



Available online at www.sciencedirect.com



Solar Energy 76 (2004) 135–140

**SOLAR
ENERGY**

www.elsevier.com/locate/solener

Water-in-glass evacuated tube solar water heaters

G.L. Morrison ^{*}, I. Budihardjo, M. Behnia

School of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Received 17 January 2003; accepted 28 July 2003

Abstract

- LOS COLECTORES DE TUBO DE VACIO TIENEN MEJOR RENDIMIENTO QUE LOS DE PLACA PLANA, ESPECIALMENTE PARA APLICACIONES DE TEMPERATURAS ALTAS
- SE HAN DESARROLLADO DIVERSOS METODOS PARA EXTRAER EL CALOR DE LOS TUBOS, DESTACANDOSE LOS COLECTORES DE AGUA DIRECTAMENTE EN LOS TUBOS DE VIDRIO POR SU SIMPLICIDAD Y BAJO COSTO DE FABRICACION.
- SE ENSAYA UTILIZANDO EL METODO DESCRITO EN LA NORMA ISO 9459-2
- SE DISCUTEN LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FUNCIONAMIENTO DE ESTE TIPO DE COLECTORES Y SE REALIZA UN ESTUDIO NUMERICO DE LA CIRCULACION DE AGUA DENTRO DE TUBOS

Tipos de colectores de tubos

Colectores de vacío cubierta simple

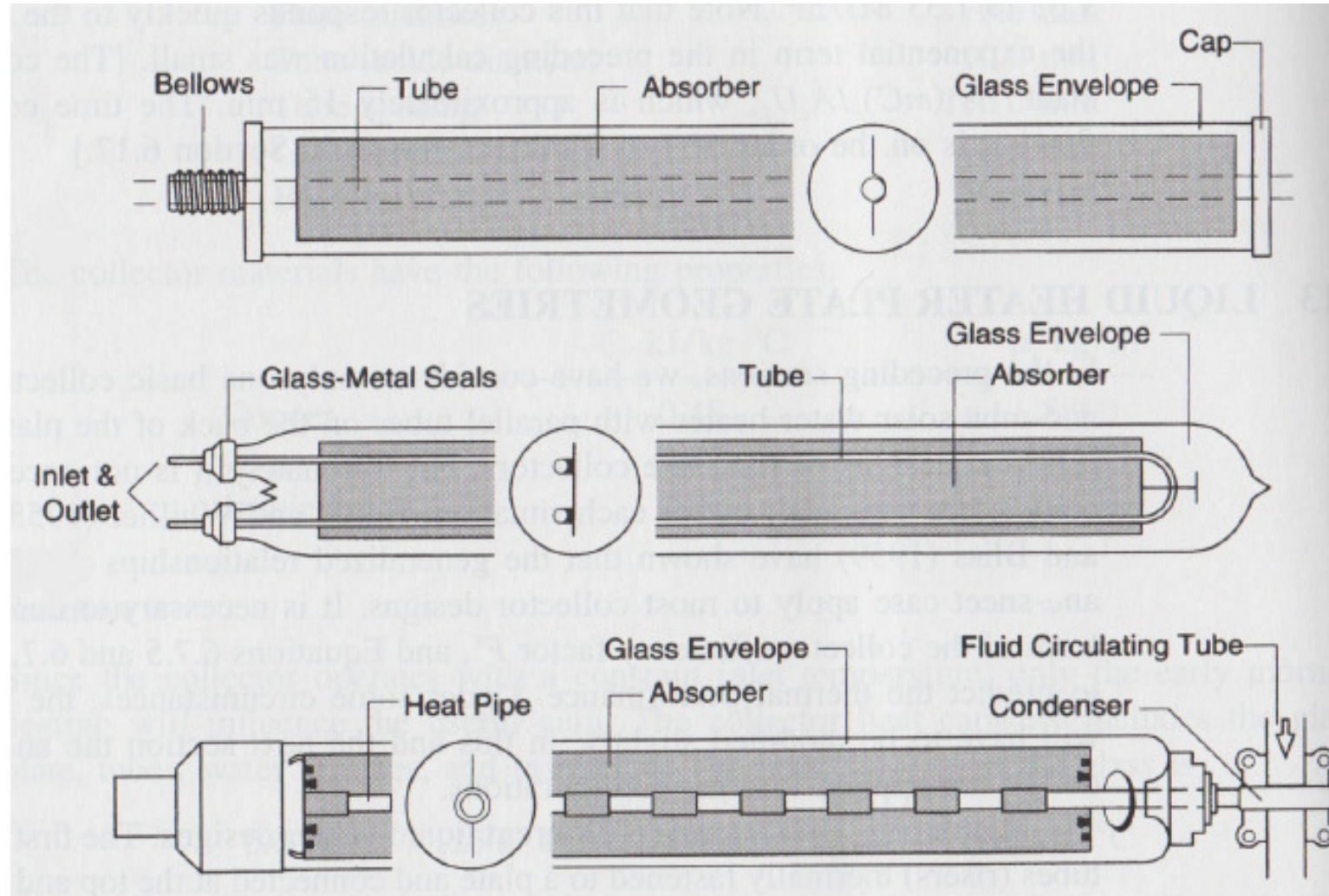
- Pueden adoptar diferentes configuraciones:
 - Agua por tubo interior absorbedor.
 - Agua por tubo en U pegado a superficie absorbadora.
 - Heat-pipe.

