

# Colectores solares: clase 1

Ing. Rodrigo Alonso Suárez

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (FING/UdelaR)  
Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República (LES/UdelaR)

2 de octubre de 2014

---

Fundamentos de Energía Solar

[r.alonso.suarez@gmail.com](mailto:r.alonso.suarez@gmail.com)



LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



## 1 Introducción

- Aplicaciones térmicas de energía solar
- Uso de aplicaciones térmicas: contexto mundial y regional

## 2 Colectores solares

- Generalidades
- Eficiencia de colectores solares

## 3 Colectores planos

- Modelado de colectores planos

# APLICACIONES TÉRMICAS DE ENERGÍA SOLAR

## Objetivo:

**Aprovechar la energía solar para obtener calor**

## Aplicaciones: diferentes usos del calor obtenido.

- Generación de calor de procesos industriales.
- Generación de energía eléctrica.
- Refrigeración y calefacción solar.
- Aplicaciones de secado, desalinización, etc.
- Cocinas y hornos solares.
- Calentamiento de agua con fines sanitarios.

## ¿Cómo?

- Calentando algún fluido caloportador: agua, aire, etc.
- Calentando algún material sólido a alta temperatura.

## APLICACIONES: 'BAJA' TEMPERATURA

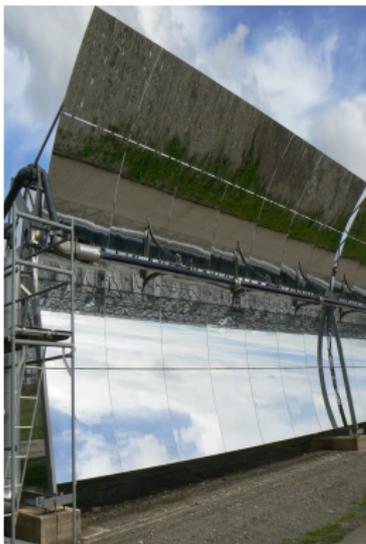
Temperaturas: hasta  $\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Aplicación: Calentamiento de agua sanitaria (principal).  
Generación de calor de proceso. Refrigeración.

## APLICACIONES: 'MEDIA' TEMPERATURA

Temperaturas: hasta  $\sim 400$  °C. Disco: hasta  $\sim 700$  °C.



Aplicación: Generación de calor de proceso. Refrigeración.  
Generación de energía eléctrica.

## APLICACIONES: 'ALTA' TEMPERATURA



Temperaturas: hasta  $\sim 1000$  °C.

Aplicación: Generación de energía eléctrica.

Foto: PS-10, PS-20, ABENGOA.

Sanlúcar, Sevilla, España.



## APLICACIONES: MUY 'ALTA' TEMPERATURA

Temperaturas: hasta  $\sim 3000$  °C.



Aplicación: Testeo de materiales para condiciones extremas.  
Producción de hidrógeno (a partir de metano).

# ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN EL MUNDO (1/2)

**Capacidad:** 2001 = 7 GW → 2011 = 42 GW → 2050 = 630–1500 GW

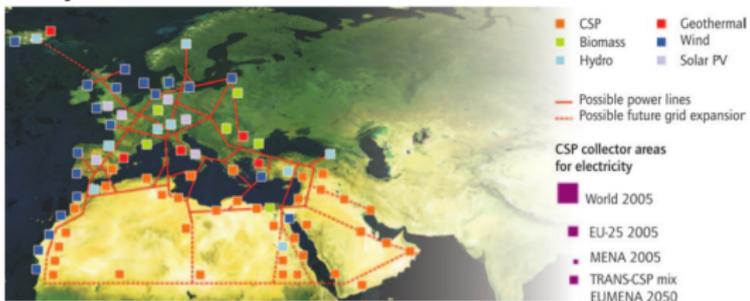
Tanto la concentración solar como las aplicaciones domésticas experimental un fuerte crecimiento.

**Emprendimientos CSP:** en operación, construcción y planificación



# ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN EL MUNDO (2/2)

## Emprendimientos CSP



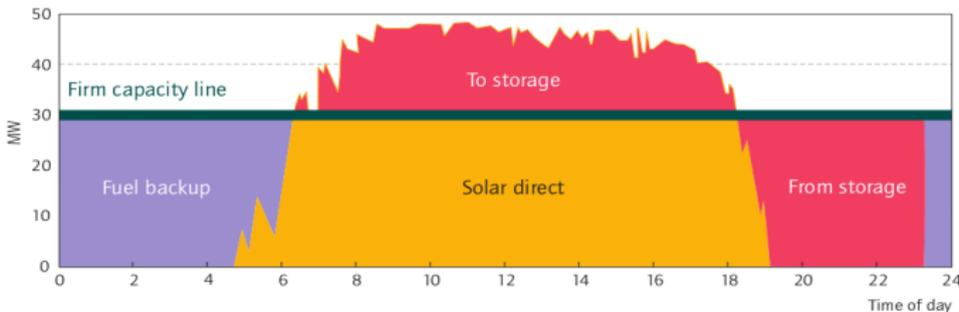
Source: the DESERTEC Foundation.



