

- 1 **Introducción**
 - Panorama general

- 2 **Distribución de temperaturas en el absorbedor**
 - Temperatura en el absorbedor

- 3 **Calor útil al fluido**
 - Calor útil y eficiencia de aleta
 - Factor de eficiencia
 - Factor de remoción de calor y factor de flujo
 - Ecuación de eficiencia de un colector

- 4 **Colectores de tubo de vacío**
 - Introducción
 - Colectores de circulación directa
 - Heat Pipes
 - Comentarios finales

PANORAMA GENERAL HASTA AHORA

Ecuación de eficiencia de un colector

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_T} \right)$$

¿Modelado de características del colector?

$(\tau\alpha)?$

- **Modelado óptico de la cubierta del colector**

$U_L?$

- **Modelado de las pérdidas de calor a través del colector**

$F_R?$

- **Modelado de la distribución de temperaturas en el absorbedor del colector**

- 1 **Introducción**
 - Panorama general

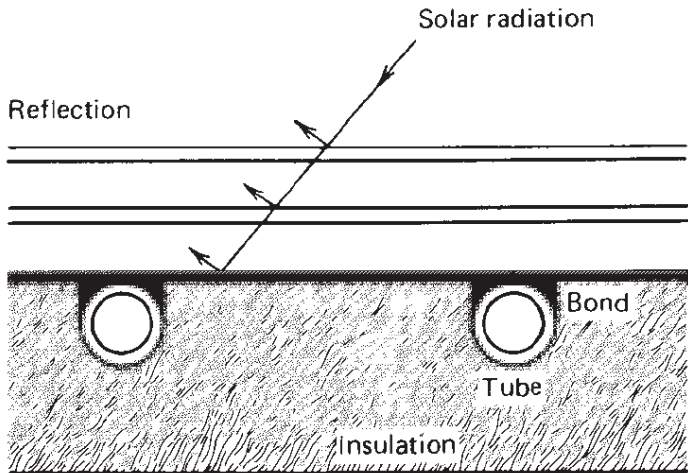
- 2 **Distribución de temperaturas en el absorbedor**
 - Temperatura en el absorbedor

- 3 **Calor útil al fluido**
 - Calor útil y eficiencia de aleta
 - Factor de eficiencia
 - Factor de remoción de calor y factor de flujo
 - Ecuación de eficiencia de un colector

- 4 **Colectores de tubo de vacío**
 - Introducción
 - Colectores de circulación directa
 - Heat Pipes
 - Comentarios finales

GEOMETRÍA DEL COLECTOR PLANO (1)

Geometría: corte de un colector plano con doble cubierta.



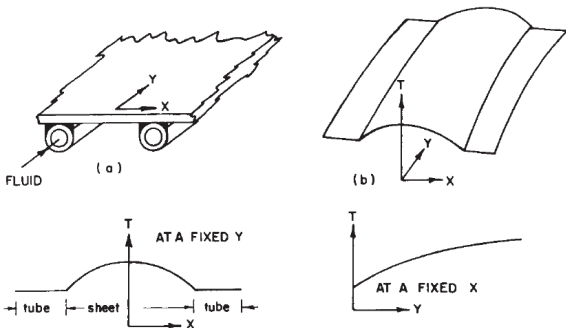
DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS (1)

Análisis cualitativo:

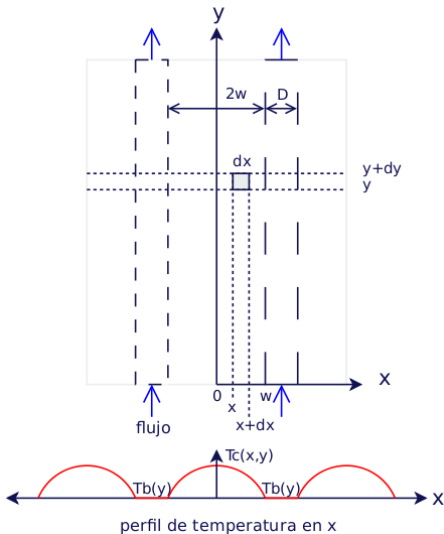
- La temperatura en el absorbedor es una función de x e y .

$$T_c(x, y)$$

- En la dirección y la temperatura aumenta.
- En la dirección x hay un perfil de temperatura.



DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS (2)



Análisis cualitativo:

- $T_c(x, y_0)$ es máxima en el punto medio de los tubos asegura la transferencia de calor hacia los tubos
- $T_c(x, y_0)$ es uniforme sobre los tubos el calor fluye en la dirección z hacia el fluido
- $T_c(x_0, y)$ crece lentamente en la dirección del flujo el fluido se calienta a medida que avanza

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS (4)

Balance de energía en el diferencial: régimen estacionario

$$S - U_L(T_c(x, y) - T_a) + (k\delta) \frac{\partial^2 T_c(x, y)}{\partial^2 x} = 0$$

Lo que lleva a la ecuación diferencial...

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial^2 x} = \frac{U_L}{k\delta} \left(T_c - T_a - \frac{S}{U_L} \right)$$

Con el cambio de variable, $\psi(x, y) = T_c(x, y) - T_a - \frac{S}{U_L}$:

$$\frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial^2 x} - m^2 \psi(x, y) = 0 \quad m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}}$$

Solución: $\psi(x, y) = C_1(y) \sinh(mx) + C_2(y) \cosh(mx)$

- 1 **Introducción**
 - Panorama general

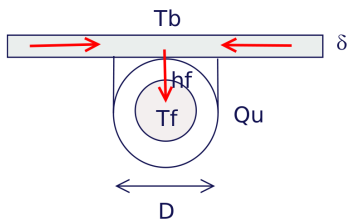
- 2 **Distribución de temperaturas en el absorbedor**
 - Temperatura en el absorbedor

- 3 **Calor útil al fluido**
 - Calor útil y eficiencia de aleta
 - Factor de eficiencia
 - Factor de remoción de calor y factor de flujo
 - Ecuación de eficiencia de un colector

- 4 **Colectores de tubo de vacío**
 - Introducción
 - Colectores de circulación directa
 - Heat Pipes
 - Comentarios finales

CALOR ÚTIL AL FLUIDO (1)

El calor útil al fluido llega por las dos aletas de tamaño W y por el flujo de energía solar que llega directamente a la zona del tubo



$$\delta \dot{q}_u = 2\delta \dot{q}_w + \delta \dot{q}_d$$

$$\delta \dot{q}_w = -k\delta \left. \frac{\partial T_c(x,y)}{\partial x} \right|_{x=W} dy$$

$$\delta \dot{q}_d = D (S - U_L(T_b(y) - T_a)) dy$$

El calor a través de la aleta es:

$$\begin{aligned} \delta \dot{q}_w &= -k\delta \left. \frac{\partial T_c(x,y)}{\partial x} \right|_{x=W} dy = mk\delta [T_S - T_b(y)] \tanh(mW) dy \\ &= \frac{U_L}{m} [T_S - T_b(y)] \tanh(mW) dy \\ &= W [S - U_L(T_b(y) - T_a)] \frac{\tanh(mW)}{mW} dy \end{aligned}$$

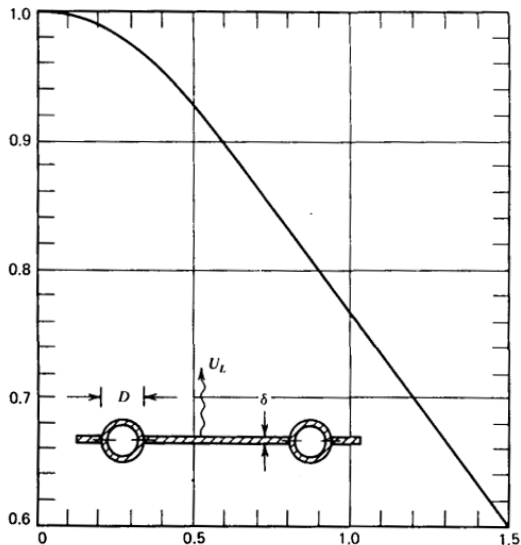
CALOR ÚTIL AL FLUIDO (2)