De vaso de Dewar

- Algunas configuraciones:
 - Heat-pipe
 - Agua por tubo en U por dentro de vaso Dewar
 - Agua directamente dentro de vaso Dewar

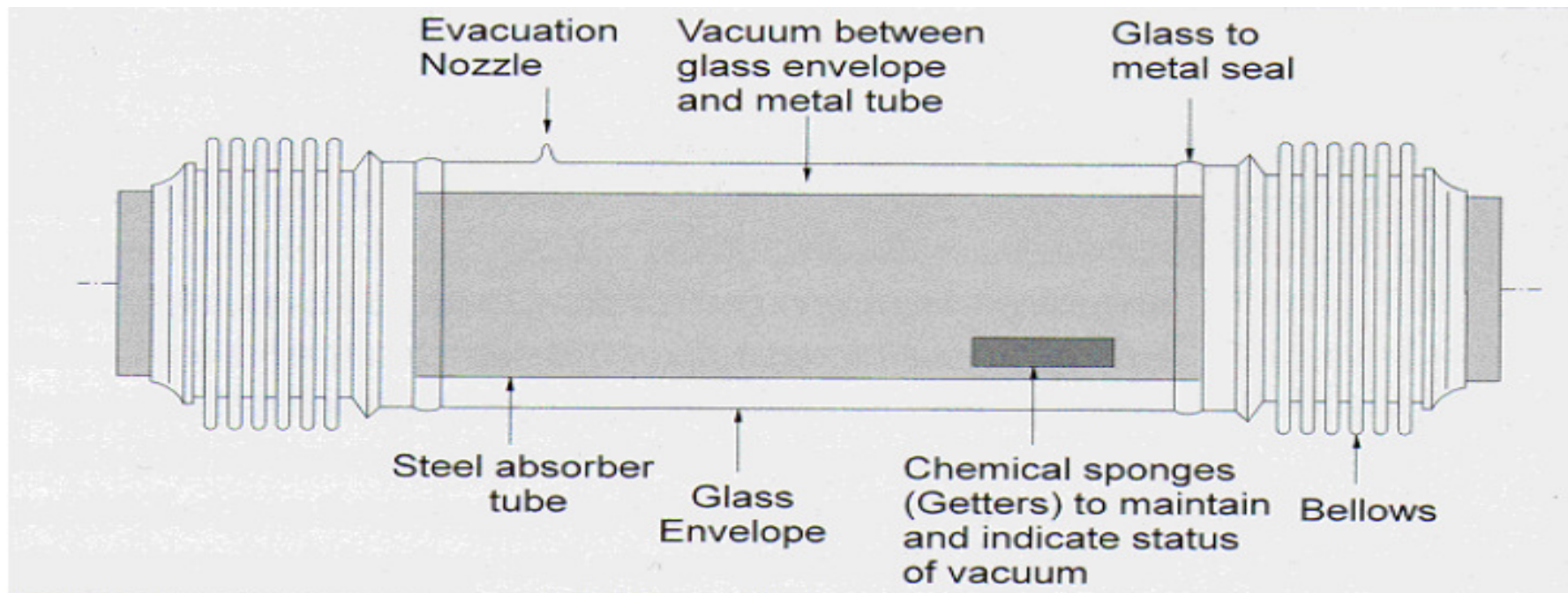


Tubos de cobertura simple



Cubierta Simple

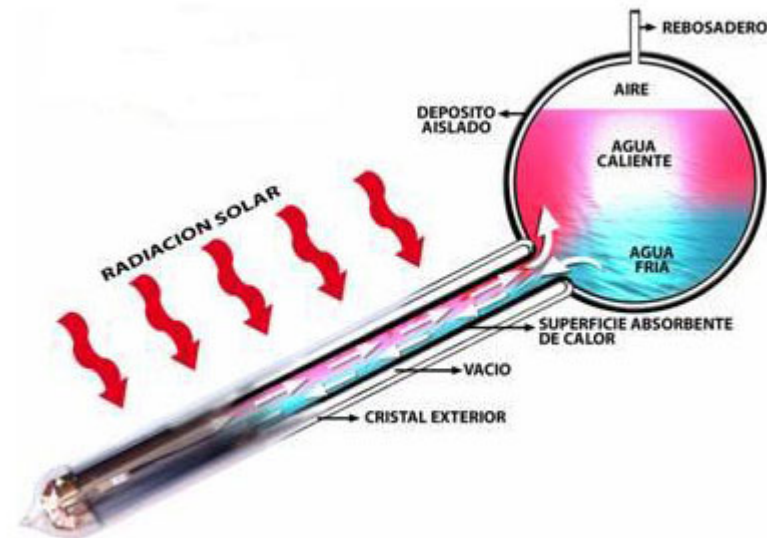
- Fueron los primeros en desarrollarse
- Requieren sello de vacío entre metal y vidrio
- Sellos sufren stress térmico en transitorios.
- Son de difícil montaje y de elevado costo
- Menos robustos en condiciones al aire libre: granizo, viento fuerte, etc.
- Como ventaja resuelven bien la extracción de calor de la superficie absorbadora



Colectores de vaso Dewar

Agua directamente en tubos

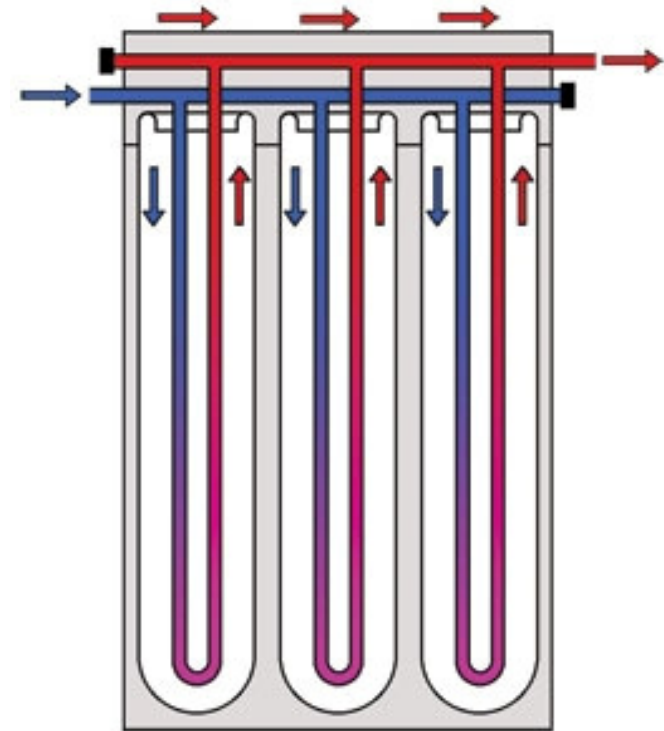
- Son los mas sencillos y baratos.
- Buena transferencia entre la superficie absorbedora y fluido transportador.
- No consumen energía ni requieren de bombeo.
- No soportan alta presión de agua.
- Baja velocidad de respuesta: hasta que no calienta todo el tanque no extraigo calor.
- Problemas con aguas pesadas o con muchas sales (pozos típicos)



