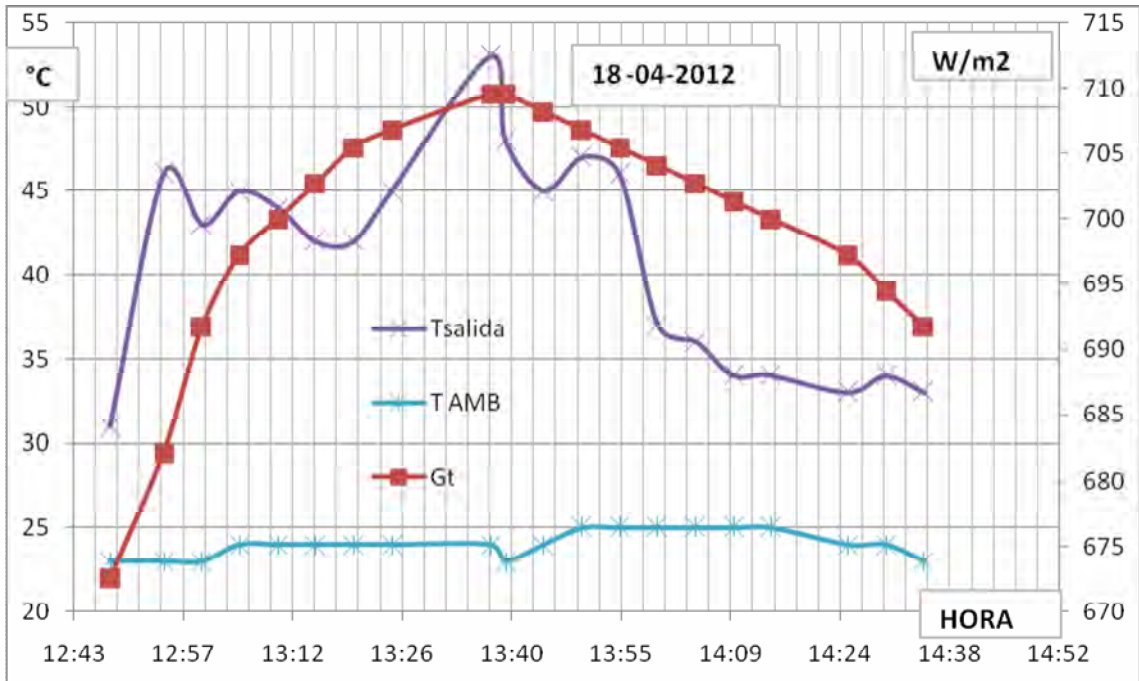


Figura 46: Grafico para el día 18 de abril, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector.

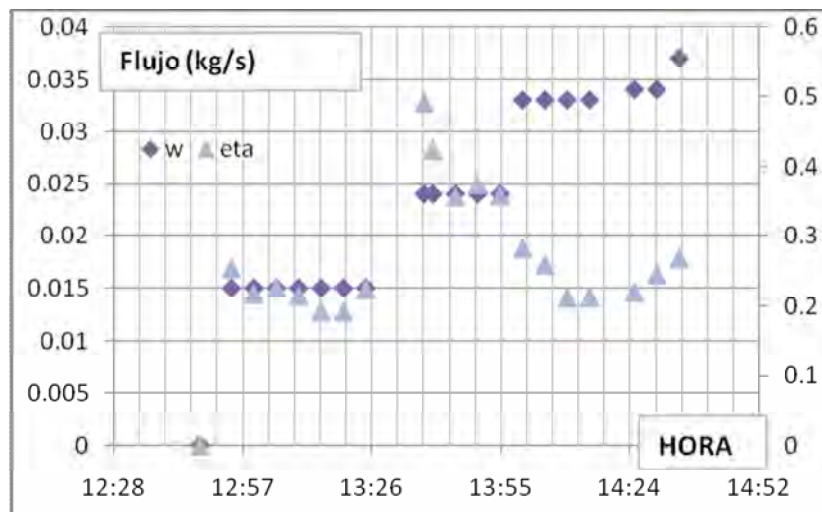


Figura 47: Grafico para el día 18 de abril, eficiencia del colector para diferentes flujos de aire, se verifica un aumento de eficiencia en flujos cercanos a los 0,025 kg/s.

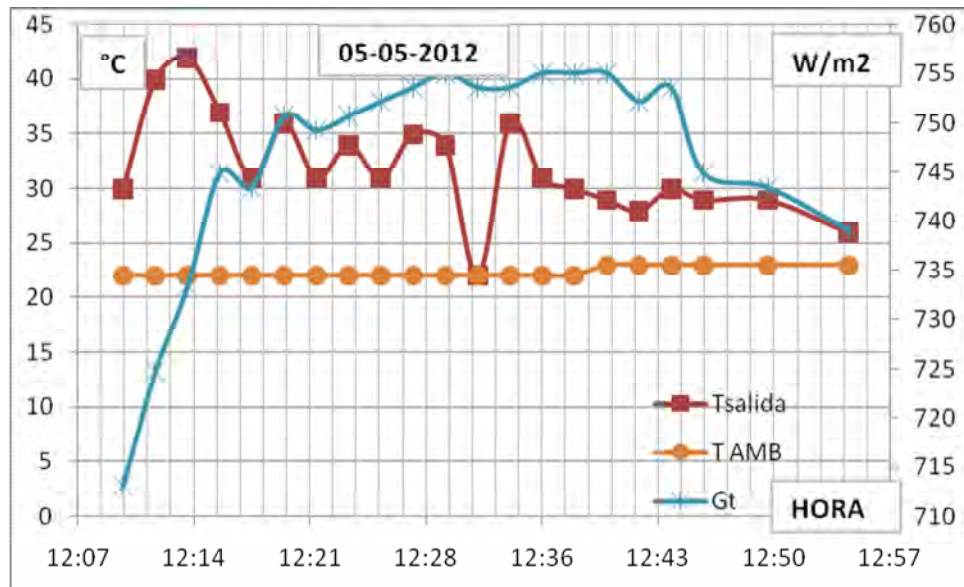


Figura 48: Grafico para el día 05 de mayo, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector.

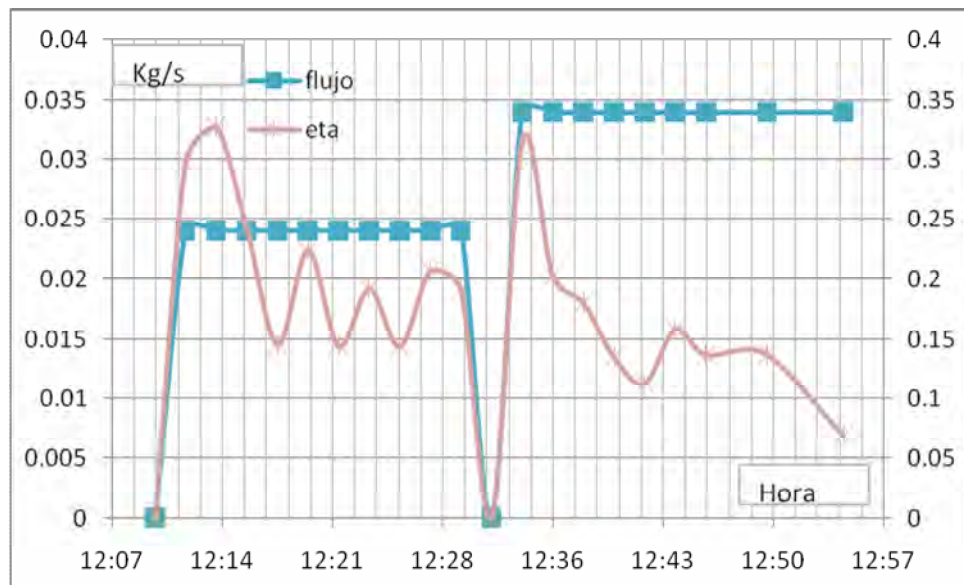




Figura 49: Grafico para el día 05 de mayo, eficiencia del colector para diferentes flujos de aire, se verifica un aumento de eficiencia en flujos cercanos a los 0,025 kg/s.

