

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



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 ~ 400 °C. Disco: hasta ~ 700 °C.



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

APLICACIONES: 'ALTA' TEMPERATURA



Temperaturas: hasta ~ 1000 °C.

Aplicación: Generación de energía eléctrica.

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

Sanlúcar, Sevilla, España.



APLICACIONES: MUY 'ALTA' TEMPERATURA

Temperaturas: hasta ~ 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

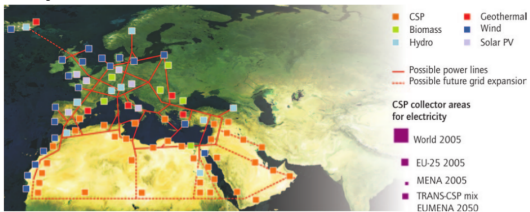
Tanto la concentración solar como las aplicaciones domésticas experimental un fuerte crecimiento.

Emprendimientos CSP: en operación, construcción y planificación

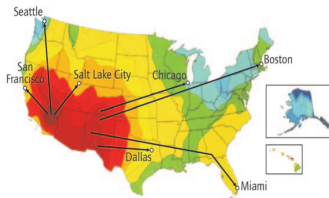


ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN EL MUNDO (2/2)

Emprendimientos CSP



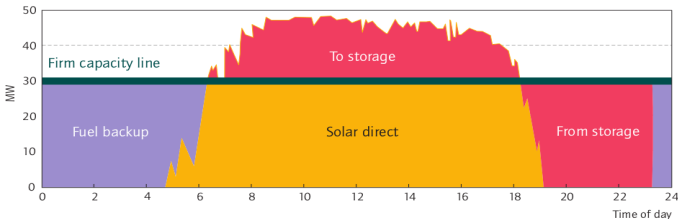
Source: the DESERTEC Foundation.



Source: Hank Price, US DOE, 2007.

Operación CSP

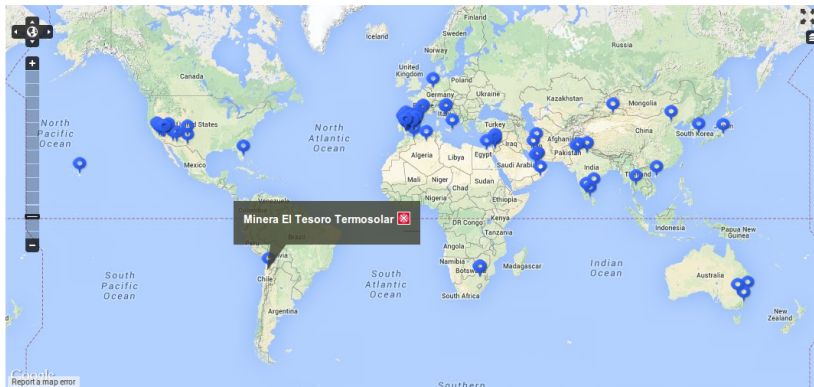
Figure 4: Combination of storage and hybridisation in a solar plant



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:

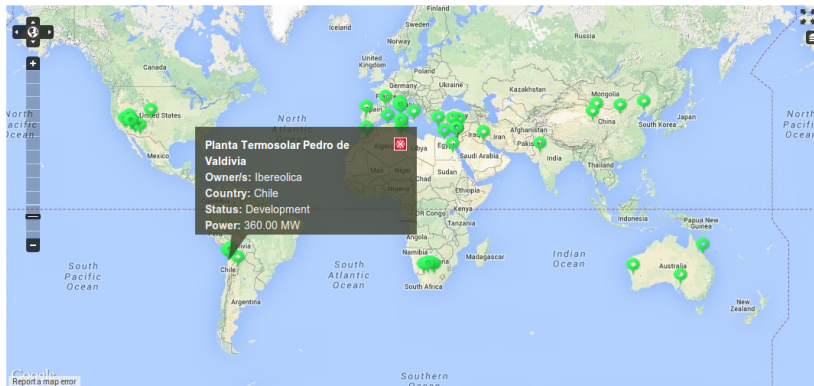
- ABENGOA: Chile, Antofagasta. 110 MW, 700 hectáreas.
- Tecnología: Torre central. Generación de energía eléctrica.
- Almacenamiento: 18hs (sales). 10 500 heliostatos.



ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN LA REGIÓN (3/3)

Plantas CSP planificadas:

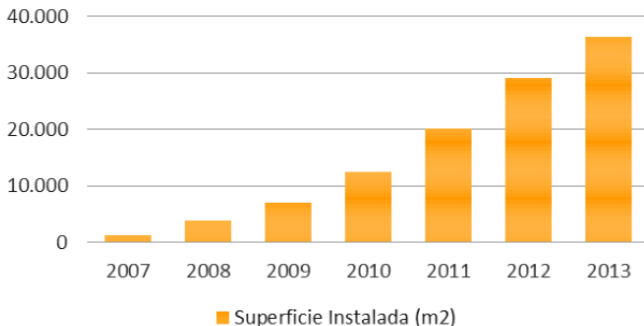
- Iberolica: Chile, Antofagasta. 360 MW (4 x 90 MW).
- Tecnología: Cilindro parabólico. Energía eléctrica.
- Otros proyectos por 400 MW de torre central (4 x 100 MW).