Source: Hank Price, US DOE, 2007.

## Operación CSP

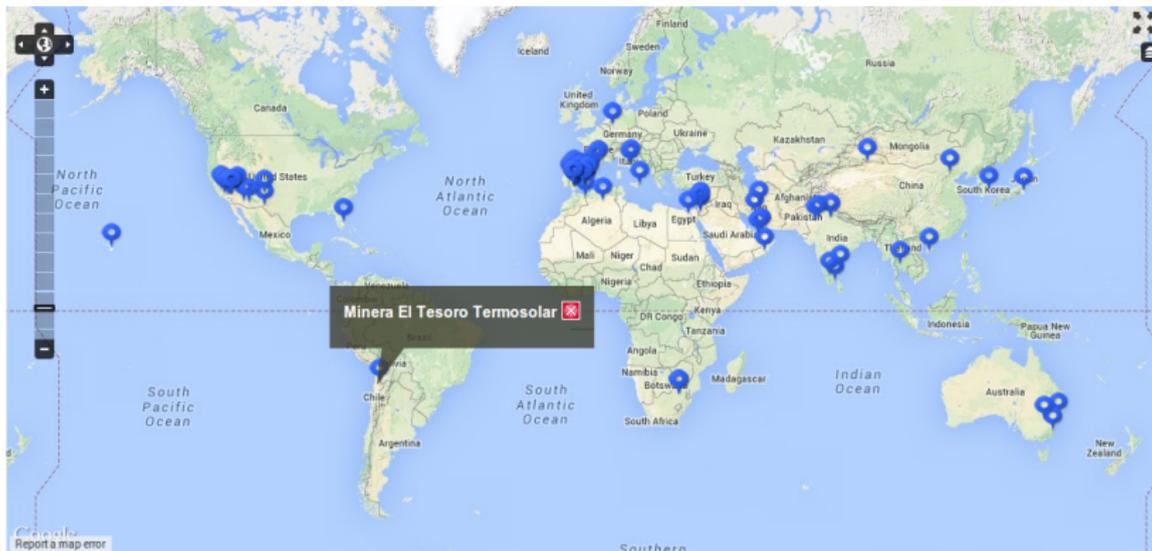
Figure 4: Combination of storage and hybridisation in a solar plant



# ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN LA REGIÓN (1/3)

## Plantas CSP en operación:

- Minera El Tesoro: Chile, Antofagasta. 7 MW, 7 hectáreas.
- Inicio operación: noviembre 2012 (1½ año de construcción).
- Tecnología: Cilindro parabólico. Calor de proceso. ABENGOA.



## ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN LA REGIÓN (2/3)

### Plantas CSP en construcción:

- ABENGOA: Chile, Antofagasta. 110 MW, 700 hectáreas.
- Tecnología: Torre central. Generación de energía eléctrica.
- Almacenamiento: 18hs (sales). 10 500 heliostatos.



## ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN LA REGIÓN (3/3)

### Plantas CSP planificadas:

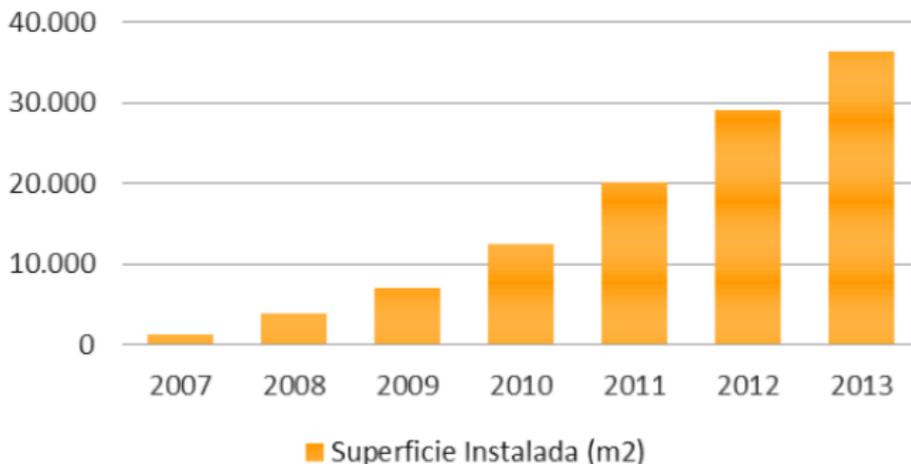
- Iberolica: Chile, Antofagasta. 360 MW (4 x 90 MW).
- Tecnología: Cilindro parabólico. Energía eléctrica.
- Otros proyectos por 400 MW de torre central (4 x 100 MW).



## ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN URUGUAY (1/1)

- Básicamente instalaciones para agua caliente sanitaria.
- Salvo... 1 prototipo de concentrador solar de bajo costo.

### Solar Térmico Uruguay. Superficie instalada



Ley solar térmica: el desarrollo, la investigación y la formación en el uso de la energía solar térmica es de interés nacional

PRIMERA APLICACIÓN

# Primer tema: aplicaciones de baja temperatura

## Calentamiento de agua.

## 1 Introducción

- Aplicaciones térmicas de energía solar
- Uso de aplicaciones térmicas: contexto mundial y regional

## 2 Colectores solares

- Generalidades
- Eficiencia de colectores solares

## 3 Colectores planos

- Modelado de colectores planos

## COLECTORES SOLARES (01/20)

### ● Colectores planos.



Sistemas forzados vs no forzados (termosifónicos)

### ● Colectores de tubo de vacío.

- Colectores de tubo en 'U'.
- Colectores de circulación directa.
- Colectores tipo Heat Pipe.



# COLECTORES SOLARES (02/20)

En el cementerio de colectores... (INTA/España)



# COLECTORES SOLARES (03/20)

Muchos prototipos, para todos los gustos... (INTA/España)



## COLECTORES SOLARES (04/20)

### Criterios de diseño:

- maximizar la energía solar absorbida en la placa
- minimizar pérdidas al ambiente
- maximizar el calor transferido al fluido
- minimizar costos de construcción e instalación
- maximizar vida útil



**Compromiso: calidad – costo – eficiencia**

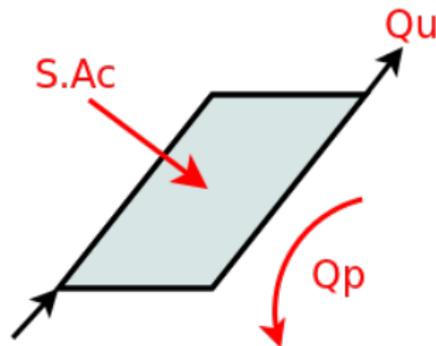
**Modelado del colector ayuda a evaluar el impacto de modificaciones en diseño y materiales en su desempeño**

## COLECTORES SOLARES (05/20)

### Balance de energía en el absorbedor

$$SA_c = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p + \frac{dE}{dt}$$

- $S$ : flujo absorbido en la placa [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $\dot{Q}_u$ : potencia de calor útil al fluido [ $\text{W}$ ]
- $\dot{Q}_p$ : potencia de pérdidas al ambiente [ $\text{W}$ ]
- $\frac{dE}{dt}$ : variación de energía almacenada en el colector [ $\text{W}$ ]
- $A_c$ : área del colector [ $\text{m}^2$ ]



**Estado estacionario:**  $\frac{dE}{dt} = 0$ . Entonces se cumple,

$$SA_c = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p$$

Para medir, por ejemplo, la eficiencia de un colector, se generan externamente condiciones para el estado estacionario con un sistema de ensayo que lo permita.

## COLECTORES SOLARES (06/20)

### Eficiencia instantánea del colector

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G_T A_c}$$

- $G_T$ : irradiancia global en el plano del colector [W/m<sup>2</sup>]

### Balance de energía en el absorbedor

$$S A_c = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p$$

- $S$ : flujo absorbido en la placa [W/m<sup>2</sup>]

**¿Relación entre  $G_T$  y  $S$ ?**

## COLECTORES SOLARES (07/20)

**Irradiancia incidente en el plano del colector:**

$$G_h = G_{bh} + G_{dh}$$

Por ejemplo, en el modelo isotrópico para un plano inclinado ( $\beta$ ):

$$G_T = G_{bh}R_b + G_{dh} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g G_h \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

**Flujo de energía absorbida en la placa colectora:**

$$S = G_{bh}R_b (\tau\alpha)_b + G_{dh} (\tau\alpha)_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g G_h (\tau\alpha)_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

- Distintos valores de  $(\tau\alpha)$  para cada componente.
- Los factores  $(\tau\alpha)_x$  permiten estimar  $S$  a partir de irradiancias medidas en plano horizontal.

No es muy práctico...

**Incerteza asociada al pasaje a plano inclinado.** 

## COLECTORES SOLARES (08/20)

**Relación entre  $S$  y  $G_T$ :**

Se define un producto  $(\tau\alpha)$  promedio

De modo que,

$$S = (\tau\alpha)G_T$$

**Eficiencia óptica del colector (instantánea):**

$$\eta_{opt} = \frac{S}{G_T} = (\tau\alpha)$$

- $(\tau\alpha)$  depende de la direccionalidad  $\theta$ .
- $(\tau\alpha)$  depende de las propiedades ópticas del par cubierta-absorbedor.
- El concepto de eficiencia óptica se puede generalizar a otras escalas temporales.

