

# Colectores solares estacionarios

## Contents

- [8.1. Introducción](#)
- [8.2. Componentes de un colector de placa plana](#)
- [8.3. Análisis térmico de colectores de placa plana](#)
- [8.4. Rendimiento de colectores de placa plana](#)
- [8.5. Sistemas de agua caliente solares](#)
- [8.6. Referencias](#)

## MEC501 - Manejo y Conversión de Energía Solar Térmica

Profesor: Francisco Ramírez Cuevas

Fecha: 21 de octubre 2022

### 8.1. Introducción

Los colectores solares son un tipo especial de intercambiador de calor que absorbe la radiación solar, la convierte en calor y la transfiere a un fluido (usualmente agua, aire, o aceite). que fluye a través del colector.

Podemos clasificar a los colectores solares en dos tipos:

- **Colectores estacionarios.** Corresponde a colectores de eje fijo.
- **Colectores con concentración solar.** Se caracterizan por poseer superficies convexas para interceptar la luz solar y concentrarla en un área de absorción de menor tamaño. Estos colectores son equipados con un sistema de rastreo solar (eje móvil), para maximizar la captura de radiación solar.

Los colectores sin concentración son generalmente utilizados en aplicaciones que requieren calentar un fluido a temperaturas menores al punto de ebullición, ya sea para consumo domiciliario o calefacción. Los colectores con concentración, en cambio, permiten conseguir altas temperaturas, y se utilizan en plantas de generación de energía a través de un ciclo térmico.

En la siguiente tabla, presentamos una lista de los colectores solares más comunes clasificados por el tipo de movimiento del eje. Esto es:

- Estacionario
- Rastreo solar por un eje (un grado de libertad)
- Rastreo solar por dos ejes (dos grados de libertad)

Motion	Collector Type	Absorber Type	Concentration Ratio	Indicative Temperature Range (°C)
Stationary	Flat-plate collector (FPC)	Flat	1	30–80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50–200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1–5	60–240
Single-axis tracking	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	5–15	60–300
	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10–40	60–250
	Cylindrical trough collector (CTC)	Tubular	15–50	60–300
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	10–85	60–400
Two-axis tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	600–2000	100–1500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	300–1500	150–2000

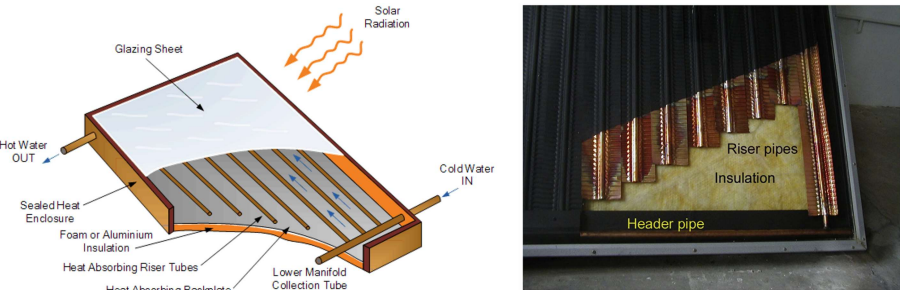
*Note: Concentration ratio is defined as the aperture area divided by the receiver/absorber area of the collector.*

En esta unidad revisaremos los aspectos generales de los colectores estacionarios.

Los más comunes son:

- Colector solar de placa plana (*Flat-plate collector* o FPC)
- Colector parabólico compuesto (*Compound parabolic collector* o CPC)
- Colector de tubo evacuado (*Evacuated tube collector* o ETC)

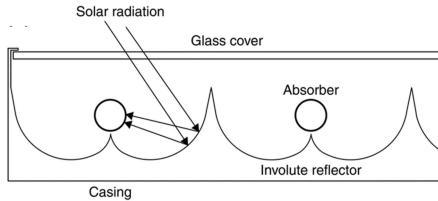
8.1.1. Colectores de placa plana (FPC)



Los colectores de placa plana se componen de un **absorbedor (absorbing blackplate)** para capturar la radiación solar. La energía absorbida es transferida a un fluido que circula por pequeños **tubos ascendentes (riser pipes)** en contacto directo con el absorbedor. Las entradas y salidas del fluido son capturadas por **tubos de cabecera (header pipes)** en la parte inferior y superior, respectivamente. Las partes laterales e inferior del colector están recubiertas con **aislante térmico** para reducir las pérdidas de calor. En la parte superior se utiliza una **cubierta transparente (glazing sheet)** para reducir las pérdidas por convección y radiación.