**Eficiencia
de aleta:**

$$\eta_f = \frac{\tanh(mW)}{mW}$$

función de mW

$$m = \sqrt{U_L/k\delta}$$



CALOR ÚTIL AL FLUIDO (3)

Calor al fluido:

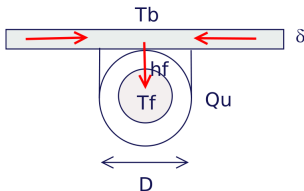
$$\delta \dot{q}_u = 2\delta \dot{q}_w + \dot{q}_d = (2W\eta_f + D) [S - U_L(T_b(y) - T_a)] dy$$

Para calcular el calor total, resta integrar en y ...

$$\dot{Q}_u = \int_0^L \delta \dot{q}_u(y) dy$$

Problema: ¿cuánto vale $T_b(y)$?

Es más conveniente expresar $\delta \dot{q}_u$ en términos de la temperatura del fluido $T_f(y)$



$$\delta \dot{q}_u = \frac{(T_b(y) - T_f(y))}{\frac{1}{\pi D_i h_f} + \frac{1}{C_b}} dy$$

C_b - Conductividad de la juntura.

CALOR ÚTIL AL FLUIDO (4)

Utilizando...

- $\delta\dot{q}_u = (2W\eta_f + D) [S - U_L(T_b(y) - T_a)] dy$
- $T_b(y) = T_f(y) + \delta\dot{q}_u \left(\frac{1}{\pi D_i h_f} + \frac{1}{C_b} \right)$

Se obtiene:

$$\delta\dot{q}_u = l^* F' [S - U_L(T_f(y) - T_a)] dy$$

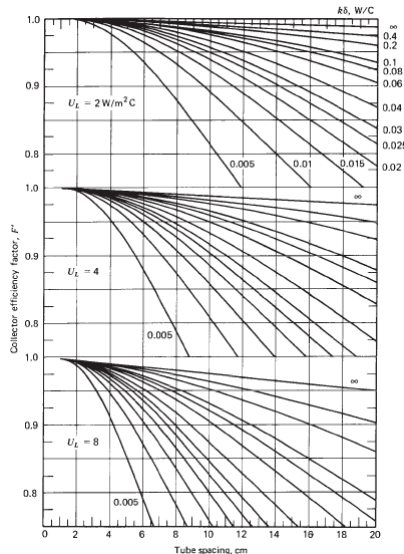
Factor de Eficiencia: F'

$$F' = \frac{1/U_L}{l^* \left[\frac{1}{(2w\eta_f + D)U_L} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]}$$

De esta manera se logra expresar el calor útil en términos de la temperatura del fluido y no de la junta

CALOR ÚTIL AL FLUIDO (5)

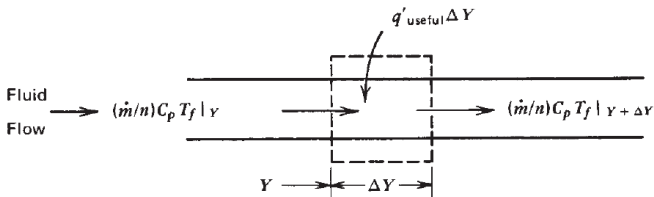
- agrupa la dependencia del calor transferido al fluido en varios parámetros del colector
- depende débilmente de la temperatura: parámetro de diseño
- valor típico $F' \approx 0,85$
- crece con conductividad térmica de placa k
- decrece con el espaciamiento entre ductos



CALOR ÚTIL AL FLUIDO (6)

¿Cuánto vale $T_f(y)$?