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

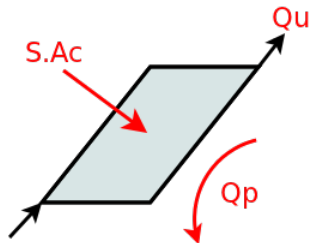
Modelado del colector ayuda a evaluar el impacto de modificaciones en diseño y materiales en su desempeño

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 [W/m^2]
- \dot{Q}_u : potencia de calor útil al fluido [W]
- \dot{Q}_p : potencia de pérdidas al ambiente [W]
- $\frac{dE}{dt}$: variación de energía almacenada en el colector [W]
- A_c : área del colector [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/m²]

Balance de energía en el absorbedor

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

- S : flujo absorbido en la placa [W/m²]

¿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 (β):

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

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 θ .
- $(\tau\alpha)$ 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:

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

- η_T - Qué fracción de la energía que llega al absorbedor es convertida en energía térmica útil.
- η_{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 (12/20)

Coefficiente global de pérdidas: U_L [W/m²K]

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

- 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:

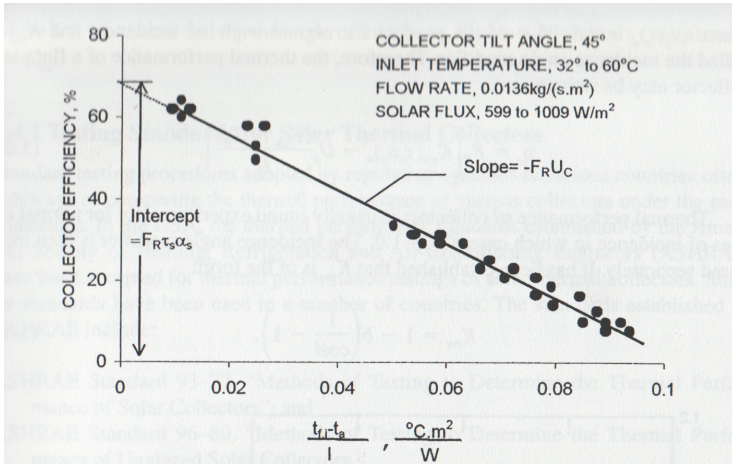
$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_f)}{A_c G_T}$$

- 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 Δt)

COLECTORES SOLARES (16/20)

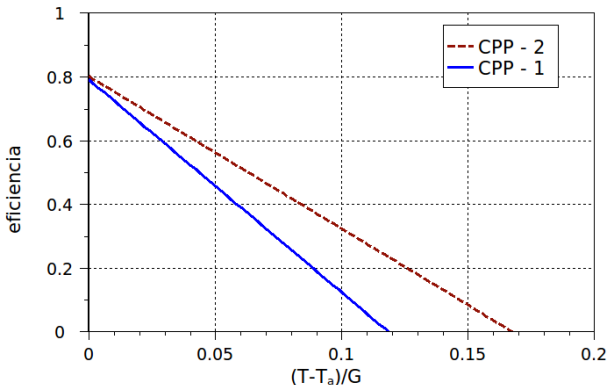
Curva de eficiencia de un colector:



Datos experimentales ajustados a un modelo lineal

COLECTORES SOLARES (17/20)

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



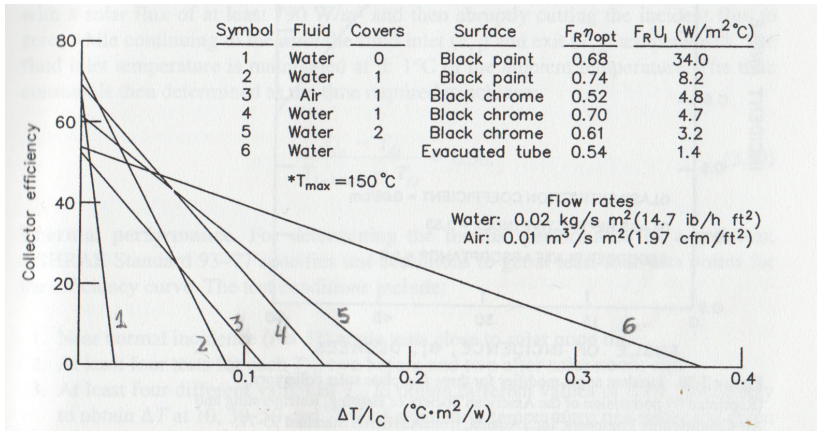
CPP-1: común, placa colectora pintada de negro y tubos soldados a la placa.

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 ΔT .

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

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 η 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

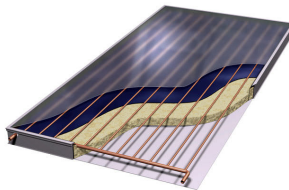
¿Modelado de un colector?