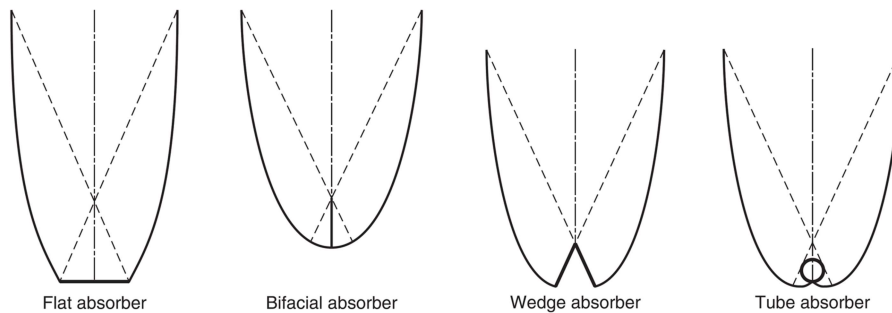
Los FPC son los colectores más comunes en el mercado debido a su bajo costo. Permiten capturar las componentes especular y difusa de la radiación solar, y logran temperaturas de operación entre 30 y 80° C

### 8.1.2. Colector parabólico compuesto (CPC)

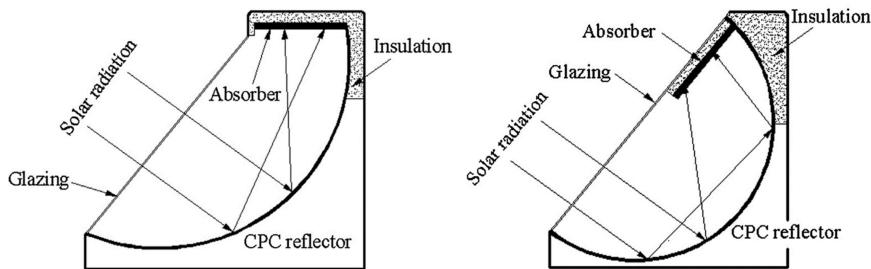


El Colector Parabólico Compuesto (CPC) está constituido de 2 superficies parabólicas que reflejan los rayos solares hacia una superficie absorbedora. Los CPC permiten una tolerancia de ángulos de incidencia relativamente amplia. Aunque la concentración de luz es mayor que los colectores de placa plana, el rango de ángulos de incidencia es menor adimISIBLES es menor.

El absorbedor puede estar dispuesto en distintas configuraciones, tales como: plano, bifacial, en forma de cuña o cilíndrico.



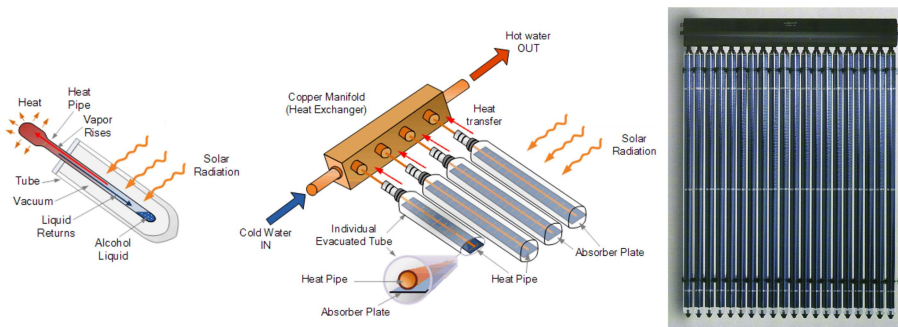
El absorbedor también puede estar dispuesto de forma asimétrica, ocupando un punto superior en la geometría del colector.