Balance de energía al fluido: régimen estacionario



$$(\dot{m}/n)C_p T_f|_y - (\dot{m}/n)C_p T_f|_{y+dy} + \dot{q}_u(y)dy = 0$$

- n – Cantidad de tubos (\dot{m} es el flujo total).

Se obtiene la ecuación diferencia...

$$(\dot{m}/n)C_p \frac{dT_f(y)}{dy} - l^* F' [S - U_L(T_f(y) - T_a)] = 0$$

CALOR ÚTIL AL FLUIDO (6)

Resolviendo la ecuación diferencial...

- T_{fi} – Temperatura de entrada del fluido ($y = 0$).
- $T_f(y)$ – Temperatura del fluido a una distancia y de la base del colector.

$$\frac{T_f(y) - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = \exp \left\{ -\frac{l^* U_L F'}{(\dot{m}/n) C_p} y \right\}$$

Podemos obtener una ecuación para la temperatura de salida!

- Evaluando la ecuación en el largo del colector ($Y = L$).
- Notar que el área del colector es: $A_c \approx nl^*L$.

$$\frac{T_{fo} - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = \exp \left\{ \frac{-A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right\}$$

FACTOR DE REMOCIÓN DE CALOR (1)

Recordamos:

$$F_R = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}'_u} = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L(T_{fi} - T_a)]}$$

Operando...

$$\begin{aligned} F_R &= \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L(T_{fi} - T_a)]} \\ &= \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[\frac{[S/U_L - (T_{fi} - T_a)] - [S/U_L - (T_{fo} - T_a)]}{[S/U_L - (T_{fi} - T_a)]} \right] \\ &= \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \frac{[S/U_L - (T_{fo} - T_a)]}{[S/U_L - (T_{fi} - T_a)]} \right] \end{aligned}$$

Relación entre F_R y F' :

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left\{ \frac{-A_c U_L F'}{\dot{m}C_p} \right\} \right]$$

FACTOR DE REMOCIÓN DE CALOR (2)

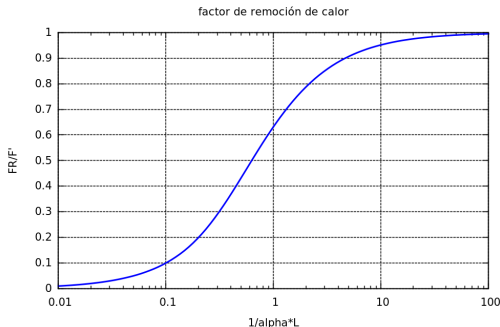
Llamando:

$$\alpha = \frac{l^* U_L F'}{(\dot{m}/n) C_p} = \frac{A_c U_L F'}{L \dot{m} C_p}$$

Factor de flujo del colector:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{1}{\alpha L} [1 - \exp\{-\alpha L\}]$$

- α^{-1} es un largo característico del problema
- $1/\alpha L = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L F'}$ tasa de capacitancia del colector



CONCLUSIONES FINALES

- Hallamos la distribución de temperaturas en el absorbedor

$$T_c(x, y)$$

- Hallamos la variación de temperatura del fluido en el tubo.

$$T_f(y)$$

- Obtuvimos expresiones matemáticas para el cálculo del factor de remoción de calor F_R .
- El factor de remoción de calor es equivalente a la efectividad de un intercambiador de calor:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_u &= A_c F_R [S - U_L(T_{fi} - T_a)] \\ &= A_c \times F_R \times [\text{Maximo calor obtenible}]\end{aligned}$$

- También podemos calcular:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{\dot{Q}_u}{A_c F_R U_L} (1 - F'')$$

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{\dot{Q}_u}{A_c F_R U_L} (1 - F_R)$$

- 1 **Introducción**
 - Panorama general

- 2 **Distribución de temperaturas en el absorbedor**
 - Temperatura en el absorbedor

- 3 **Calor útil al fluido**
 - Calor útil y eficiencia de aleta
 - Factor de eficiencia
 - Factor de remoción de calor y factor de flujo
 - Ecuación de eficiencia de un colector

- 4 **Colectores de tubo de vacío**
 - Introducción
 - Colectores de circulación directa
 - Heat Pipes
 - Comentarios finales

¿CÓMO SEGUIMOS?