Colectores de vaso Dewar

Agua en tubos en U

- Superficie absorbadora es interior de tubo de vidrio.
- Admite altas presiones
- No tiene sellos de vacío
- Costo de tubo U encarece el aparato y el montaje
- Empeora la transferencia al fluido, eficiencia de aleta
- No requiere tanque arriba
- Responde mas rápido que el de agua directamente en tubos

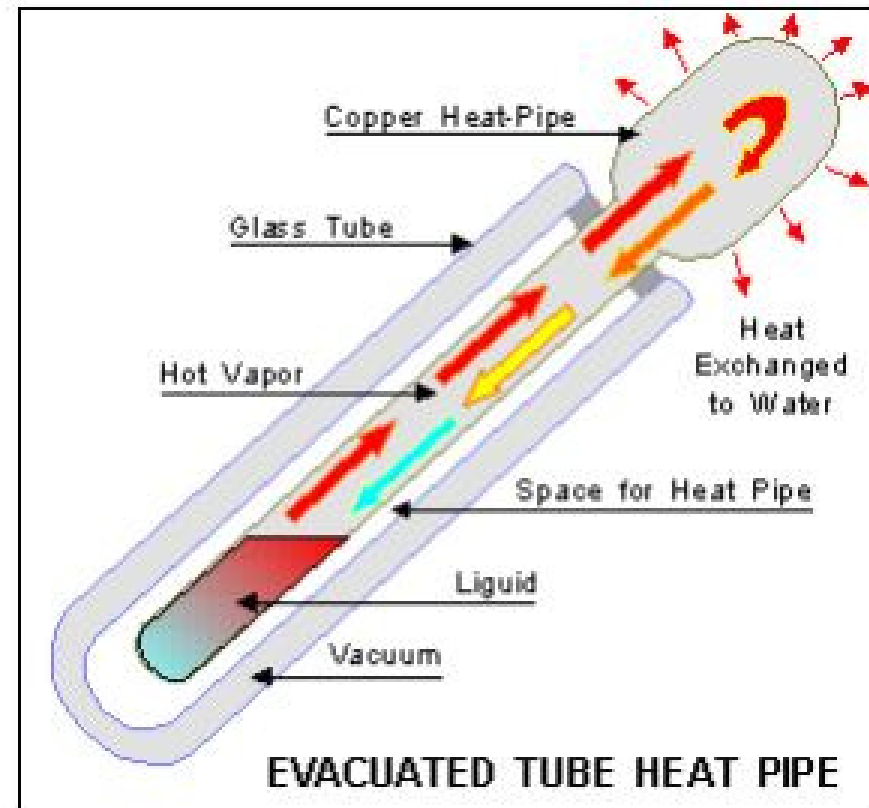




Colectores de vaso Dewar

Heat Pipe

- La transferencia de calor se realiza utilizando un fluido en cambio de fase.
- 2 métodos de extracción del calor:
 - Superficie absorbadora es la cara interior del tubo de vidrio (misma aleta que agua en tubo en U)
 - Superficie absorbadora es aleta en heat-pipe y el tubo de vidrio es transparente.



Heat pipe

**Heat pipe
absorbedor**



Vaso de vidrio absorbedor

Evaluación de performance colector de tubos de vacío con agua.

- Modo de uso: el colector se llena de mañana y se vacía de noche, no se utiliza agua en otro horario.
- Con una bomba se uniformiza la temperatura tanque agua antes de comenzar el ensayo T_{wi} .
- Se mide la temperatura alcanzada al final del día y se calcula el calor útil (Q_u) descontando el Cp del colector.
- Se correlaciona la ecuación $Q_u = a1 + a2.H_T + a3.(T_{wi} - T_A)$ con Q_u medido anteriormente.
- Se ensayó desde $T_{wi} = T_A$ hasta $T_A + 30^\circ\text{C}$