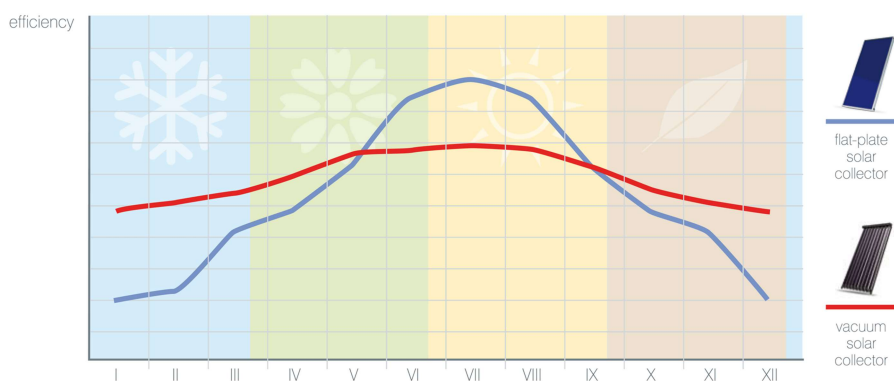
### 8.1.3. Colector de tubo evacuado (ETC)

Los colectores de tubo evacuados, consisten en una serie de **tubos transparentes sellados al vacío**, cada uno con un **absorbedor de radiación** conectado a un **tubo central** que transporta el fluido. El vacío actúa como aislante térmico frente a las pérdidas de calor por convección y conducción, permitiendo operar a mayores

temperaturas que los FPC. Cada tubo evacuado contiene un fluido con cambio de fase líquido-vapor. En la parte superior, se ubica un condensador, a través del cual se produce la transferencia de calor hacia el fluido a calentar.



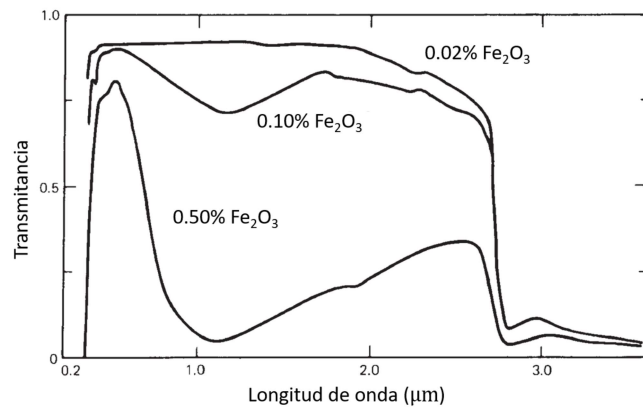
Al igual que los FPC los ETC permiten capturar la componente especular y difusa de la radiación solar. Sin embargo, la eficiencia de los ETC es mayor en ángulos de incidencia bajos. Así, los ETC son preferibles en climas caracterizados por alta nubosidad y viento



## 8.2. Componentes de un colector de placa plana

### 8.2.1. Cubierta de transparente

La **cubierta transparente** generalmente está compuesta de vidrio (sílice) con bajo contenido de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El vidrio común utilizado en ventanas tiene altos niveles de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que reducen la transparencia en el infrarrojo medio y parte del visible.