Próxima clase...

Colectores de tubo de vacío

INTRODUCCIÓN (1)



El balance de energía en el absorbedor sigue aplicando...

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

Existen algunas formas de aumentar el calor útil

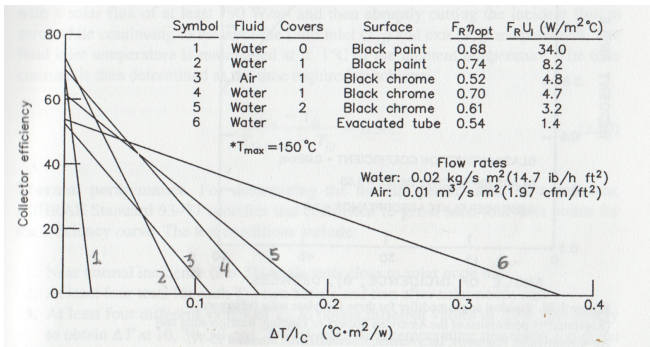
- Aumentar la irradiancia solar colectada ($SA_c \uparrow$).
 - Aumentando el área de colección.
 - Disminuyendo el producto ($\tau\alpha$): $S = (\tau\alpha) \times G_T$.
 - Concentración solar.
- Disminuir las pérdidas ($\dot{Q}_p \downarrow$): **CTE!**

INTRODUCCIÓN (2)

Curva de eficiencia de un colector:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{\Delta T}{G_T} \right)$$

Disminuir el coeficiente global de pérdidas U_L implica una curva de eficiencia con menor pendiente



COLECTORES DE TUBO DE VACÍO (1)

El vacío enrarece el aire dentro del tubo disminuyendo fuertemente las pérdidas por convección.

Típicamente...

$$\text{CPP: } U_L \approx 6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

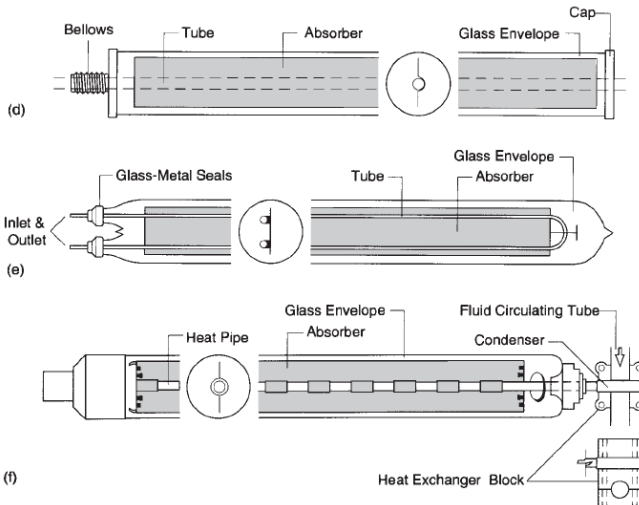
$$\text{CTE: } U_L \approx 1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Colectores de tubo de vacío (CTE):

- Mayor eficiencia que los CPP con alto ($\Delta T/G_T$):
 - Climas con poca irradiancia.
 - Aplicaciones con gran ΔT .
- Para aplicaciones de bajo ΔT o climas con buena irradiancia, son menos eficientes que los CPP.
- Aplicaciones en estas condiciones:
 - Viabilizan calentamiento de agua doméstica en climas fríos.
 - Generación de calor para procesos industriales con demanda de mayor temperatura.