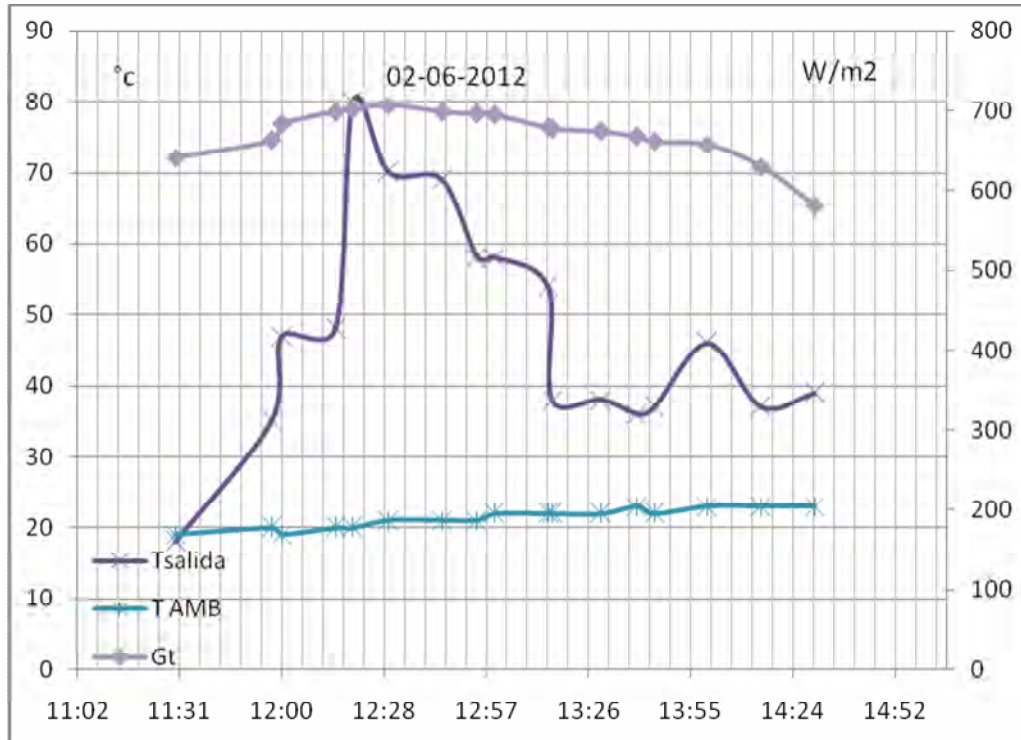


Figura 50: Grafico para el día 02 de junio, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector.

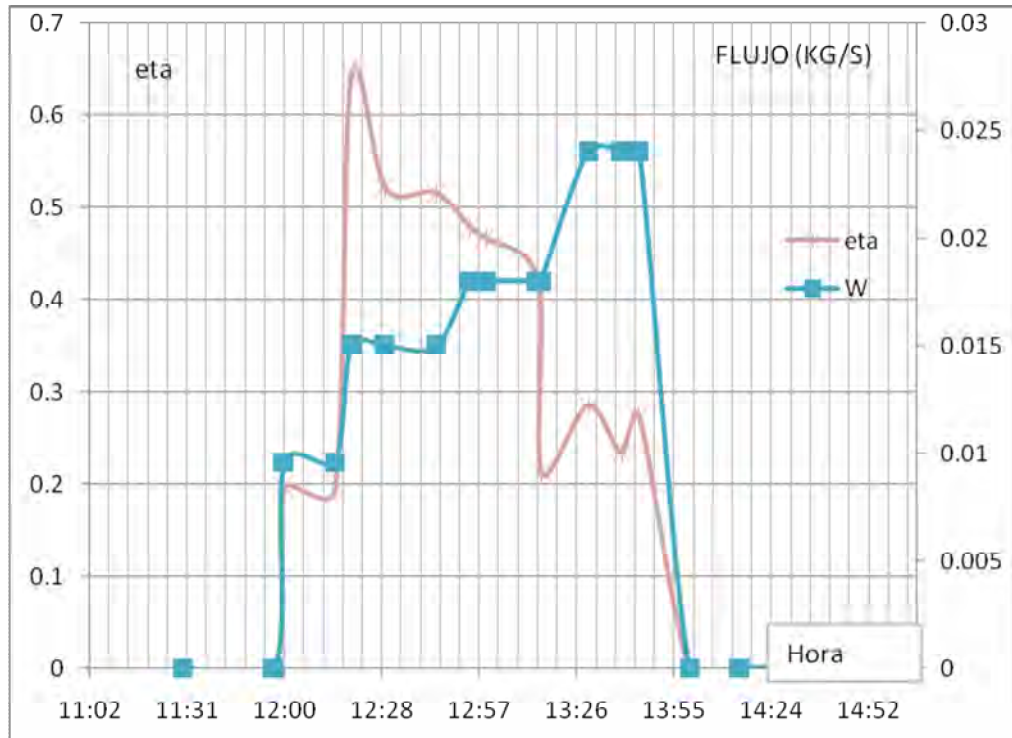


Figura 51: Grafico para el día 02 de junio, eficiencia del colector para diferentes flujos de aire.

### 5.3 Análisis de resultados

Observando los gráficos de temperatura de salida e irradiación (figuras 42,44, 46, 48, 50), se verifica que al aumentar el flujo de aire disminuye la temperatura de salida del colector. A su vez de las figuras de eficiencia y flujo (figuras 43, 45, 47, 49, 51), se observa que para diferentes flujos de aire existe un valor de eficiencia  $\eta$  diferente, en términos generales las mayores eficiencia se alcanzan para flujos cercanos a los 0,015-0,02kg/s cuya equivalencia es de 60 volt de alimentación. La eficiencia por día y flujo es la siguiente.

Flujo (kg/s)	12 abril	16 abril	18 abril	05 mayo	02 junio	$\eta$ , promedio
0,0096					0,2	0,2
0,015		0,26	0,23		0,56	0,35
0,025	0,53	0,3	0,37	0,21	0,24	0,33
0,034	0,45	0,25	0,27	0,17		0,23
0,037			0,2			0,2

Tabla 3: resumen de datos para experimento de temperaturas con variación de flujos.

Claramente en flujos cercanos a 0,015-0,02 kg/s, se obtienen las máximas eficiencias, notando que es un promedio de los datos obtenidos, tal cual lo grafica la figura siguiente.

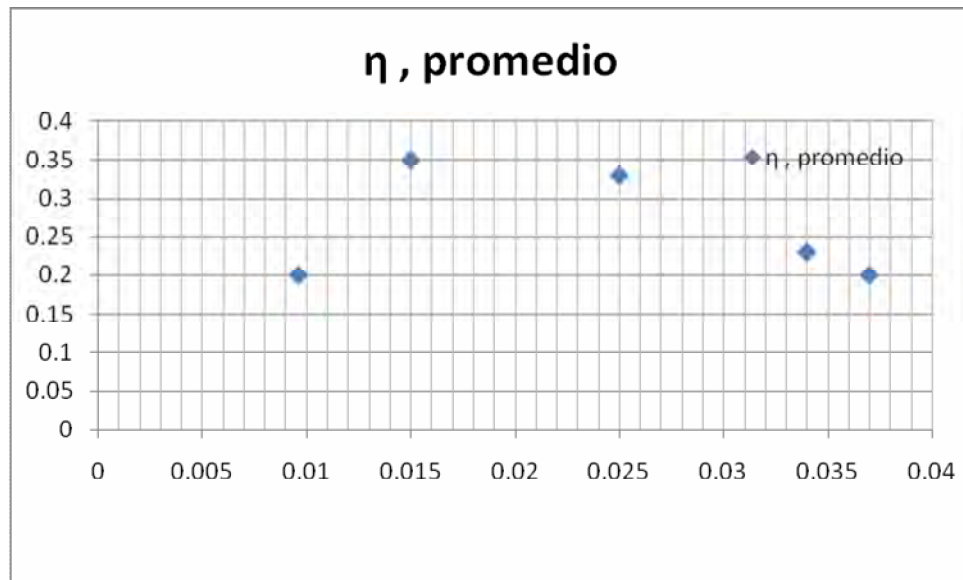


Figura 52: eficiencia del colector para diferentes flujos de aire.

## Capítulo VI Experimento de variación de temperatura con diferentes cantidades de absorbentes

---

### 6.1 procedimiento experimental

Para este experimento se realizaron ensayos en los que se vario la cantidad de material absorbente dentro del colector, es decir la viruta, el flujo esta en modo inyector, se tomaron datos cada 2 minutos o 5 minutos en un periodo de 1 a 2 horas para diferentes días, se midió la temperatura de salida del colector, la temperatura ambiente, la radiación solar incidente en el colector y el flujo de aire.

### 6.2 resultados

Para algunos días del periodo de análisis, se entregan los siguientes gráficos de las variables involucradas.