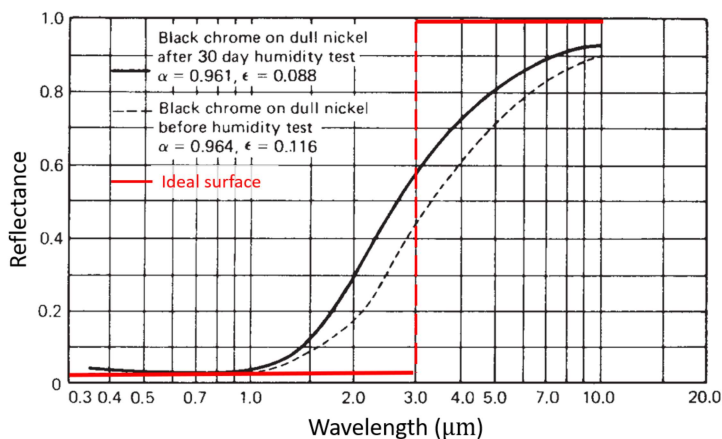
Esta cubierta se ubica cerca del absorbedor para generar una pequeña capa de aire estancado, el cual actúa como aislante térmico ante la convección de calor del exterior.

Por otro lado, materiales como el sílice, poseen alta emisividad en el infrarrojo medio (mid-IR). Al igual que con el efecto invernadero, esta propiedad permite capturar la radiación emitida por el absorbedor caliente, minimizando las pérdidas de calor por radiación.

### 8.2.2. Placa absorbidora

El **absorbedor** debe cumplir con dos requerimientos. Por un lado, debe absorber la mayor cantidad de radiación solar posible ( $\alpha \approx 1$  en el espectro visible e infrarrojo medio). Por el otro, debe minimizar las pérdidas de calor por radiación ( $\epsilon \approx 0$  en el espectro infrarrojo medio)

En otras palabras, el absorbedor debe operar como un **absorbedor selectivo**, con una absorptancia variable en el espectro.



Comúnmente, estas superficies están compuestas de una pequeña capa superior con alta absorptancia en el espectro visible y near-IR, pero relativamente transparente en el espectro mid-IR, depositada sobre un sustrato metálico con alta reflectancia en el espectro visible y mid-IR.

Un ejemplo es el absorbedor compuesto por cromo negro depositado sobre una superficie de níquel.

### 8.2.3. Integración de componentes

Los **tubos ascendentes** deben estar integrados en el absorbedor, o bien, unidos mediante soldaduras o sujetadores. En último caso es importante que la unión minimice la resistencia térmica en el contacto entre los tubos y el absorbedor.

## 8.3. Análisis térmico de colectores de placa plana

### 8.3.1. Absorción de radiación solar

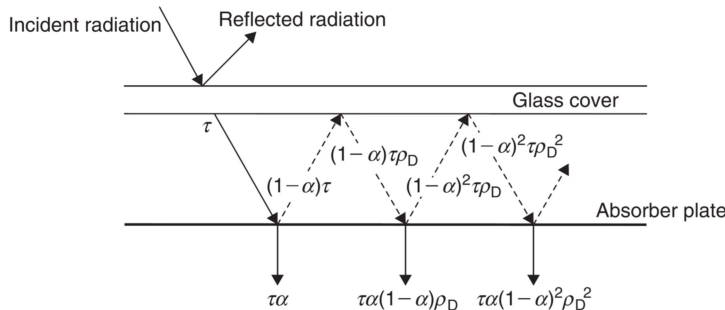
Utilizando el modelo de cielo isotrópico, la radiación solar absorbida por un colector,  $s$ , puede aproximarse por:

$$S = G_{\text{DNI}} R_B (\tau\alpha)_B + G_{\text{DIF}} (\tau\alpha)_D \left[ \frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + \rho_G (G_{\text{DNI}} + G_{\text{DIF}}) (\tau\alpha)_G \left[ \frac{1}{2} \right] \quad (8.1)$$

Donde:

- $G_{\text{DNI}}$ : Irradiación normal directa (DNI) del sol ( $\text{W/m}^2$ )
- $G_{\text{DIF}}$ : Irradiación horizontal difusa (DIF) del sol ( $\text{W/m}^2$ )
- $R_B = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_s}$ : Factor de inclinación de radiación directa.
- $\beta$ : Ángulo cenital de inclinación del colector.
- $\rho_G$  reflectancia del suelo
- $(\tau\alpha)$ : Fracción de la radiación absorbida por el colector. Los subíndices B, D y G, indican el valor correspondiente a la componente directa, difusa y global.