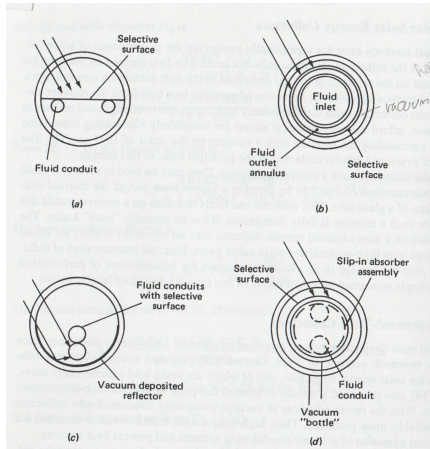
COLECTORES DE TUBO DE VACÍO (3)

Configuraciones de tubos de vacío:



COLECTORES DE TUBO DE VACÍO (4)

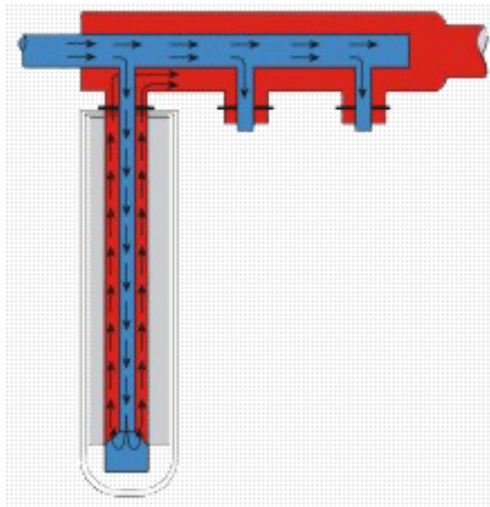
Configuraciones de tubos de vacío:



Superficie reflectora en la base: mejora $\sim 10\%$ la performance al aprovechar la irradiación por debajo del tubo.

COLECTORES DE CIRCULACIÓN DIRECTA (1)

Colector de circulación directa



HEAT PIPES (1)

¿Qué hace un heat pipe?

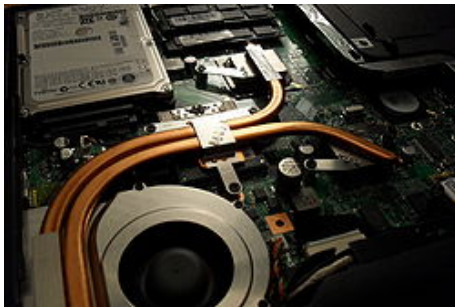
Transfiere calor entre dos puntos distantes,
de un lugar caliente a un lugar frío

¿Cómo se construye?

- Tubo cerrado de un buen conductor térmico.
- Utiliza un fluido caloportador en su interior.
- Terminado en un disipador/condensador

Aplicaciones:

- Motherboards de PCs de alta gama, satélites, energía solar.



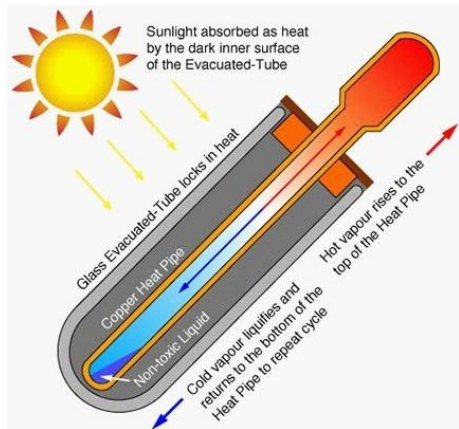
Heat-pipe en motherboard (ASUS)

Funciona por cambio de fase del fluido en su interior: se evapora absorbiendo calor y se condensa en el disipador, cediendo el calor.