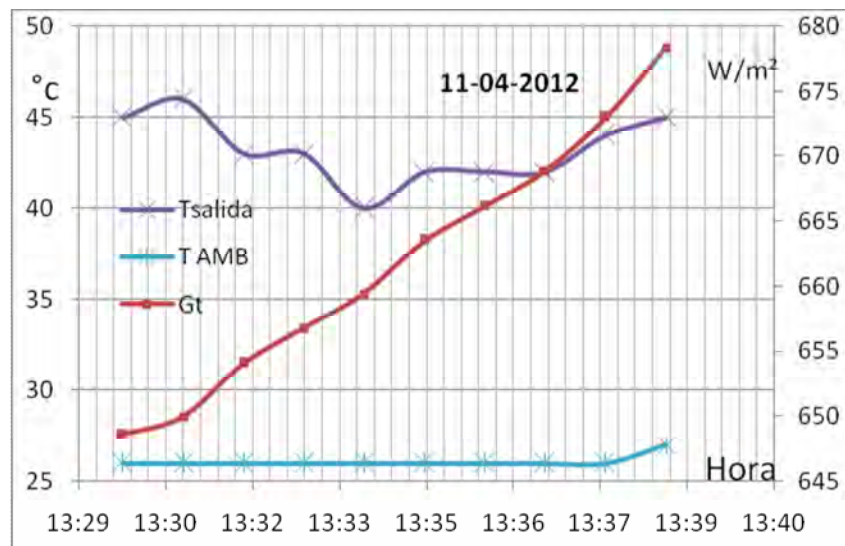


Figura 53: Grafico para el día 11 de abril, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector, área de absorbente de 0 gr, en modo inyección de aire.

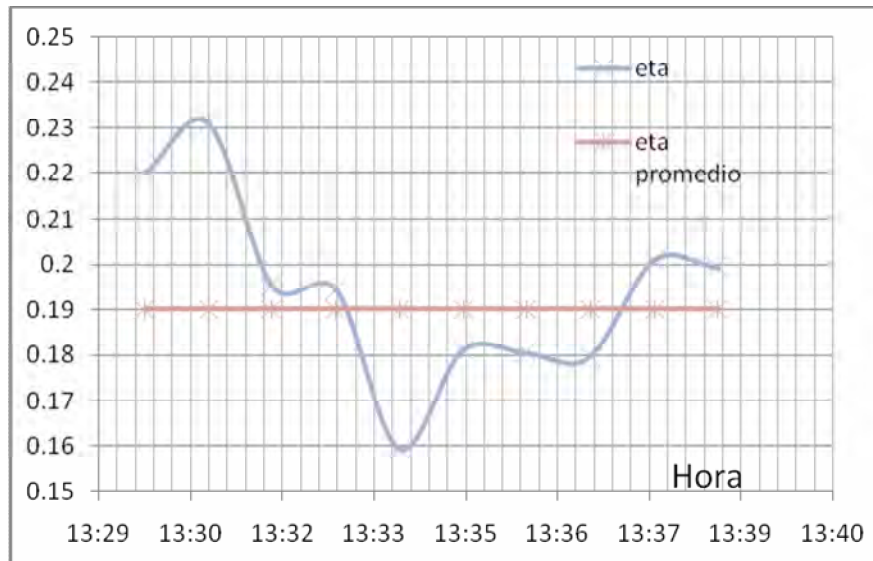


Figura 54: Grafico para el día 11 de abril, eficiencia del colector para flujo de 0,015 kg/s.

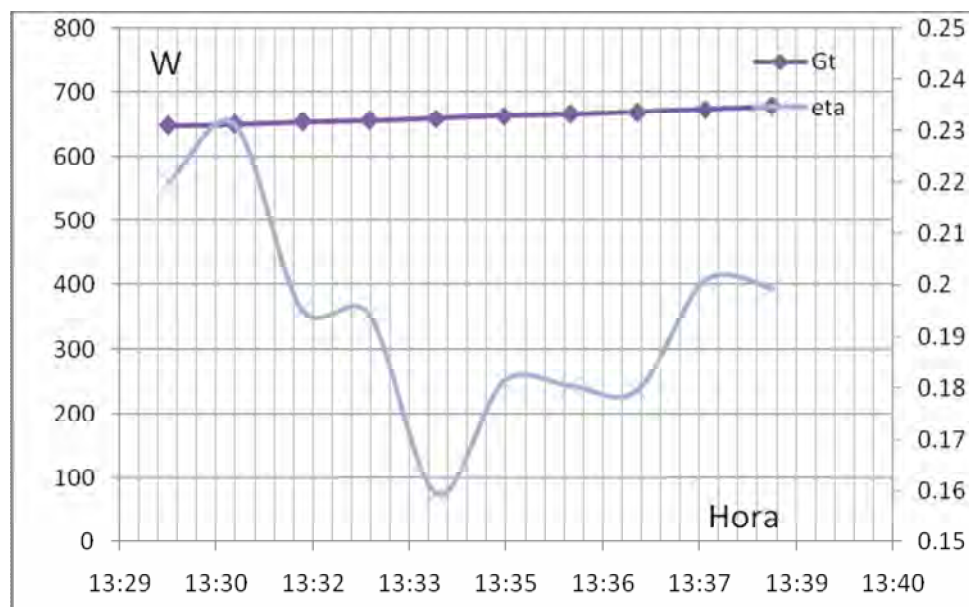


Figura 55: Grafico para el día 11 de abril, eficiencia del colector en comparación a la radiación incidente sobre el colector.

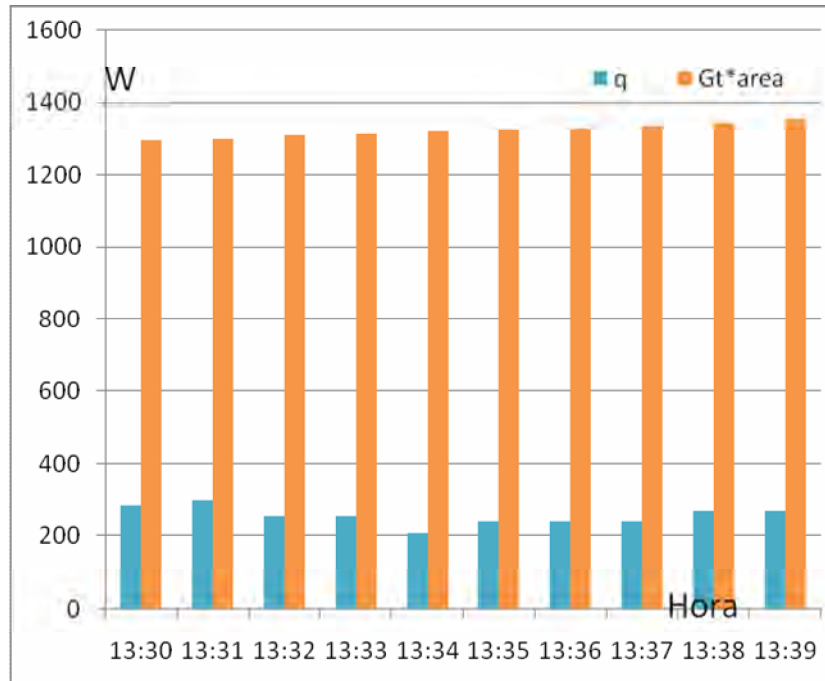


Figura 56: Grafico para el día 11 de abril, potencia incidente sobre el colector en comparación a la potencia útil.

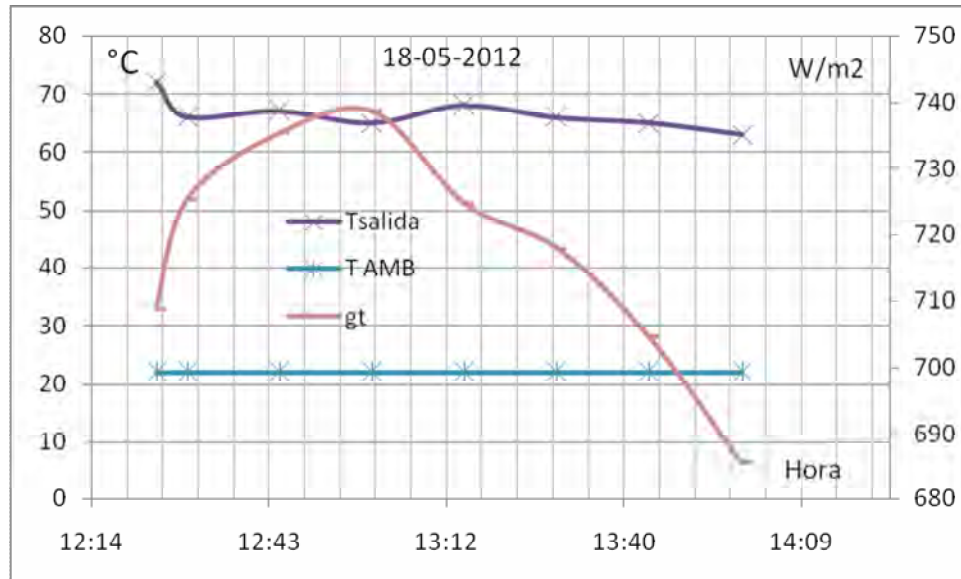


Figura 57: Grafico para el día 18 de mayo, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector, densidad de absorbente de 562gr, distribuidos uniformemente, en modo inyección de aire.