El valor de  $(\tau\alpha)$  considera las múltiples reflexiones y absorciones ocurridas entre la cobertura transparente y el absorbedor del colector.



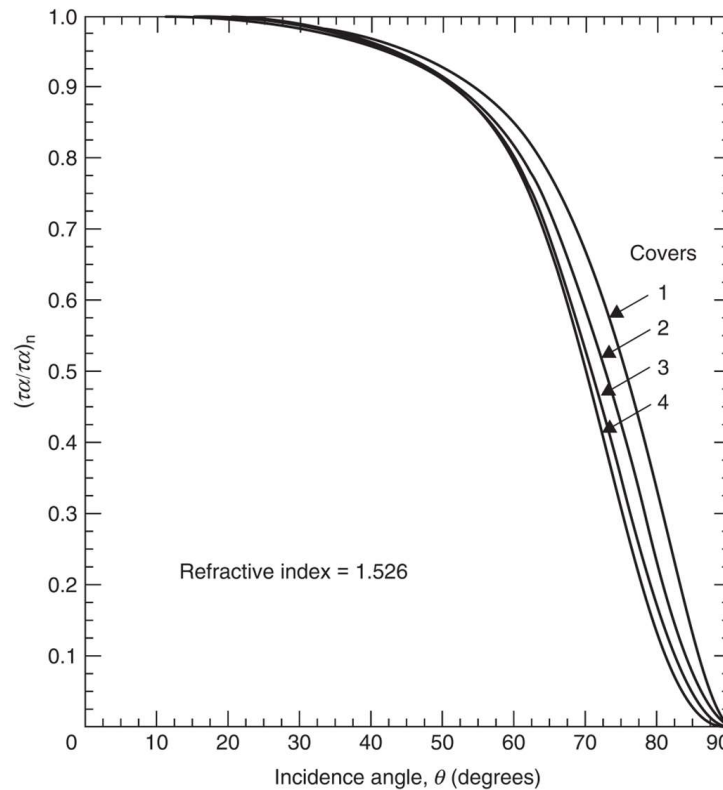
La componente normal de este parámetro está dada por:

$$(\tau\alpha)_n = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_D]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_D} \quad (8.2)$$

donde:

- $\tau$  transmitancia de la cubierta transparente
- $\alpha$  absorptancia de la placa absorbente
- $\rho_D$  es la reflectancia de la cubierta transparente. En general,  $\rho_D \sim 0.11 - 0.15$

Para determinar  $(\tau\alpha)_B$ ,  $(\tau\alpha)_D$  y  $(\tau\alpha)_G$  utilizamos el siguiente gráfico que permite relacionar  $(\tau\alpha)_n$  respecto al ángulo de incidencia  $\theta_i$



En el caso de  $(\tau\alpha)_D$  y  $(\tau\alpha)_G$ , utilizamos las siguientes fórmulas para determinar el ángulo equivalente de la componente difusa,  $\theta_{e,D}$ , y global,  $\theta_{e,G}$ :

$$\begin{aligned}\theta_{e,D} &= 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \\ \theta_{e,G} &= 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2\end{aligned}\quad (8.3)$$