Evaluación de performance

- Resultado
- $Q_u = 0.597 + 1.066 \times HT - 0.208 \times (T_{wi} - T_A)$

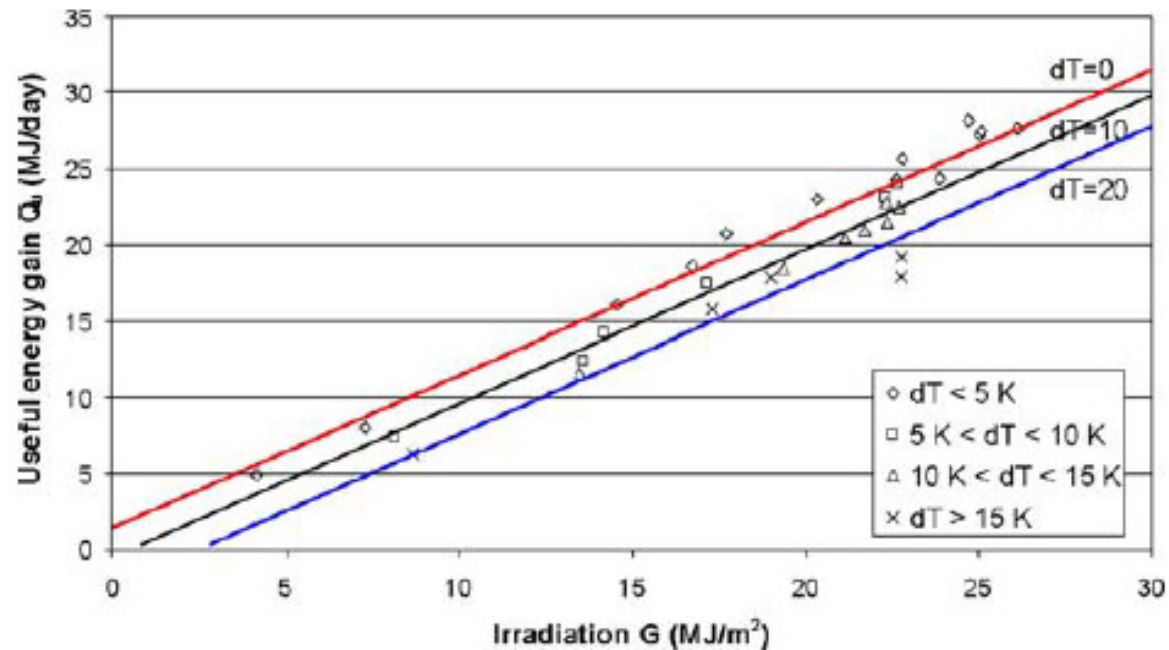


Fig. 4. Measured performance and ISO 9459-2 correlation model.

Evaluación de performance

- Resultado
- $Q_u = 0.597 + 1.066xHT - 0.208x(T_{wi} - T_A)$

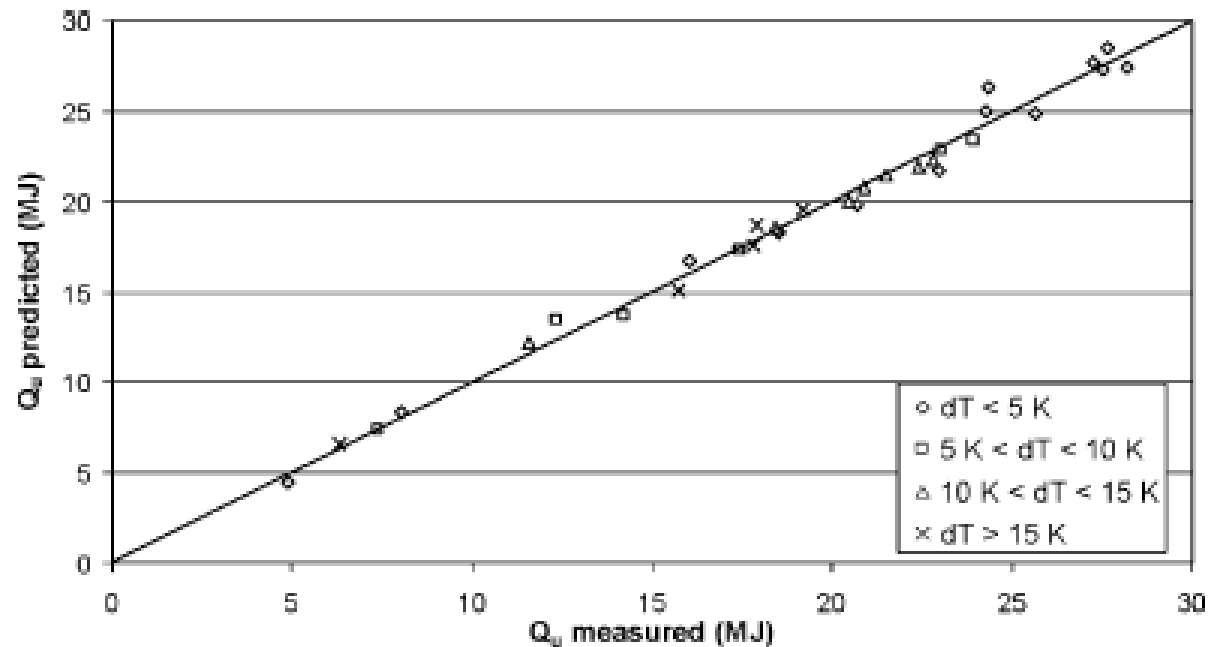


Fig. 5. Comparison of measured daily useful energy and results from the performance correlation.