HEAT PIPES (2)

¿Cómo funciona un colector solar Heat Pipe?

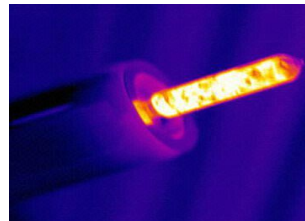
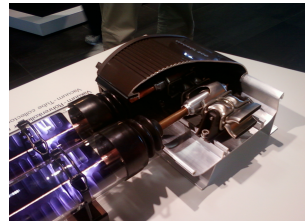
- El líquido se vaporiza por acción de la irradiación solar y sube hasta el dissipador.
- En el dissipador el fluido se condensa liberando calor.
- El líquido condensado retorna al fondo del tubo por gravedad
- Tubos inclinados: requiere inclinación $\beta > 0$ para trabajar.
- Contacto "seco" con fluido de trabajo: permite remover y reemplazar tubos defectuosos sin problemas.



El calor disipado en el condensador se utiliza para calentar agua en un tanque o un flujo de agua a través de un intercambio de calor.

HEAT PIPES (3)

Detalle del disipador/condensador...



Fabrica: Viesmann, Kassel, Alemania.

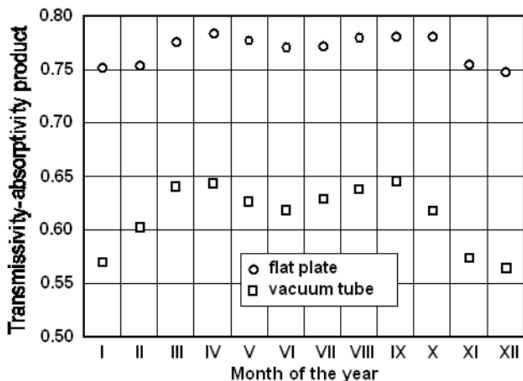
HEAT PIPES (4)

Instalaciones en base a colectores Heat Pipe:



COMENTARIOS FINALES (1)

Los colectores solares de tubo de vacío presentan, en promedio, menor producto ($\tau\alpha$) para una inclinación fija



Medidas realizadas en Polonia a lo largo de un año con $\beta = 35^\circ$.

de [Z. Pluta, Journal of Power Tech., 91(3) 158-164 (2011)]

COMENTARIOS FINALES (2)

Colectores de placa plana

- 1 $A_a/A_c \approx 1$:
Mejor aprovechamiento del espacio.
- 2 $(\tau\alpha) \approx 0,75 \sim 0,80$:
Mejor producto $(\tau\alpha)$
- 3 $U_L \approx 6 \sim 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Mayores pérdidas térmicas:
- 4 $T_S \sim 110^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$:
Menor temperatura de estancamiento,
más seguros.
- 5 Tecnología simple: puede tener larga vida
útil con mantenimiento periódico.
- 6 Menor costo, \$\$.
- 7 Más eficientes con bajo $\Delta T/G_T$:
adecuados para calentamiento de agua
doméstico, piscinas, climas moderados.

Colectores de tubos evacuados

- 1 $A_a/A_c \approx 0,50 \sim 0,60$
en general los CTE tienen más A_c .
- 2 $(\tau\alpha) \approx 0,60 \sim 0,70$
Menor producto $(\tau\alpha)$.
- 3 $U_L \approx 1 \sim 2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Menores pérdidas térmicas:
- 4 $T_S \sim 150^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$
Menos seguros, pérdidas de agua por
válvulas de seguridad.
- 5 Tecnología más compleja: mantenimiento
simple (heat pipes).
- 6 Mayor costo (a calidad similar) \$\$\$.
- 7 Más eficientes con alto $\Delta T/G_T$:
adecuados para agua caliente industrial
de mayor temperatura, climas fríos.

¿CÓMO SEGUIMOS?

Próxima clase...

Aplicaciones térmicas de concentración

A cargo de Horacio Failache