### 8.3.2. Pérdidas de energía

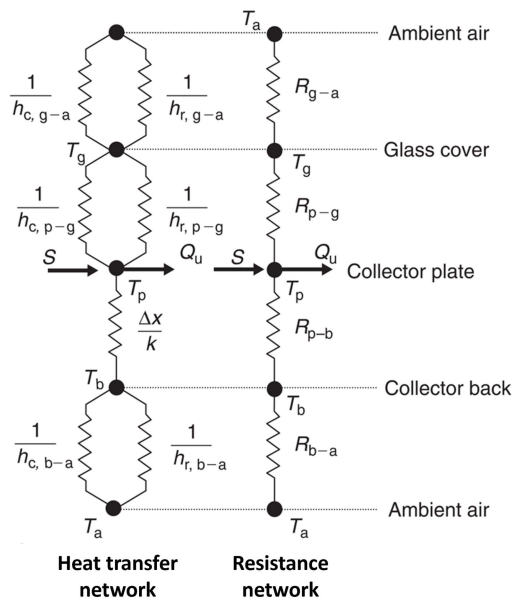
Las pérdidas de energía,  $Q_{\text{loss}}$ , están asociadas a las pérdidas por convección, conducción y radiación desde la placa absorbidora hacia el medio exterior

Matemáticamente:

$$Q_{\text{loss}} = S - Q_u$$

donde  $Q_u$  es el calor transferido al fluido.

Para determinar  $Q_{\text{loss}}$  analizamos la red de resistencias considerando los diferentes componentes del colector



Donde  $h_{c,i-j}$  es el coeficiente convectivo entre dos superficies  $i$  y  $j$ , y

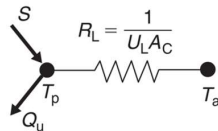
$$h_{r,i-j} = \frac{\sigma(T_i - T_j)(T_i^2 + T_j^2)}{1/\epsilon_i + 1/\epsilon_j - 1},$$

es el coeficiente equivalente de transferencia de calor por radiación.

En la práctica las pérdidas de calor se asocian a un coeficiente global de transferencia de calor,  $U_L$ , de la forma:

$$Q_{\text{loss}} = U_L A_c (T_p - T_a) \quad (8.4)$$

donde,  $T_p$  y  $T_a$  corresponden, respectivamente, a la temperaturas de la placa absorbidora y el ambiente, y  $A_c$  es la superficie superior(inferior) del colector.



Los valores de  $U_L$  son determinados por el fabricante.

## 8.4. Rendimiento de colectores de placa plana

### 8.4.1. Factor de remoción de calor

En la práctica  $T_p$  es difícil de determinar, así la ecuación de  $Q_{\text{loss}}$  planteada anteriormente no es de uso práctico

Definimos el factor de remoción de calor,  $F_R$ , como la razón entre el calor real transferido al fluido de trabajo ( $Q_u$ ), y la energía transferida por el colector cuando la temperatura de la placa absorbidora es igual a la temperatura de entrada del fluido de



trabajo,  $T_{f,i}$ .

Matemáticamente:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_c [S - U_L (T_{f,i} - T_a)]} \quad (8.5)$$

donde  $C_p$ ,  $\dot{m}$  y  $T_{f,o}$  son, respectivamente, el calor específico, el flujo másico y la temperatura de salida del fluido de trabajo.

El factor de remoción de calor puede ser determinado de forma teórica o experimental. A partir de este parámetro podemos determinar el calor efectivo transferido a un fluido como:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (8.6)$$

**El parámetro  $F_R$  depende del tipo de colector, el tipo de fluido, y el flujo a través del colector.**

### 8.4.2. Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de un colector corresponde al calor trasferido al fluido dividido por la irradiación total,  $G_t$ , sobre la superficie del colector,  $A_c$ :

$$\eta = F_R \left[ \frac{S - U_L (T_{f,i} - T_a)}{G_t} \right] \quad (8.7)$$

### 8.4.3. Curvas de rendimiento

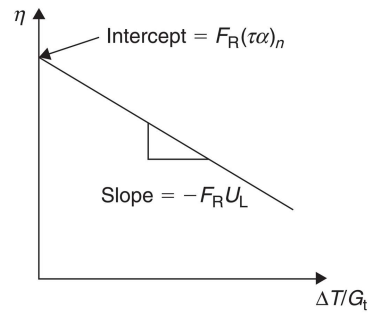
Debido a que  $F_R$  y, por consecuencia  $\eta$  son dependientes de las condiciones del flujo y del tipo de colector, es común que los fabricantes realicen ensayos de desempeño del colector para una serie de casos.