## COLECTORES SOLARES (09/20)

La eficiencia de un colector se puede separar en dos términos conceptualmente identificables

A escala instantánea,

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G_T A_c} = \left( \frac{S}{G_T} \right) \times \left( \frac{\dot{Q}_u}{S A_c} \right) = \eta_{opt} \times \eta_T$$

**Eficiencia térmica instantánea:**

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_u}{S A_c} = 1 - \frac{\dot{Q}_p}{S A_c}$$

- $\eta_T$  - Qué fracción de la energía que llega al absorbedor es convertida en energía térmica útil.
- $\eta_{opt}$  - Qué fracción de la energía que llega al colector logra llegar al absorbedor.

## COLECTORES SOLARES (10/20)

En la práctica la eficiencia instantánea se torna difícil de medir, por lo que se utilizan eficiencias promedios en intervalos de tiempo, garantizando la hipótesis de estado estacionario

**Eficiencia del colector:**

$$\eta = \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \dot{Q}_u dt}{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} G_T A_c dt} = \frac{Q_u}{I_T A_c}$$

**Eficiencia térmica:**

$$\eta_T = \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \dot{Q}_u dt}{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} S A_c dt} = \frac{Q_u}{I_S A_c} = 1 - \frac{Q_p}{I_S A_c}$$

Intervalo de tiempo:  $\Delta t \sim 15$  minutos.

## COLECTORES SOLARES (11/20)

### Eficiencia del colector:

$$\eta = (\tau\alpha) \times \left( \frac{\dot{Q}_u}{SA_c} \right) = (\tau\alpha) \times \left( 1 - \frac{\dot{Q}_p}{SA_c} \right)$$

**¿Cómo se modelan las pérdidas  $\dot{Q}_p$ ?**

### Pérdidas en el colector:

- Pérdidas por conducción  
Conducción en los materiales del colector.
- Pérdidas por convección  
Convección hacia el ambiente circundante.
- Pérdidas por radiación  
El colector emite por estar a una determinada temperatura.

## COLECTORES SOLARES (12/20)

**Coefficiente global de pérdidas:**  $U_L$  [W/m<sup>2</sup>K]

$$U_L = \frac{\dot{Q}_p}{A_c (T_c - T_a)} \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_p = A_c U_L (T_c - T_a)$$

- $T_c$  – Temperatura media del absorbedor (placa colectora).
- $T_a$  – Temperatura ambiente.

Entonces la eficiencia,

$$\begin{aligned} \eta &= (\tau\alpha) \times \left( 1 - \frac{\dot{Q}_p}{S A_c} \right) = (\tau\alpha) - (\tau\alpha) U_L \left( \frac{T_c - T_a}{S} \right) \\ &= (\tau\alpha) - U_L \left( \frac{T_c - T_a}{G_T} \right) \end{aligned}$$

**Problema: ¿Cómo medimos  $T_c$  en la práctica?**

## COLECTORES SOLARES (13/20)

### La eficiencia del colector disminuye conforme aumenta la temperatura media de la placa.

- Al aumenta  $T_c$ . aumentan las pérdidas por conducción, convección y radiación.
- Por tanto:  $\eta(T_{c1}) \leq \eta(T_{c2})$  con  $T_{c1} \geq T_{c2}$ .

**Factor de remoción del calor:**  $F_R$  [adimensionado]

$$F_R = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}'_u} = \frac{\eta(T_c)G_T A_c}{\eta(T_f)G_T A_c} = \frac{\eta(T_c)}{\eta(T_f)}$$

- $T_f$  es la temperatura del fluido a la entrada del colector.
- $Q_u$  es el calor útil transferido al fluido cuando la placa absorbidora está a una temperatura  $T_c$ .
- $Q'_u$  es el calor útil transferido al fluido en la situación ideal: cuando la placa trabaja lo más fría posible  $T_c = T_f$

## COLECTORES SOLARES (14/20)

**Factor de remoción del calor:  $F_R$** 

Cuantifica que tan bien se transfiere el calor de la placa al fluido en comparación con la situación óptima

$$F_R = \frac{Q_u}{Q'_u} = \frac{(\tau\alpha) - U_L(T_c - T_a)/G_T}{(\tau\alpha) - U_L(T_f - T_a)/G_T} \leq 1$$

Permite sustituir la dependencia en la temperatura media de la placa ( $T_c$ ) en la ecuación de eficiencia por la temperatura de entrada del fluido ( $T_f$ ).

**Ecuación de eficiencia de un colector:**

$$\eta = \frac{Q_u}{G_T A_c} = \left( \frac{Q_u}{Q'_u} \right) \times \left( \frac{Q'_u}{G_T A_c} \right) = F_R \left[ (\tau\alpha) - U_L \left( \frac{T_f - T_a}{G_T} \right) \right]$$

A diferencia de temperatura media  $T_c$ ,  $T_f$  es fácilmente medible.