Evaluación de performance

- Resultado
- $Q_u = 0.597 + 1.066xHT - 0.208x(T_{wi} - T_A)$

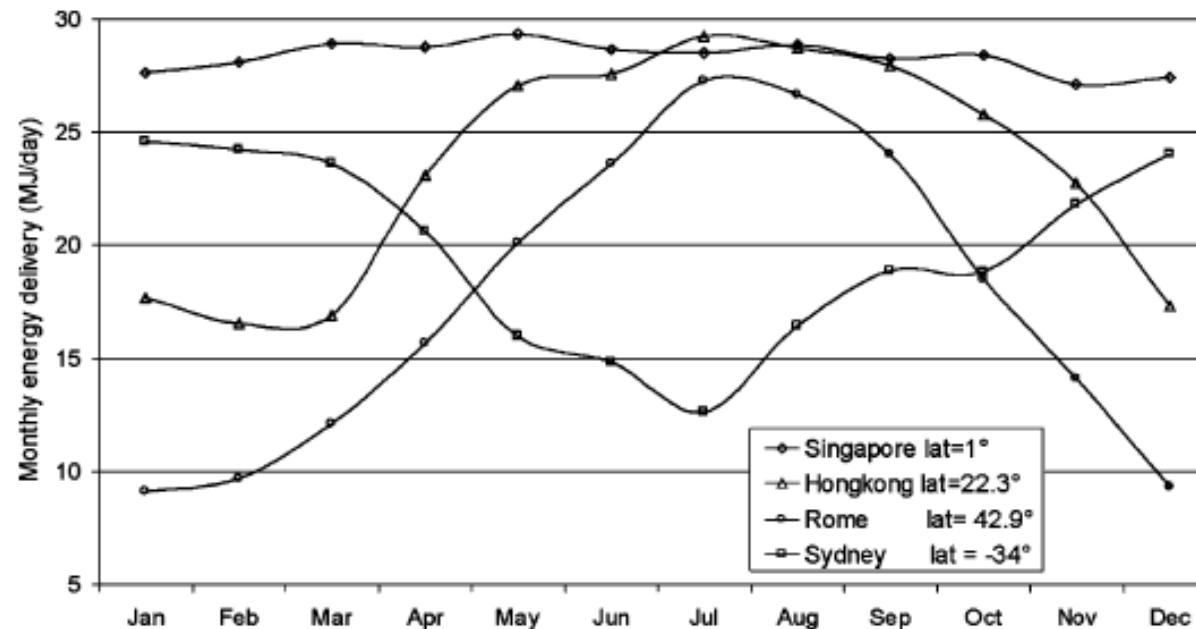
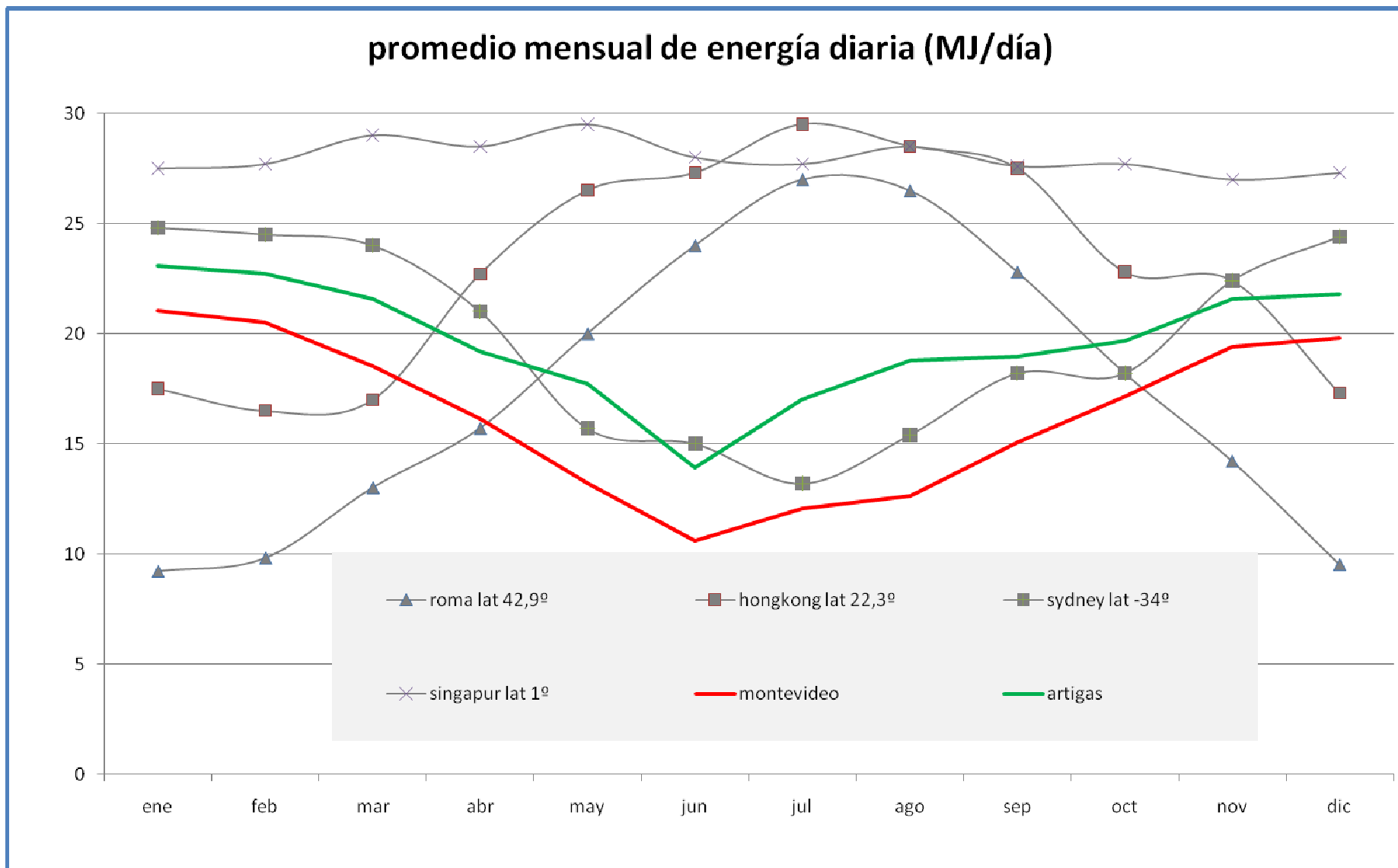
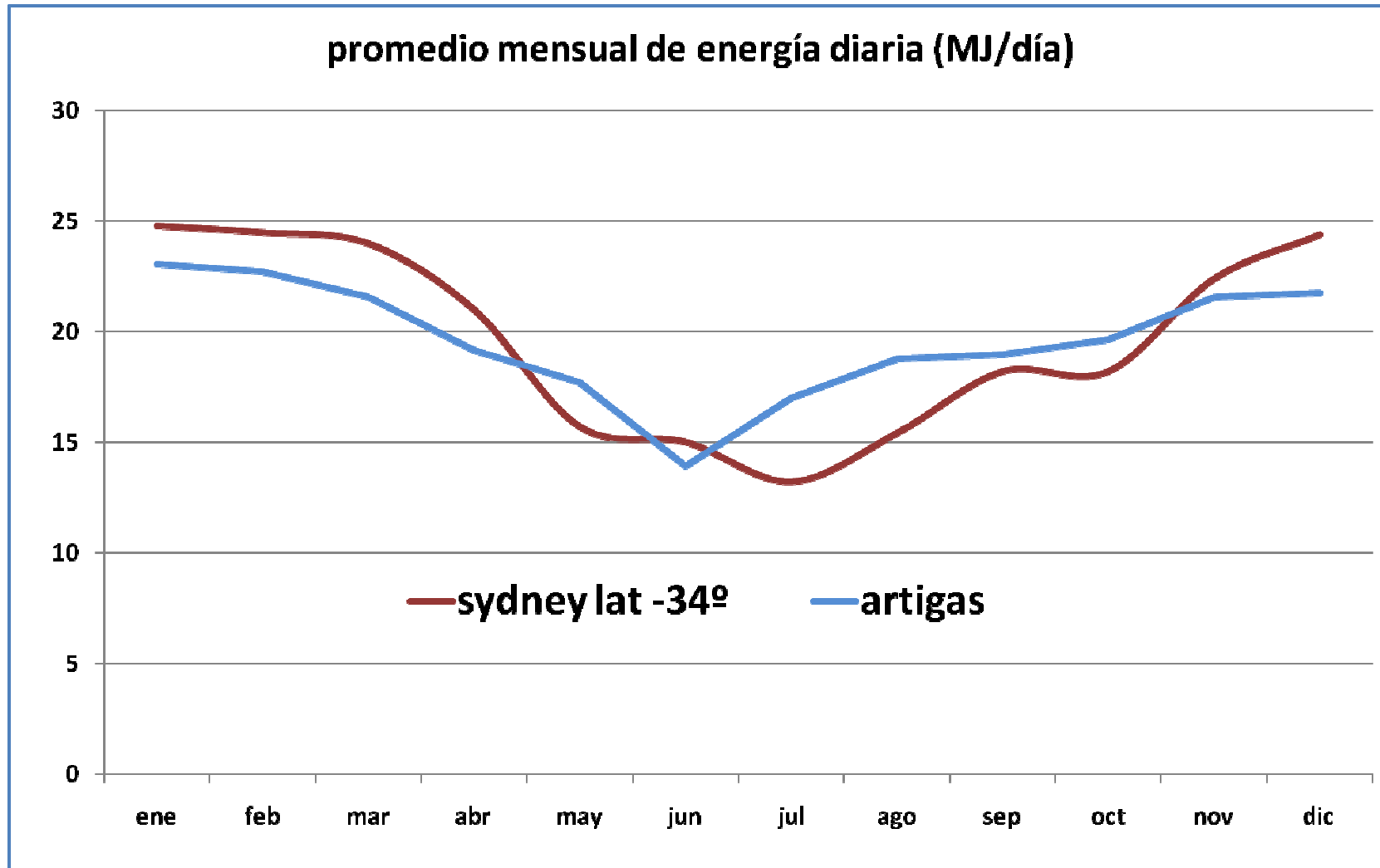