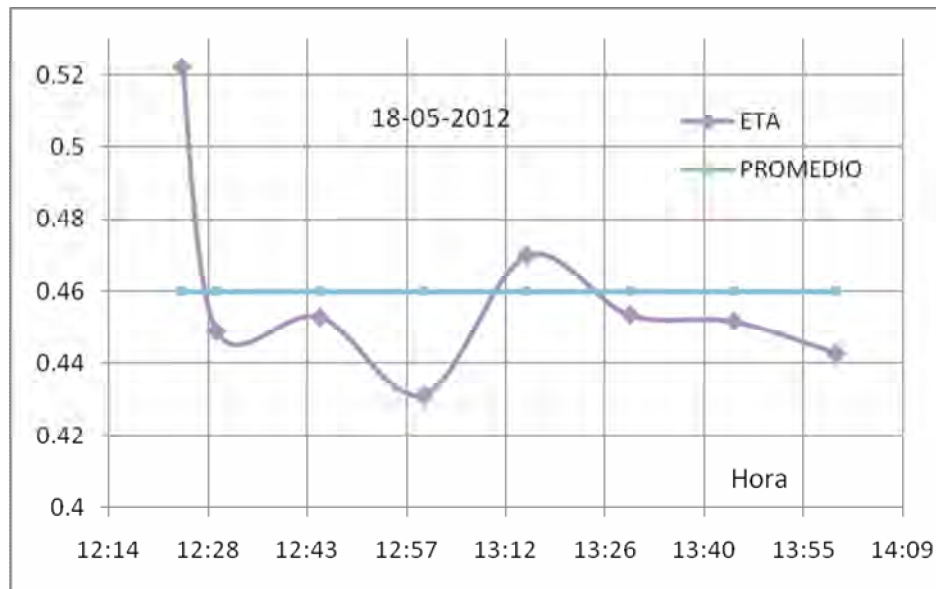


Figura 58: Grafico para el día 18 de mayo, eficiencia del colector para flujo de 0,015 kg/s.

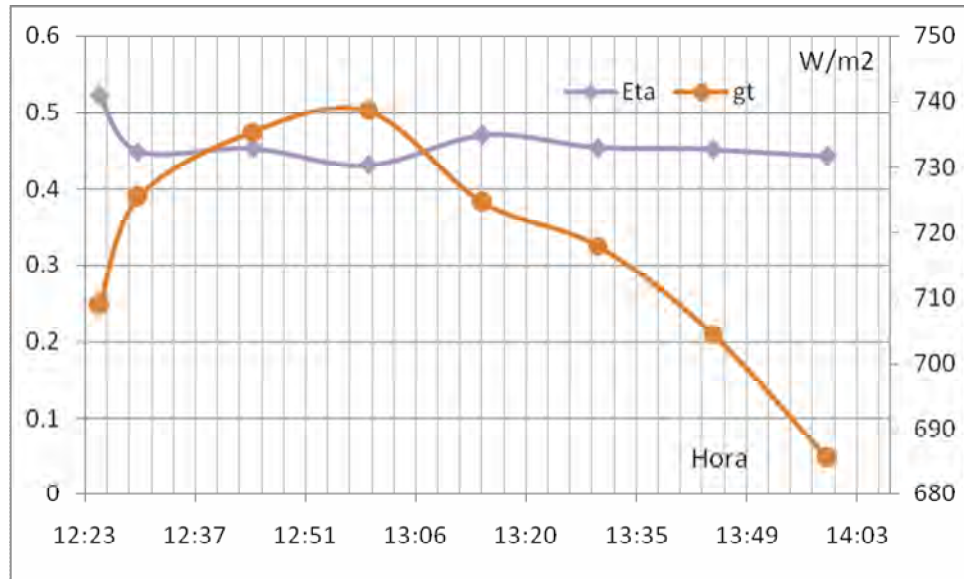


Figura 59: Grafico para el día 18 de mayo, eficiencia del colector en comparación a la radiación incidente sobre el colector.

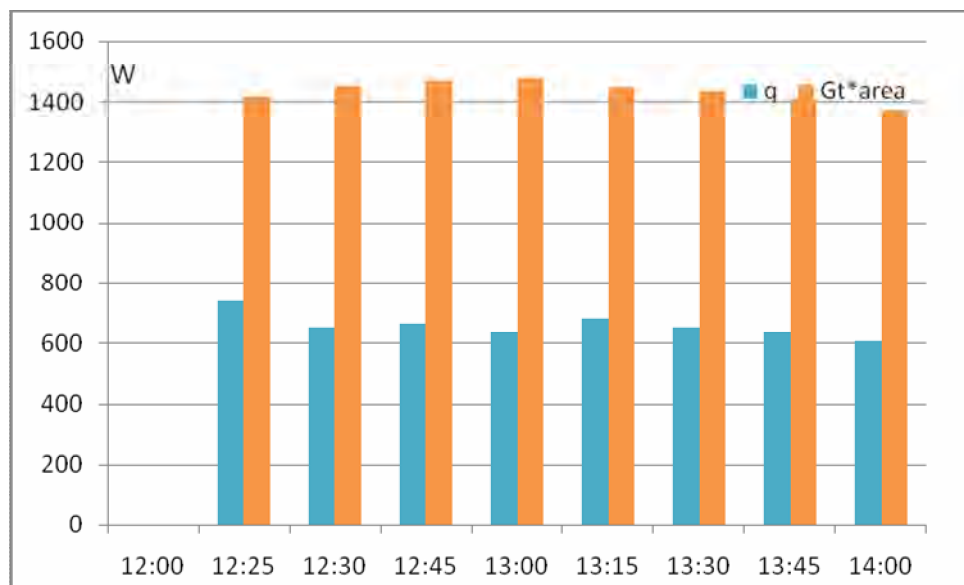


Figura 60: Grafico para el día 18 de mayo, potencia incidente sobre el colector en comparación a la potencia útil.



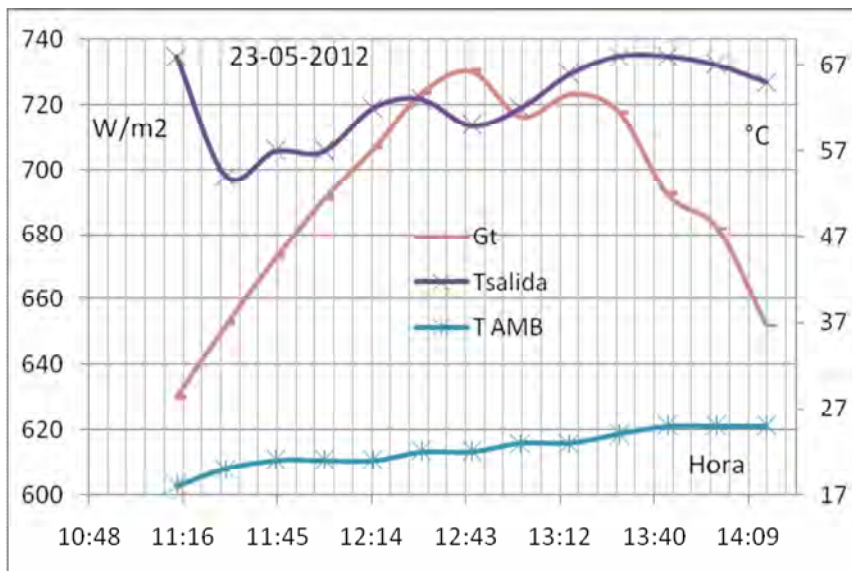


Figura 61: Grafico para el día 23 de mayo, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector, densidad de absorbente total de 1124gr, en modo inyección de aire.

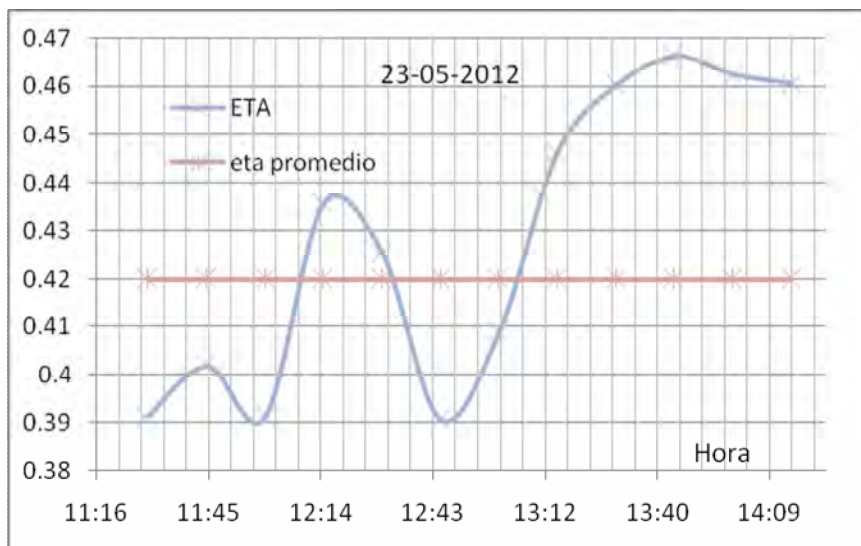


Figura 62: Grafico para el día 23 de mayo, eficiencia del colector para flujo de 0,015 kg/s.