## COLECTORES SOLARES (15/20)

**Ecuación de eficiencia de un colector:**

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_RU_L \left( \frac{T_f - T_a}{G_T} \right)$$

- En primera aproximación, la eficiencia de un colector decrece linealmente con el término  $\left( \frac{T_f - T_a}{G_T} \right)$
- El término  $\left( \frac{T_f - T_a}{G_T} \right)$  es medible experimentalmente.
- Le eficiencia del colector también es medible:

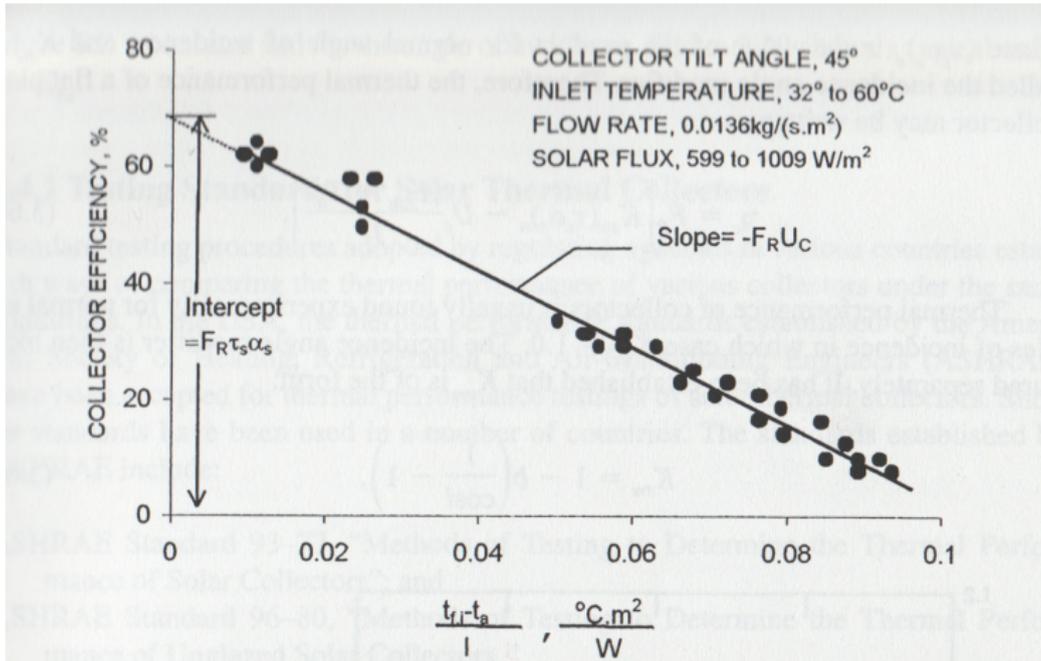
$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_f)}{A_c G_T}$$

- Se debe medir flujo másico ( $\dot{m}$ ).
- Se debe medir temperaturas de entrada y salida ( $T_f$  y  $T_{out}$ ).

Se puede relevar experimentalmente la curva de eficiencia de un colector (utilizando un intervalo de tiempo  $\Delta t$ )

# COLECTORES SOLARES (16/20)

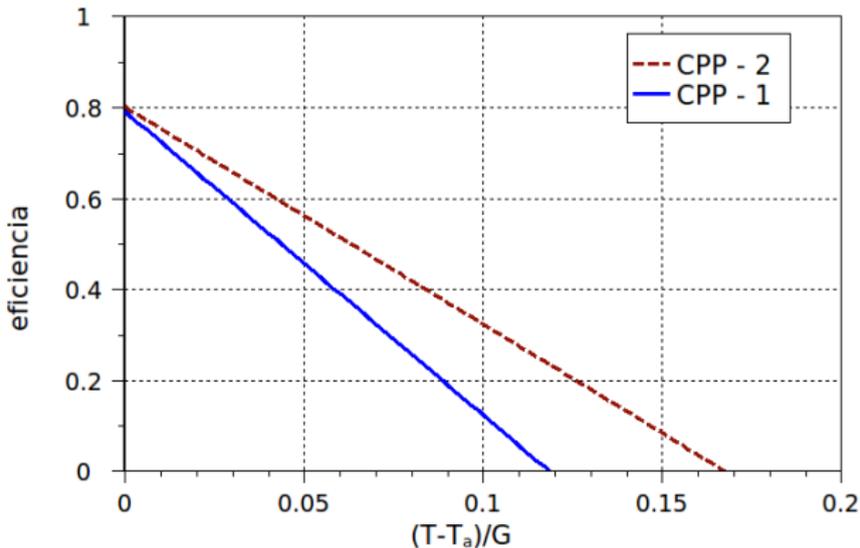
## Curva de eficiencia de un colector:



Datos experimentales ajustados a un modelo lineal

## COLECTORES SOLARES (17/20)

## Curva de eficiencia de un colector: dos colectores planos...



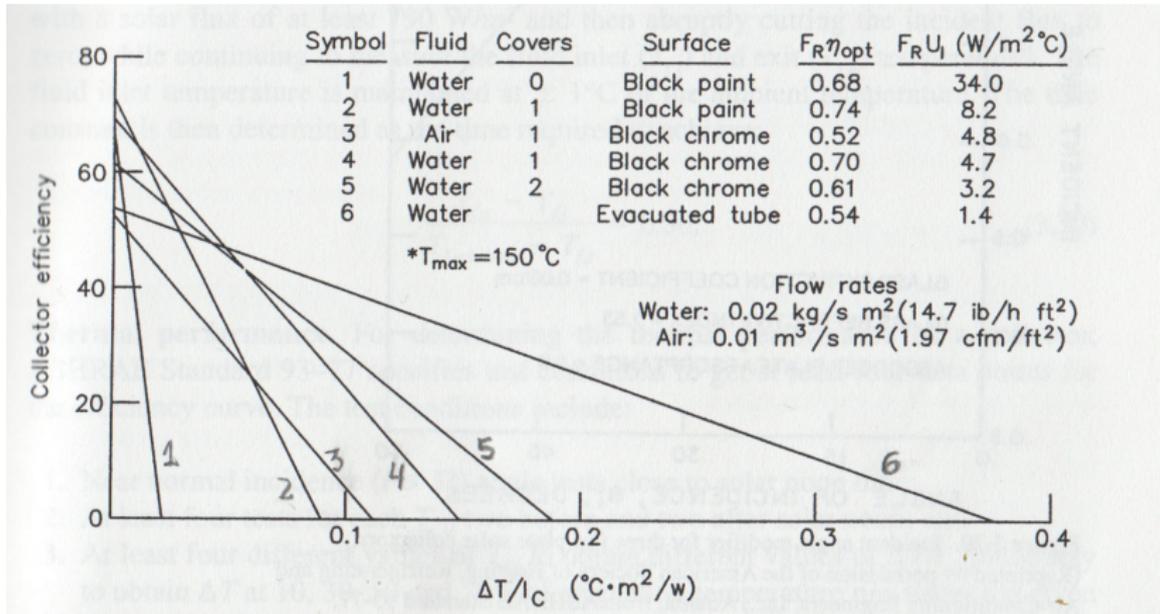
**CPP-1:** común, placa colectora pintada de negro y tubos soldados a la placa.

**CPP-2:** superficie selectiva basada en Cromo, tubos con soldaduras de alta calidad.

Ambos colectores tienen una cubierta de vidrio bajo en hierro.

# COLECTORES SOLARES (18/20)

**Curva de eficiencia de un colector:** varios tipos de colectores.



**El tipo de colector más adecuado (en términos de su eficiencia) depende del uso específico y del clima local.**

## COLECTORES SOLARES (19/20)

La realidad no es tan sencilla...

El coeficiente global de pérdidas  $U_L$  presenta una pequeña dependencia con  $\Delta T$ .

$$U_L \approx U_{L0} + a(T_c - T_a)$$

Por lo que las normas de ensayo prevén una expresión cuadrática para la eficiencia de un colector.

**Expresión cuadrática para la eficiencia:** UNIT-ISO 9806-1:1994

$$\eta = \eta_0 + a_1 \left[ \frac{(T_f - T_a)}{G_T} \right] + a_2 \left[ \frac{(T_f - T_a)^2}{G_T} \right]$$

- En ensayos de colectores se mide  $G_T$ ,  $Q_u$  y  $(T_f - T_a)$ , de modo que es posible parametrizar  $\eta$  lineal o cuadráticamente.

## COLECTORES SOLARES (20/20)

**Temperatura de estancamiento**

Temperatura a la cual el flujo de calor de pérdidas se iguala al flujo de calor recibido desde el Sol.

- Deja de circular fluido por el colector (rotura de línea, por ej.).
- La placa colectora rápidamente eleva su temperatura.
- Aumentan las pérdidas: conducción, convección y radiación.
- En esa situación  $\dot{Q}_u = 0$  y  $T_f = T_c$  (no circula fluido).
- Se puede deducir de la curva de eficiencia ( $\dot{Q}_u = 0 \rightarrow \eta = 0$ )

$$T_s = T_a + \frac{(\tau\alpha)G_T}{U_L} \quad \text{con aprox. lineal}$$

**Pone en riesgo la vida útil de los componentes del sistema.**

Colectores planos: típicamente  $T_S \sim 110 - 180 \text{ }^\circ\text{C}$

Colectores de tubos de vacío: típicamente  $T_S \sim 150 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$

## MODELADO DE COLECTORES SOLARES

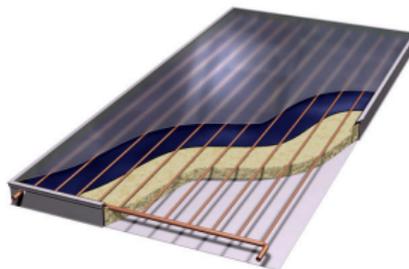
### ¿Modelado de un colector?