Fig. 6. Daily energy delivery of a water-in-glass solar water heater starting with a cold tank at the beginning of each day.

Evaluación de performance



Evaluación de performance



Detalles para cálculo

- Niveles de Irradiación: se tomaron valores del mapa solar de Uruguay.
- Cálculo de fracción difusa con modelo LIU-JOURDAN

$$\bar{F}_d = 1,390 - 4,027\bar{K}_T + 5,531\bar{K}_T^2 - 3,108\bar{K}_T^3$$

- Se utilizó el modelo isotrópico para la radiación difusa

$$\bar{R}(m, \beta) = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \simeq (1 - \bar{F}_d)\bar{R}_b(m, \beta) + \bar{F}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$\bar{R}_b(m, \beta) = \frac{\bar{H}_{T,b}}{\bar{H}_b} \simeq \frac{\cos \bar{\delta} \cos(\phi + \beta) \sin \bar{\omega}'_s + \bar{\omega}'_s \sin \bar{\delta} \sin(\phi + \beta)}{\cos \bar{\delta} \cos \phi \sin \bar{\omega}_s + \bar{\omega}_s \sin \bar{\delta} \sin \phi}$$

Estimación de eficiencia

- Conociendo el calor útil y la irradiación podemos estimar la eficiencia.
- Descripción de colector.
- 21 tubos cada 1.49 D
- $De/Di = 47/37\text{mm}$
- $L=1400\text{mm}$
- $A=(1+20*1.49)*De*L = 2.03\text{m}^2$ (área de apertura)

$$\eta = \frac{Q_U}{G \times A}$$

Estimación de eficiencia

Qu (MJ/día)	HT (MJ/día.m ²)	Tmed (°C)	η
21,04	18,65	22,7	55,6%
20,51	18,23	22,3	55,4%
18,53	16,73	20,5	54,6%
16,12	15,10	17,2	52,6%
13,19	13,01	13,9	49,9%
10,60	11,14	11	46,9%
12,07	12,58	10,7	47,3%
12,64	12,95	11,5	48,1%
15,05	14,88	13,2	49,8%
17,15	16,36	15,7	51,6%
19,42	17,99	18,3	53,2%
19,81	17,81	21,1	54,8%

- Twi=20°C constante
- Datos para Montevideo

Mejora de la performance

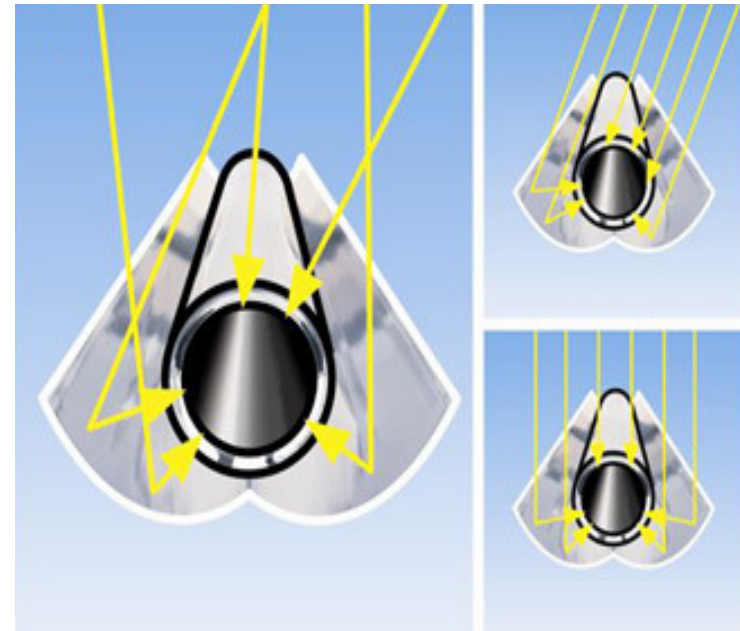
Se discuten a continuación tres aspectos relacionados con la eficiencia del colector:

- Eficiencia óptica del arreglo de tubos
 - Se podría mejorar la eficiencia con un mejor reflector debajo de los tubos.