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

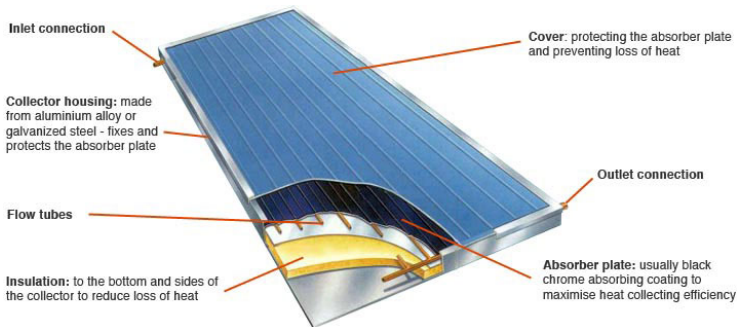
3 Colectores planos

- Modelado de colectores planos

COMPONENTES DE UN COLECTORES PLANO (1/2)

Componentes típicos:

- Cubierta transparente (recubrimiento).
- Placa colectora (absorbedor)
- Tubos para flujo de agua.
- Aislación térmica.
- Soporte y estructura.



SISTEMAS FORZADOS VS NO FORZADOS

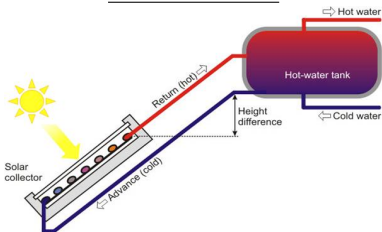
Sistemas forzados:

- 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.).

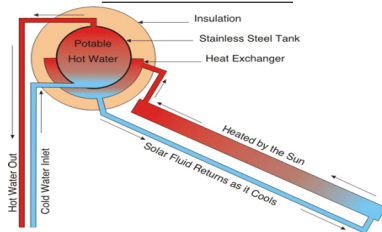
Sistemas no forzados (termosifónicos):

- 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

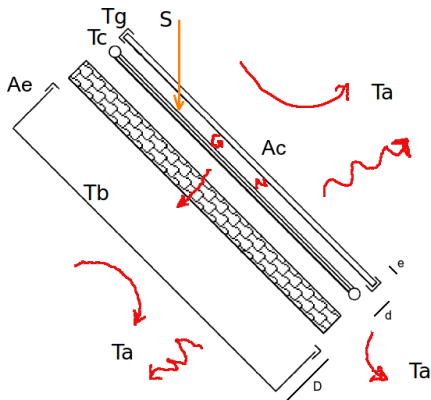


MODELADO DE UN COLECTOR PLANO

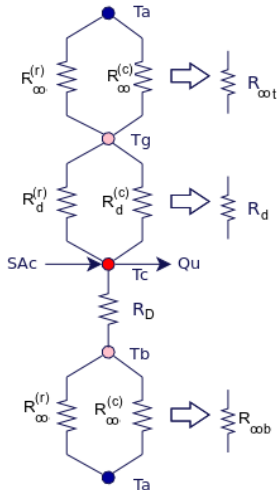
- **régimen estacionario.**
- caída de temperatura despreciable a través del **espesor** de la placa colectora.
- **transferencia de calor unidimensional** a través de la cubierta y de la aislación (sin efectos de borde).
- **cabezales:** ocupan un área despreciable del colector y proveen un flujo uniforme 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

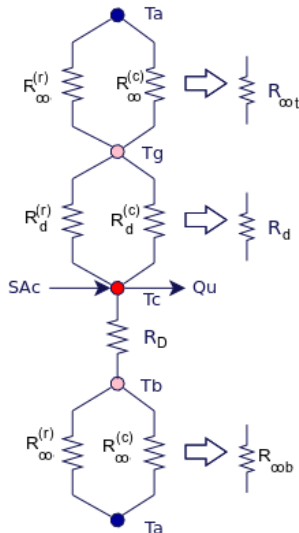
$$Q_p = A_c U_L (T_c - T_a) = Q_t + Q_b$$

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)

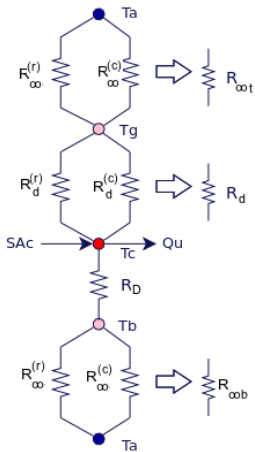
- \tilde{R}_D = conducción placa (T_c) - base (T_b) a través de la aislación térmica (incluye laterales).
- $\tilde{R}_{\infty b}$ = convección base y laterales (T_b) - ambiente (T_a) (al ser $T_b \approx T_a$ la radiación es despreciable frente a la convección).



MODELADO DE UN COLECTOR PLANO

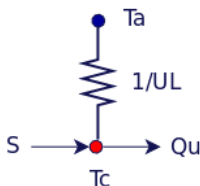
Coeficiente global de pérdidas:

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



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**