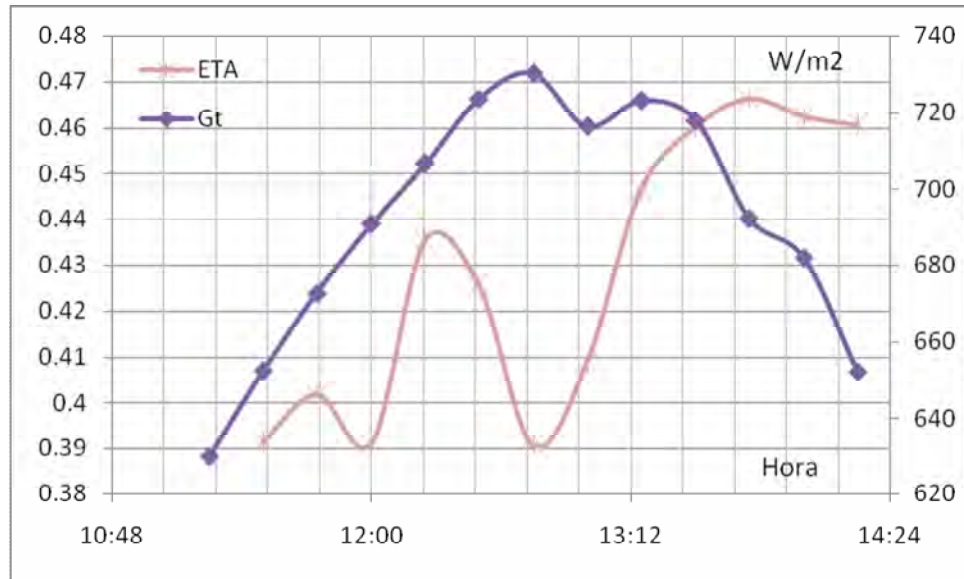


Figura 63: Grafico para el día 23 de mayo, eficiencia del colector en comparación a la radiación incidente sobre el colector.

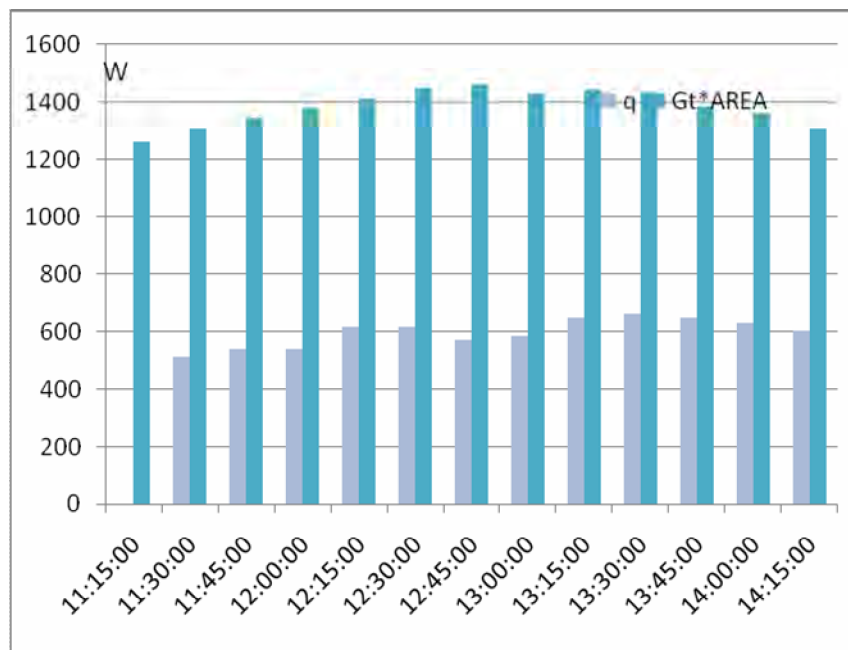


Figura 64: Grafico para el día 23 de mayo, potencia incidente sobre el colector en comparación a la potencia útil.

### 6.3 Análisis de los resultados

Para este experimento se mantuvo constante el flujo de aire a 0,015kg/s, determinado a partir del experimento anterior, como la zona con mejor eficiencia, sin embargo se comparan las eficiencias para diferente cantidad de absorbente dentro del colector. Los resultados obtenidos por día se resumen a continuación

Absorbente gr	Ts °C	Ta °C	q w	Rango de $\eta$	$\eta$ , Promedio
0	40-45	26-27	210-300	0,16-0,23	0,19
562	63-72	20-22	606-740	0,44-0,52	0,46
1124	54-68	18-25	510-660	0,39-0,47	0,42

*Tabla 4: tabla resumen para datos de variación de temperaturas en función de la cantidad de absorbente.*

Como se puede observar para la mitad de cantidad de absorbente dentro del colector, la eficiencia es mayor en 0,04 que para toda el área total cubierta con 1124 gr. Así también se puede apreciar que la temperatura de salida del colector se desfasa con respecto a la irradiación solar que incide sobre el colector. Para el día 23 de mayo con toda la superficie cubierta de 1124 gr de absorbente (2m<sup>2</sup>) el desfase es de aproximadamente 45 min, en cambio para el día 18 de mayo (562 gramos) el desfase es de 30 min, esto induce a deducir que la cantidad de absorbente funciona como una resistencia al flujo de aire introducido, y por ende genera una respuesta mas lenta cuanto mayor es la cantidad de absorbente.

De la tabla se puede observar que la cantidad de potencia útil q, es aproximadamente constante dentro de un rango para cada cantidad de absorbente, manteniéndose mas alta cuando existe la mitad de cantidad de absorbente.

## Capítulo VII Experimento de variación de temperatura con diferentes modos de operación

### 7.1 procedimiento experimental

Para este experimento se realizaron ensayos en los que se cambió el modo de ingreso del aire, para modo inyector el aire ingresa al colector y para modo extractor, el aire sale del colector, se tomaron datos cada 2 minutos o 5 minutos en un periodo de 1 a 2 horas para diferentes días, se midió la temperatura de salida del colector, la temperatura ambiente, la radiación solar incidente en el colector y el flujo de aire, para una superficie de absorbente con 562 gramos.

### 7.2 resultados

Para algunos días del periodo de análisis, se entregan los siguientes gráficos de las variables involucradas.

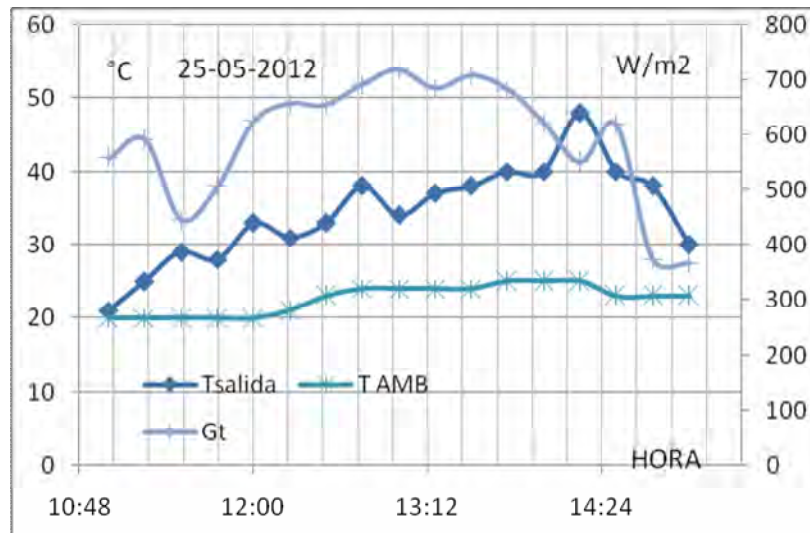


Figura 65: Gráfico para el día 25 de mayo, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colector, cantidad de absorbente 562 gr, en modo extracción de aire.