- Circulación del agua.
 - Angulo entre tubos y tanque.
 - Posibles zonas de estancamiento en tubos.

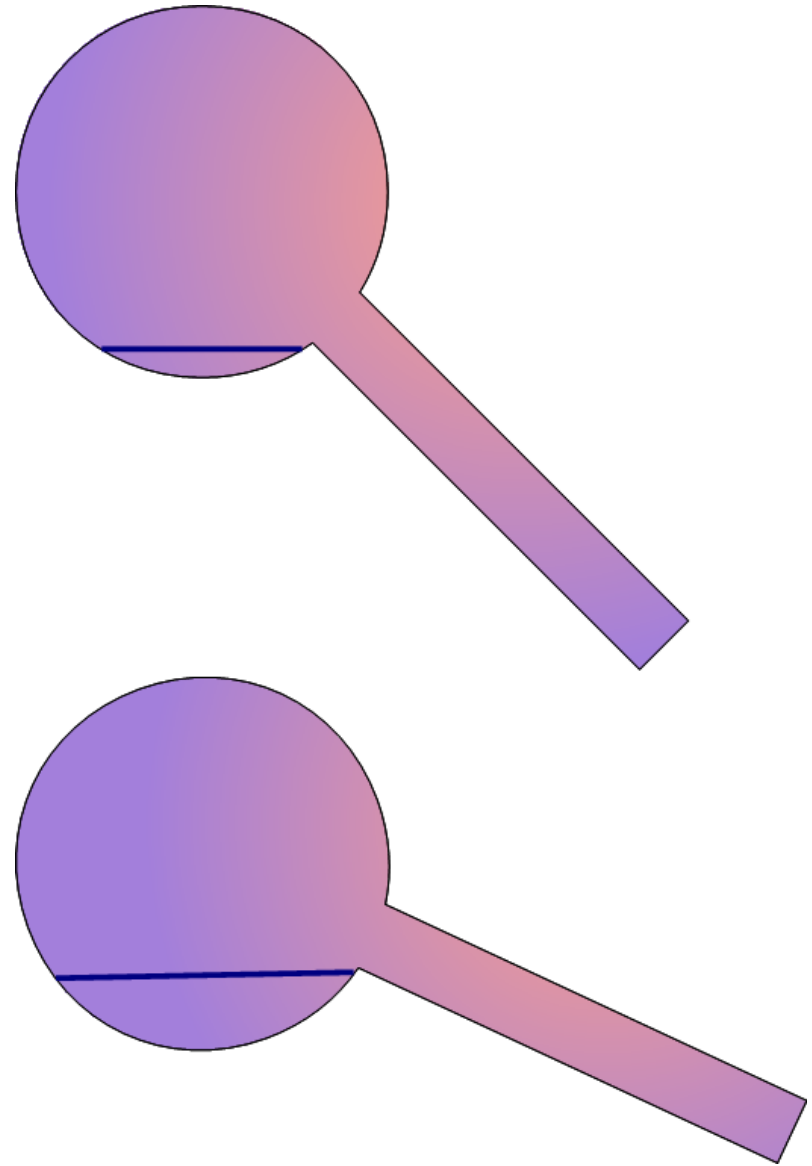
Mejora de reflector debajo de tubos

- El colector ensayado no tiene buena eficiencia óptica.
- Cuenta con un reflector que es una hoja plana texturada de aluminio que solo cubre el 80% del largo de los tubos.
- Se propone un reflector amoldado como el de la figura que disminuya las pérdidas ópticas en el espacio que lo separa de los tubos.



Angulo tubos-tanque

- La inserción de los tubos en diagonal generan una fracción “muerta” en el fondo del tanque.
- En el caso del ensayo este volumen se estimó en un 9% dado que se trabajó en la inclinación de diseño.
- El Cuando el colector no se instala con un ángulo cercano al de diseño se entorpece la circulación por termosifón.



Flujo de agua dentro de tubos

- La extracción de calor desde la superficie absorbadora es uno de los problemas principales a considerar en estos colectores.
- Lighthill (1953) realizó un estudio analítico para termosifones verticales. (T-pared constante)
- Respecto a los tubos con agua predijo que si $T < 350$ ocurre región de estancamiento en el extremo inferior del tubo.

$$T = Ra \left(\frac{L}{r} \right)^{-1} \cos \theta \qquad Ra_x = Gr_x Pr = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_p - T_\infty) L^3$$