Iniciamos con el modelado de un colector plano

#### ¿Por qué?

- Geometría y componentes más sencillos de modelar.
- Su estructura es simple y fácil de comprender.
- El modelado básico es generalizable a colectores de distintos tipos incluyendo algunas modificaciones.

Estructura básica de un colector solar plano de parrilla con cubierta.



## ¿CÓMO SEGUIMOS?

Próxima clase...

# Modelado de colectores solares planos

## 1 Introducción

- Aplicaciones térmicas de energía solar
- Uso de aplicaciones térmicas: contexto mundial y regional

## 2 Colectores solares

- Generalidades
- Eficiencia de colectores solares

## 3 Colectores planos

- Modelado de colectores planos





# SISTEMAS FORZADOS VS NO FORZADOS

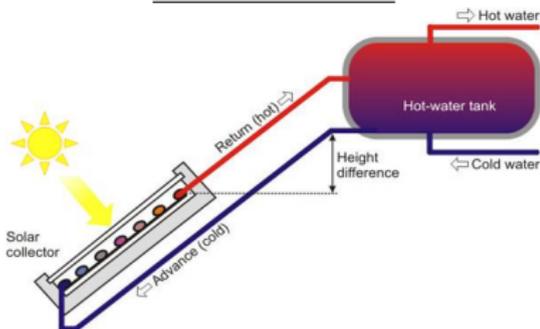
## Sistemas forzados:

- Sistemas con alta pérdida de carga en las tuberías y colector requieren de una bomba de circulación por el circuito del colector.
- En general los sistemas a medida son de este tipo (instalaciones para edificios, hospitales, clubes deportivos, etc.).

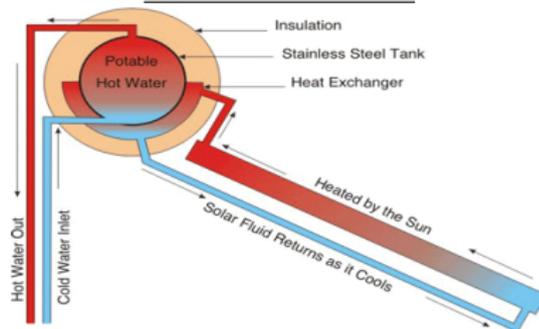
## Sistemas no forzados (termosifónicos):

- Funcionan por convección natural (diferencia de densidad del líquido).
- El fluido ingresa frío por la parte inferior.
- Al calentarse el fluido sube por diferencia de densidad.