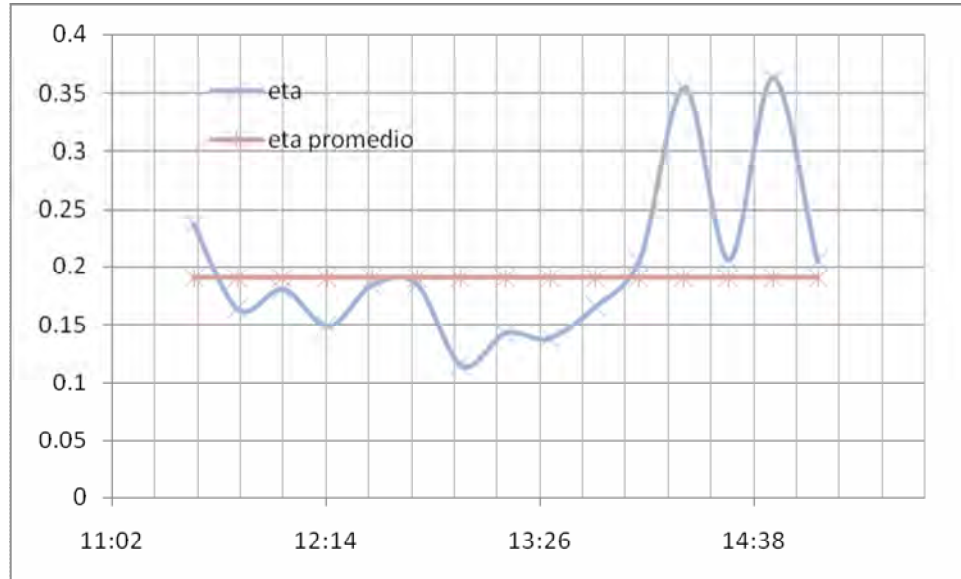


Figura 66: Grafico para el día 25 de mayo, eficiencia del colector para flujo de 0,015 kg/s.

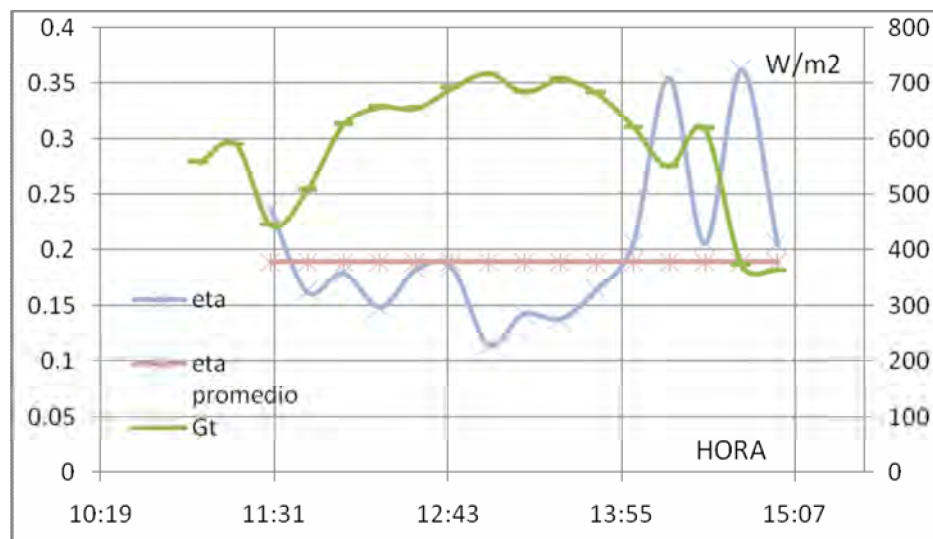


Figura 67: Grafico para el día 25 de mayo, eficiencia del colector en comparación a la radiación incidente sobre el colector.

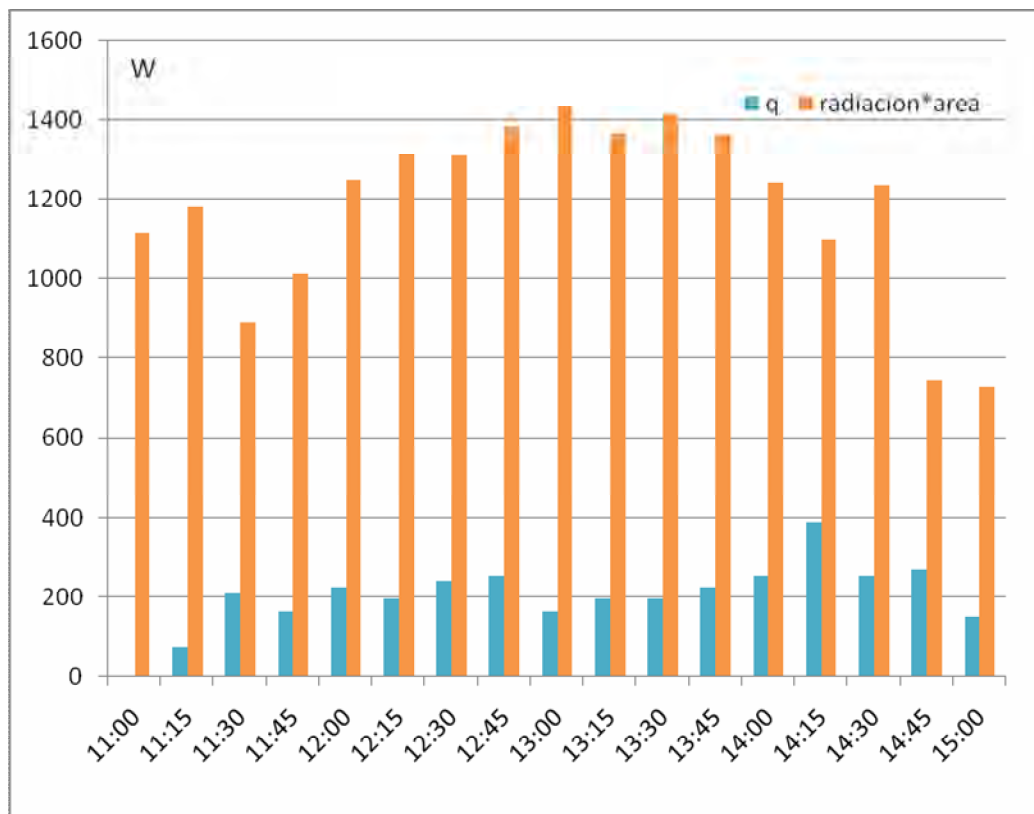


Figura 68: Grafico para el día 25 de mayo, potencia incidente sobre el colector en comparación a la potencia útil.

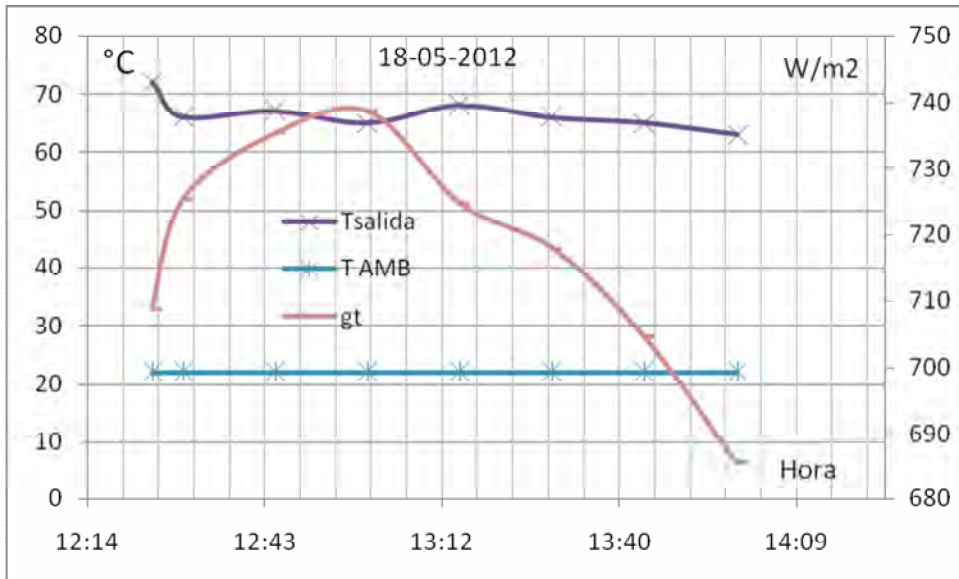


Figura 69: Grafico para el día 18 de mayo, temperatura de salida, temperatura ambiente, e irradiación solar sobre el colecto, cantidad de absorbente de 562 gr, en modo inyección de aire.