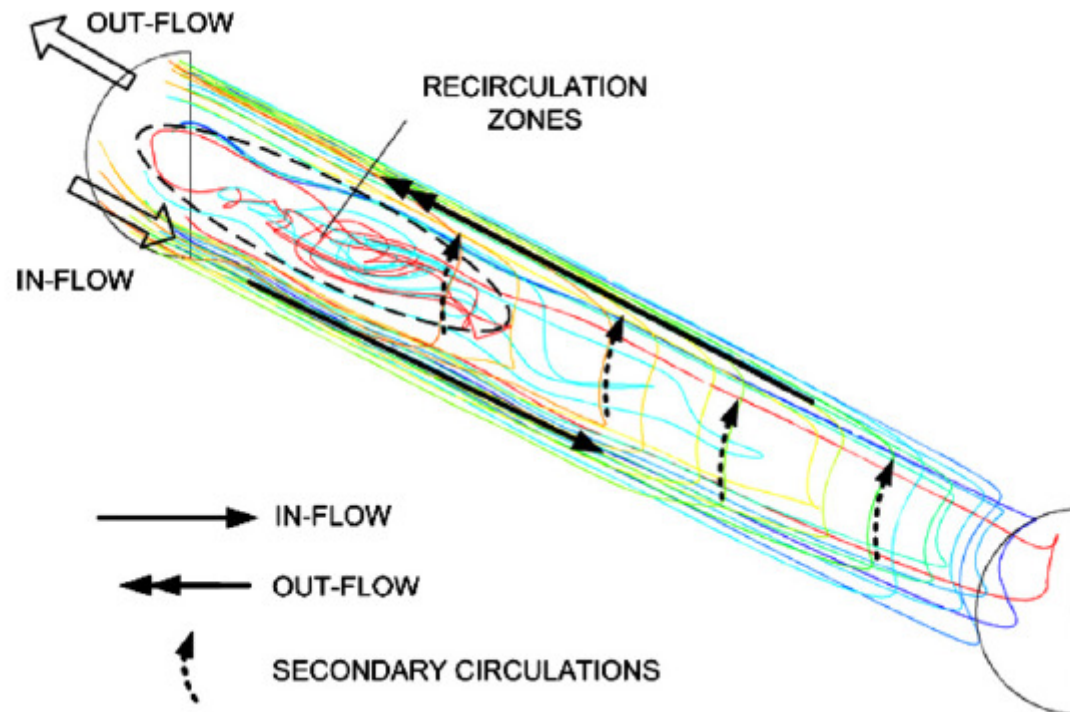
- L/r =relacion de aspecto (largo/diámetro).
- Θ inclinación.

Modelado numérico

- Se modela el tubo como un cilindro con un extremo cerrado, a 45°
- Se considera presión constante en el extremo abierto.
- Se discuten resultados según 3 condiciones de borde:
 - Temperatura de pared constante
 - Flujo de calor uniforme
 - Flujo de calor diferencial.
- El modelo solo consideró flujo laminar con Ra del orden de 10^3 - 10^4

Temperatura de pared constante

- Se generan 2 corrientes bien marcadas:
 - Una superior mas caliente de fluido que sale del tubo
 - Una inferior fría que ingresa al tubo
- A medida que avanza la corriente fría se va calentando, esto genera una corriente ascendente contra la pared del tubo, que al llegar a la parte superior comienza a escurrir hacia afuera del tubo.



Temperatura de pared constante

- Para T_p constante se puede observar una región de estancamiento dentro del tubo
 - Para tubos de $L/r = 10$ para Ra del orden de 3000
 - Para tubos de $L/r = 30$ para Ra del orden de 13000
 - En ambos casos corresponden a valores de T de 200 a 300

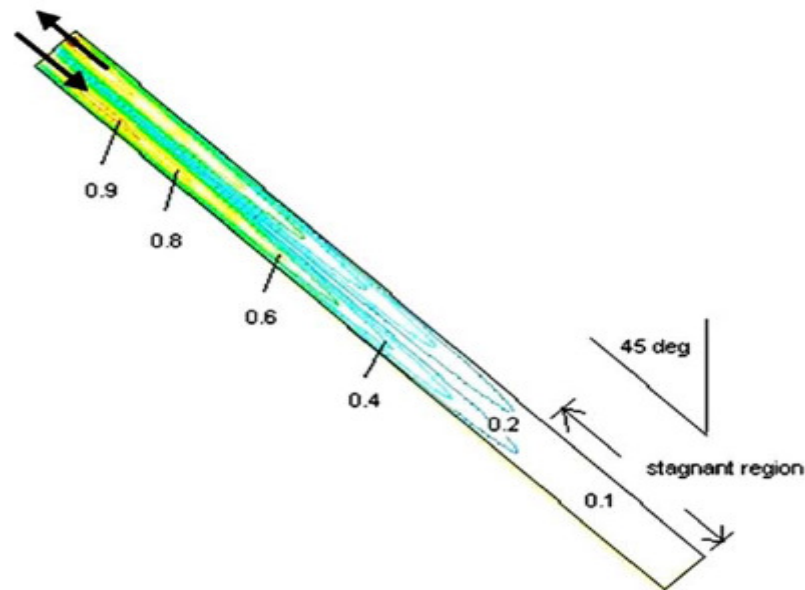


Fig. 7. Normalised velocity distribution in a single-ended evacuated tube, showing a stagnant region in the bottom of the tube ($V_{\max} = 4.1$ m/s).

Con flujo de calor uniforme y diferencial

- Para estudiarlo se dividió el tubo en 32 partes longitudinales
- El flujo de calor se varió desde 1000 W/m^2 hasta 0 W/m^2 .
- También se simuló con flujo de calor constante en la pared.
- No se formó en ningún caso una región inactiva dentro del tubo.

Resultados

Las condiciones de funcionamiento están entremedio de las dos condiciones limite estudiadas, no se puede asegurar que bajo ciertas condiciones no existan regiones de estancamiento para tubos de alta relación de aspecto.

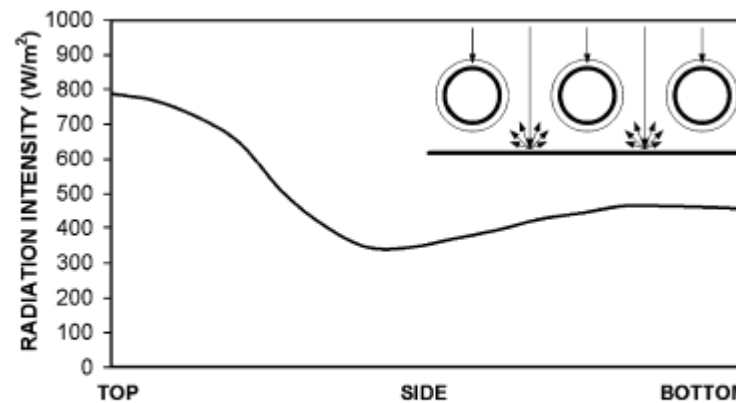


Fig. 3. Circumferential heat flux distribution for evacuated tubes mounted over a diffuse reflector (Cabanillas et al., 1995).