### Sistema directo



### Sistema indirecto

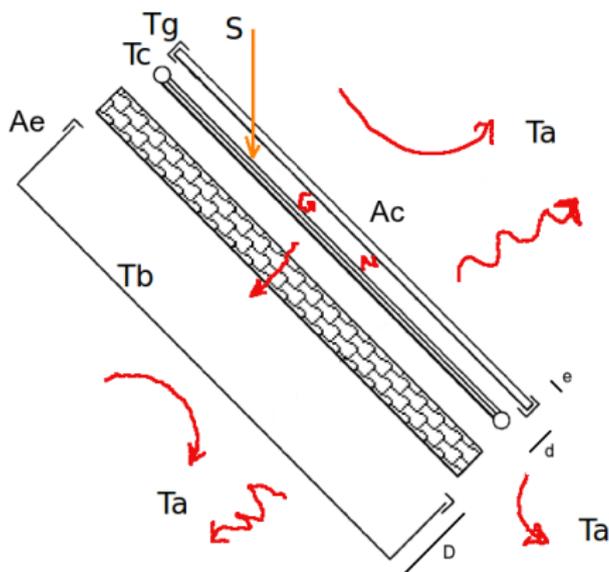


## MODELADO DE UN COLECTOR PLANO

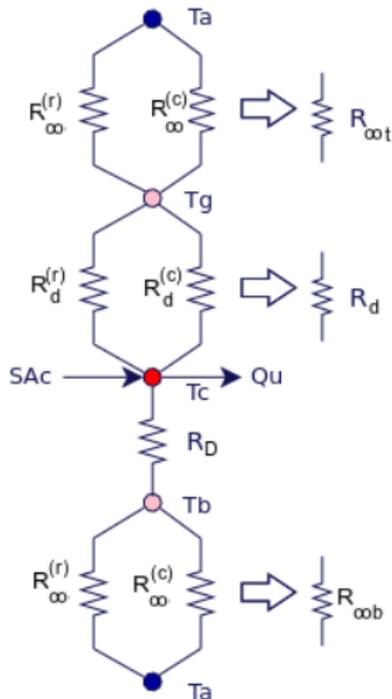
- **régimen estacionario.**
- caída de temperatura despreciable a través del **espesor** de la placa colectora.
- **transferencia de calor unidimensional** a través de la cubierta y de la aislación (sin efectos de borde).
- **cabezales:** ocupan un área despreciable del colector y proveen un flujo uniforme a los tubos.
- **bóveda celeste** = emisor ideal (cuerpo negro) infrarrojo a  $T_{sky}$ .
- **irradiación solar uniformemente distribuida** sobre placa colectora.
- **pérdidas térmicas** referidas a la misma temperatura promedio  $T_c$  de la placa colectora.
- **geometría de la placa** colectora: lámina con ductos o tubos adosados.
- Los gradientes de temperatura en la placa colectora entre los

# MODELADO DE UN COLECTOR PLANO

## Modelado de transferencias de calor:



## Circuito equivalente



## MODELADO DE UN COLECTOR PLANO

### Pérdidas al ambiente

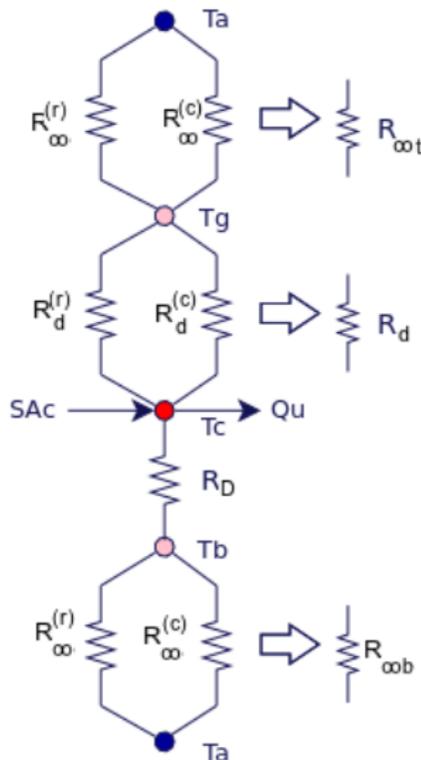
$$Q_p = A_c U_L (T_c - T_a) = Q_t + Q_b$$

#### camino superior ( $Q_t$ )

- $\tilde{R}_{\infty t}$  = radiación y convección cubierta ( $T_g$ ) - ambiente ( $T_a$ )
- $\tilde{R}_d$  = radiación y convección placa ( $T_c$ ) - cubierta ( $T_g$ )

#### camino inferior ( $Q_b$ )

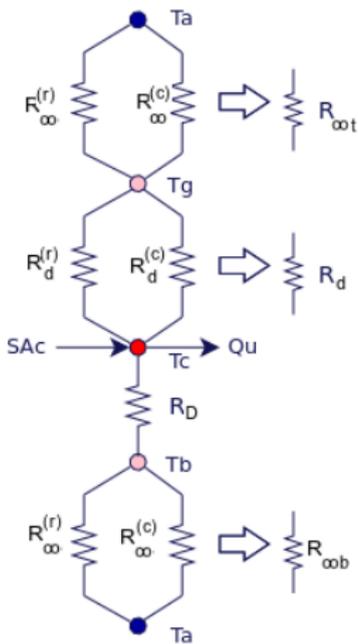
- $\tilde{R}_D$  = conducción placa ( $T_c$ ) - base ( $T_b$ ) a través de la aislación térmica (incluye laterales).
- $\tilde{R}_{\infty b}$  = convección base y laterales ( $T_b$ ) - ambiente ( $T_a$ ) (al ser  $T_b \approx T_a$  la radiación es despreciable frente a la convección).



# MODELADO DE UN COLECTOR PLANO

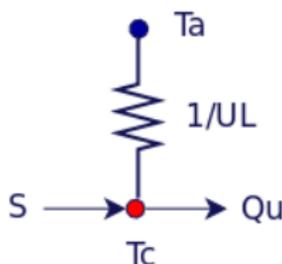
## Coeficiente global de pérdidas:

$$\begin{aligned}
 U_L &= \frac{1}{\tilde{R}_L} = U_t + U_b \\
 &= \frac{1}{\tilde{R}_{\infty t} + \tilde{R}_d} + \frac{1}{\tilde{R}_D + \tilde{R}_{\infty b}}
 \end{aligned}$$



## Circuito equivalente:

- Paralelo de dos resistencias.
- Cada resistencia es la suma de dos.



## ¿CÓMO SEGUIMOS?

Ahora sí, próxima clase...

**Seguimos con modelado de  
colectores solares planos**