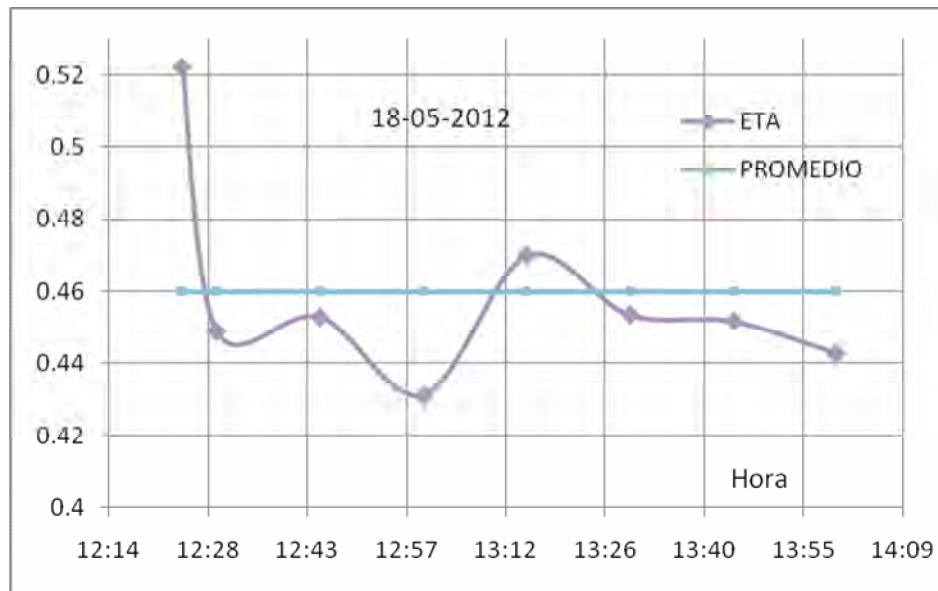


Figura 70: Grafico para el día 18 de mayo, eficiencia del colector para flujo de 0,015 kg/s.

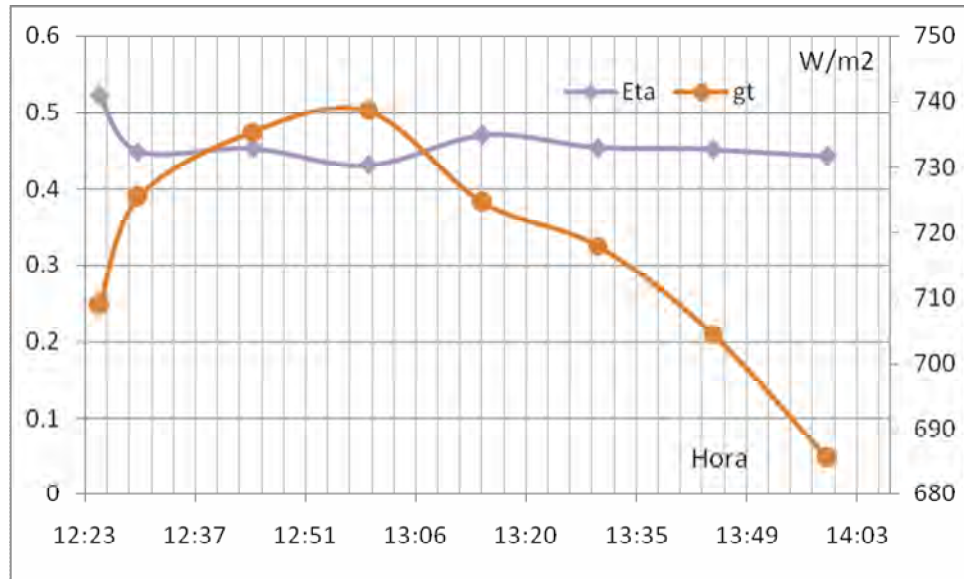


Figura 71: Grafico para el día 18 de mayo, eficiencia del colector en comparación a la radiación incidente sobre el colector.

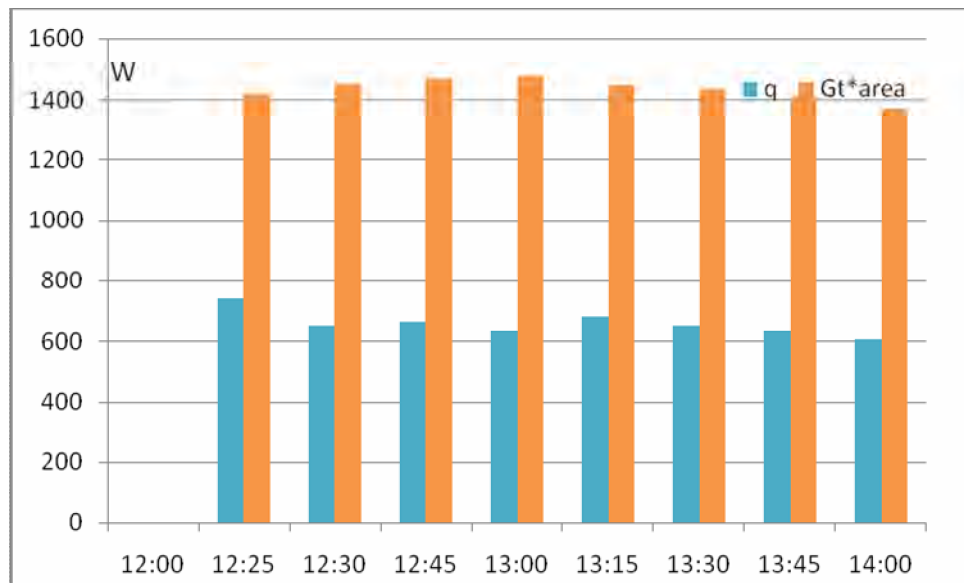


Figura 72: Grafico para el día 18 de mayo, potencia incidente sobre el colector en comparación a la potencia útil.



### 7.3 Análisis de los resultados

Para este experimento, se utiliza 562 gramos de viruta para comparar los dos modos existentes de transferir el calor por medio del aire: extracción e inyección. La información contenida en las graficas de datos anteriores se resume a continuación

Modo	Ts[°C]	Ta[°C]	Desfase radiación-Ts	Potencia W	$\eta$	$\eta$ , promedio
Extracción	20-48	20-25	45min	75-390	0,11-0,36	0,19
inyección	63-72	21-22	15min	606-740	0,43-0,52	0,46

*Tabla 5: eficiencia del colector para diferentes modos de transferencia de aire.*

Como se aprecia de los datos encontrados, el modo inyección posee mejor eficiencia, existe una conversión más rápida de energía solar en energía térmica ya que el tiempo de desfase es menor en 30 min con respecto al modo extracción. Esto último se debe a que el extractor-inyector, se encontraba mas cerca del área de absorbente y por ende este oponía resistencia al paso del aire que proviene del exterior. Estas observaciones se pueden visualizar en que la potencia útil es mas estable y no tan variable como en el caso de extracción, a su vez se determina que se alcanzan temperaturas de salida mas altas en inyección que en extracción.

## Capítulo VIII Comparación con otras alternativas de secado

---

### 8.1 Tabla comparativa

A continuación se resumen, los materiales y el costo de cada materia prima para fabricar el colector. A su vez se entrega el costo total de fabricar un colector.

material	largo	ancho	canto	espesor	cantidad	costo por unidad	total
policarbonato	2	1		4	1	7965	7965
perfil tipo u de chapa laminada	3	10	5	0,85	2	2990	5980
lamina de masisa	2	1		6	1	2517	2517
polietileno(m2)	5	1			5	210	1050
extractor-ventilador					1	5500	5500
isopack plancha de poliestireno	2	1		50	1	2560	2560
costo total colector							25572

*Tabla 6: materias primas utilizadas para fabricar el colector solar de aire.*

El mercado de colectores solares de aire, para secado de fruta o calefacción, es casi nulo, solo se encuentran referencias en torno a colectores solares usados para secado en modos de investigación, por ende a continuación se enuncian

las empresas, colectores y alternativas relacionadas con el tema de investigación.

Modelo y empresa	descripción	Capacidad de calor	costo
SF031400, empresa inppa (Chile)	Secador de fruta de gran capacidad, adecuado para cantidades industriales, funciona con sistema de radiadores.	277000Kcal/hr	\$800.000
Paneles solar wall, conserval engineering inc. (EEUU)	Pared fachada que permite mejorar la ventilación interior, por medio de sistemas de ventilación. Paneles perforados de revestimiento metálico	75% de eficiencia	-
Secadores solares solar wall. (EEUU)	Sistemas de igual tecnología anterior, pero funciona para grandes cantidades ubicadas en techos o en granjas, donde se puede usar el calor del sol o el de algún quemador	500 W/ m2	-
Colector solar de aire OS1 <a href="#">Zhejiang Oscar New Energy Co. Ltd</a> (China)	Sistema para aire acondicionado, al igual que el resto de los modelos, es solo un dispositivo para mejorar la calefacción.	-	\$50000- \$150000
Colector solar CPS-KQJRQ-2 <a href="#">Shenzhen Commonpraise Solar Co. Ltd</a> (China)	Sistema de funcionamiento similar al anterior. Una caja es calentada por radiación solar.	Temperaturas del orden de 30-80°C	\$75000- \$200.000

*Tabla 7: diferentes alternativas de secado de fruta industrial, o calefacción solar, mercado Chileno y extranjero.*

## 8.2 Análisis Costo-beneficio

De las tablas del párrafo anterior, se observa que todas las otras alternativas de secado y calefacción tienen un costo mayor que el costo de fabricar un colector solar como el presentado en este informe, se aprecia que las opciones de secado son para cantidades industriales de secado y que son solo opciones de sistemas de radiadores o sistemas de canales para que circule el aire caliente o vapor de agua, ya que no es sistema completo de fabricación, y en general se utilizan en hornos, a excepción de solar wall que presenta un sistema de secado mediante canales y tuberías, que se pueden usar tanto como solares o usando algún tipo de quemador ( se descarta desde el punto de vista medio ambiental).