Existen diversos estandares para evaluar el desempeño de un colector. Los más comunes son la [ISO 9806](#) y la [ASNI/ASHRAE 93](#). En cualquiera de los dos casos, el objetivo de estos es medir el desempeño de un colector en condiciones estacionarias, en función de la temperatura de entrada del fluido de trabajo ( $T_i$ )

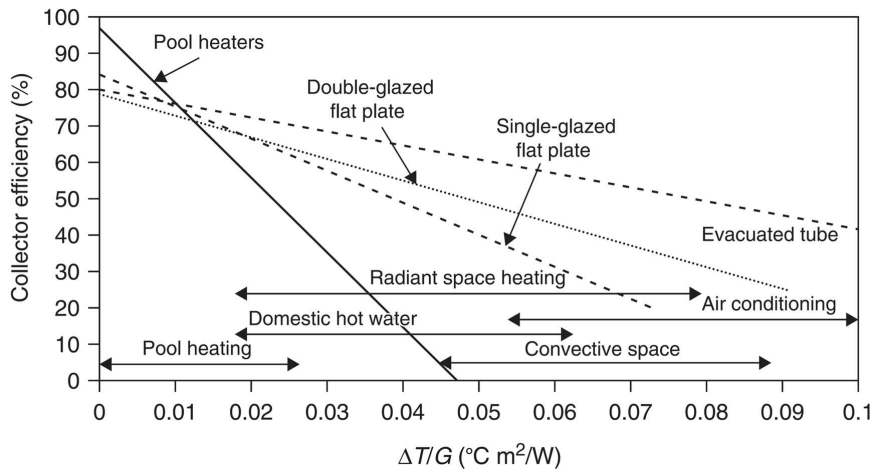
Considerando radiación solar en dirección normal al colector, y condiciones de trabajo estacionarias, los parámetros  $F_R S / G_t$  y  $F_R U_L$  permanecen constantes independientes de  $T_i$ . Más aún, para radiación solar normal a la superficie del colector,  $S = (\tau\alpha)_n G_t$ , y la eficiencia térmica forma una recta de la forma:

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{\Delta T}{G_t}$$

donde  $\Delta T = (T_{f,i} - T_a)$



Las curvas de eficiencia varían para distintos colectores, y sirven como método de selección según la aplicación requerida:



A través de estas curvas podemos determinar el valor de  $F_R(\tau\alpha)_n$  y  $F_R U_L$ . El valor específico de  $U_L$ ,  $F_R$  y  $(\tau\alpha)_n$ , se puede determinar con la información de uno de los tres parámetros.

#### 8.4.4. Corrector de ángulo de incidencia

Las curvas de rendimiento son generadas mediante un ensayo con radiación solar normal al plano de incidencia. En la realidad, esto nunca sucede debido que el colector solar está en posición estacionaria.

Así, en la práctica, necesitamos un factor de corrección que nos permita identificar el rendimiento del colector respecto al ángulo de incidencia de la radiación solar,  $\theta_i$ . Este corrector se conoce como el **modificador del ángulo de incidencia**,  $K_\theta$ .

$$K_\theta = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_0 \left[ \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right] \quad (8.8)$$

donde  $b_0 \sim 0.1 - 0.15$ .

### 8.5. Sistemas de agua caliente solares

#### 8.5.1. Sistemas pasivos

#### 8.5.2. Sistemas activos

### 8.5.3. Estimación de demanda de agua caliente domiciliaria

## 8.6. Referencias

- Kalogirou S. A. **Chapter 2: Environmental Characteristics** en *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, 2nd Ed, Academic Press, 2014
- Duffie J. A., Beckman W. A. and Blair N. **Chapter 1: Solar Radiation** and **Chapter 2: Available Solar Radiation** en *Solar Engineering of Thermal Processes*, 5th Ed, Jhon Wiley and Sons, 2020

---

By Francisco V. Ramirez-Cuevas

© Copyright 2022.