Las alternativas presentadas, son las mas conocidas en el mercado, tanto nacional (inppa) como internacional. Se verifica que el costo de un colector solar (chino) es el doble o 12 veces mayor a pedido, y que cubren un área menor, incluso las temperaturas de salida son del mismo orden que la del colector presentado en este informe, pero que no es utilizado con fines de secado, sino mas bien de calefacción.

Si se realiza un real análisis costo beneficio de la opción de un colector solar plano de aire de bajo costo, frente a las opciones de secado del mercado, basta con dividir el beneficio (calefacción o secado ) a obtener por el costo de obtener uno. Si se a todos se les da el valor 1 como beneficio ( esto quiere decir que cumplen con su función o beneficio), dejando de lado las cantidades productivas a obtener, que serian mayores en un secador de la empresa inppa, y dejando de lado el costo de obtención de un colector chino. Tan solo la razón entre el beneficio y el costo seria muy baja para las alternativas presentadas

frente al colector de bajo costo. Y esto se debe al alto precio que conlleva a obtener una alternativa de este tipo. Recalcando, que solo se esta mirando

Desde un punto de vista de costos, dejando de lado los niveles productivos que puede alcanzar cada alternativa.

En definitiva; existen otras alternativas a la aplicación del colector que son; poco accesibles (por el manejo de cantidad de especies a secar y la lejanía para obtenerla), de precios de ventas muy altos para una aplicación de secado sencilla y de poca información de su funcionamiento.

La principal finalidad de este trabajo consistió en fabricar y caracterizar el funcionamiento de un colector solar de aire aplicado a secado. Todo esto sugiriendo la metodología experimental de evaluación de colectores solares. Y de esta forma entregar resultados experimentales de la técnica detrás del funcionamiento de los colectores solares de aire de bajo costo.

El parámetro que determina la calidad de la fabricación y funcionamiento del colector es la eficiencia. Por ende el objetivo principal de la caracterización fue determinar este parámetro para diferentes ensayos.

El primer experimento determina para que flujo el colector es más eficiente, utilizando la metodología de evaluación se determino que el flujo comprendido entre 0,015 y 0,02 kg/s, son los valores de flujo para los que el colector obtiene mejor rendimiento. Sin embargo se debe notar que a partir del modelo (ecuación 33), a mayores flujos de aire se obtienen diferencias de temperatura entre el colector y el ambiente mas pequeñas, por ende las perdidas de calor son menores y el colector se encuentra en su mejor rendimiento. Esto no se aprecia en los datos principalmente por que el sensor usado mide temperaturas más altas, por ende no se pueden medir diferencias pequeñas en esa zona de la recta.

A partir del experimento del capítulo V, cuya finalidad es determinar qué cantidad de absorbente es más efectiva. El resultado es que no es necesario cubrir toda la superficie del colector con material absorbente, si no que basta con tan solo cubrir con 562 gr. Esto es debido a que la viruta metálica impide el paso del aire, generando gran resistencia, por ende a mayor cantidad de absorbente, la temperatura de salida del colector es menor (54-68°C), notando

en la tabla 4 que ese día existía una mayor temperatura ambiente (18-25°C). En definitiva este experimento determinó la cantidad de absorbente óptima para el colector de 562 gr otorgándole un valor de eficiencia de conversión de energía solar en energía térmica de 46%, logrando potencias calóricas en el rango de 606-740 W.

Finalmente, el último experimento, permitió reconocer si el experimento anterior, bajo las mismas condiciones (562 gr de absorbente y flujo de 0,015 kg/s), es eficiente solo en el modo inyección, o en el modo extracción también lo es. De esta manera se determina que el modo inyección es el más eficiente, ya que para el modo extracción (según tabla 5) se logra eficiencia del orden del 20%, en cambio para modo inyección del orden del 46%. Esto último se pudo ver influenciado por el mismo factor del párrafo anterior, que la viruta metálica genera resistencia al paso de aire, por ende como el extractor se ubicó en el extremo donde se dispuso la viruta, pudo ver afectado el rendimiento, pero esas eran las condiciones del experimento que se diseñó.

Para la caracterización normativa de los colectores, es común entregar la eficiencia del colector en función de la diferencia de temperaturas (ecuación 33), ya que es lo que demanda el mercado y las regulaciones internacionales. Para colectores de aire es muy poco lo que se conoce, generalmente en colectores de agua se entregan resultados de la recta de eficiencia en función de la razón entre la diferencia de temperaturas y la radiación solar incidente en el colector (que debe ser constante). En el anexo 2 se entregan resultados para todo el periodo, la recta de eficiencia del colector es del tipo  $\eta = 0,493 - 4,82 \Delta T / G_t$ . Con un nivel promedio de 730 W/m<sup>2</sup> de radiación solar incidente en el colector medida durante 10 días despejados a medio día solar. De esta manera se obtiene experimentalmente los resultados que caracterizan a un colector de aire, considerando que el fabricante especifica que el coeficiente de transmitancia  $\tau = 0,9$ , se puede obtener la absorbancia del colector o del

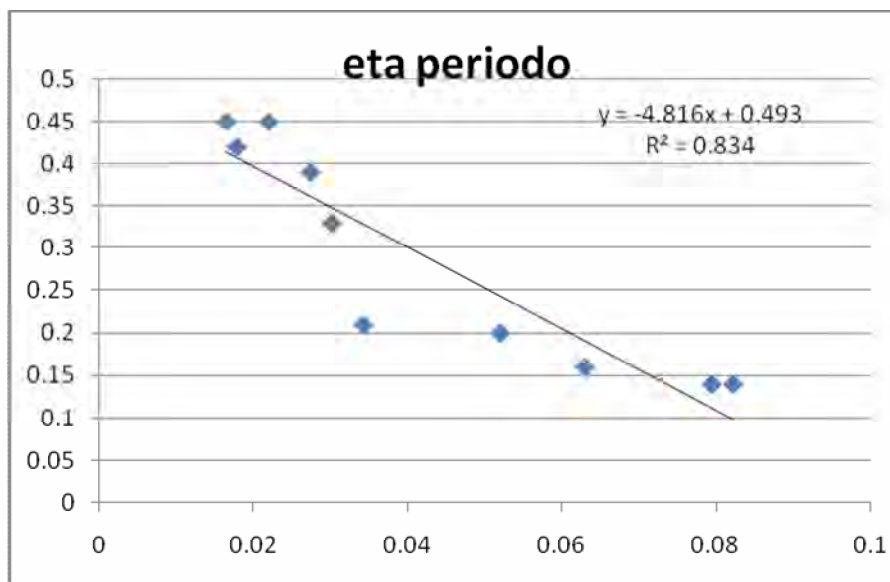
material absorbente  $\alpha = 0,55$  y finalmente se obtiene el coeficiente de pérdida de calor combinado de  $4,82 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ .

En definitiva, es concluyente que se dispone de un colector solar óptimo, económico y fácil de construir, con un buen grado de eficiencia de 46% en el modo inyección, logrando temperaturas de salida del orden de  $63\text{-}75^\circ\text{C}$  y potencias en el rango  $606\text{-}740 \text{ W}$ . Notando que se encuentra dentro del rango de eficiencias estandarizadas para colectores solares planos (capítulo I-colectores planos) entre 45%-65%. Sin dejar de lado que la facilidad de encontrar y comprar los materiales es oportuna para cualquier grupo familiar o micro empresarial. Además se determinan los flujos óptimos de trabajo para el colector  $0,015\text{-}0,02\text{kg/s}$  (según el estándar es de  $0,02\text{kg/s}$ ) y su conversión de voltaje de alimentación para el extractor-ventilador (tabla 2), que es lo que en definitiva utiliza el productor de secado de fruta para realizar la labor.



---

## Anexo 1



Anexo 2: Recta de eficiencia para el periodo de medición, medida a medio día solar por día, con radiación promedio de  $730 \text{ W/m}^2 \pm 20 \text{ w/m}^2$ , con variaciones de temperatura ambiente en el rango  $20\text{-}25^\circ\text{C}$ .