

UTN-FRLP

INFORME FINAL DE PRÁCTICA
SUPERVISADA - MODELIZACIÓN Y
OPTIMIZACIÓN DE COLECTORES
PLANOS

CAMILA QUINTERO

Realizada en Enersol Ingeniería – Energías Alternativas SRL

Objetivos generales:

Aplicar en el campo de las energías renovables los conocimientos adquiridos durante los estudios de la carrera Ingeniería Química, particularmente en el área de transferencia de energía térmica.

Objetivos específicos:

Generar un modelo de cálculo para dimensionamiento y validación de colectores que resulte útil para el desarrollo de una línea de producción antes de realizar los ensayos normalizados según la correspondiente norma IRAM 210002.

Tareas realizadas:

1. Revisión bibliográfica y selección del método de cálculo

Se comenzó por un estudio de los principales parámetros que se utilizan para caracterizar a los colectores, especialmente aquellos involucrados en su ecuación de rendimiento. Un colector solar es básicamente un intercambiador de calor, pero presenta dos características altamente distintivas:

- El flujo de energía que ingresa al mismo es variable a lo largo del día y del año
- Los mecanismos de transferencia de energía por radiación juegan un papel importante

Un colector solar de placa plana se encuentra constituido básicamente por tres partes principales:

- Una superficie negra o selectiva absorbadora que es la encargada de transferir energía al fluido de trabajo
- Una cubierta transparente a la radiación del espectro solar que a la vez permite reducir las pérdidas energéticas por convección y radiación.
- Una cubierta trasera aislante que reduce las pérdidas por convección

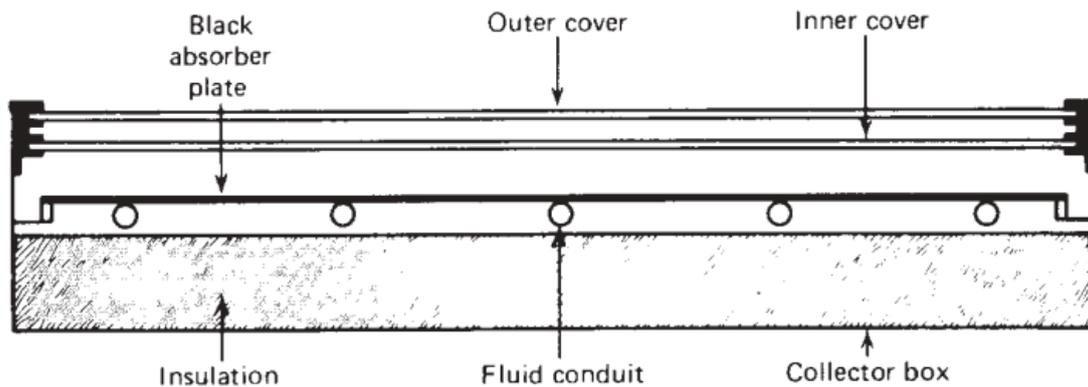


Ilustración 1: colector solar térmico de placa plana
Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

Los colectores son caracterizados internacionalmente mediante su recta de rendimiento, disponible en las datasheets de los equipos. El rendimiento puede definirse en líneas generales como:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_r}$$

Donde:

\dot{Q}_u = tasa de transferencia de calor al fluido

\dot{Q}_r = tasa con la que incide la energía solar

La energía incidente sobre el colector puede expresarse como el producto entre la irradiancia solar sobre el plano inclinado en W/m^2 y el área útil del colector

$$\dot{Q}_r = I_t A_c$$

Teniendo en cuenta que el calor absorbido por el fluido es igual a la resta entre el calor absorbido por el equipo y el perdido por los tres mecanismos de transferencia de calor:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{perd}$$

Debido a las características ópticas de los materiales constituyentes del colector, no toda la energía incidente logra ingresar al mismo. La tasa efectiva de ingreso o absorción de energía por parte del sistema puede expresarse como:

$$\dot{Q}_{abs} = \tau \alpha I_t A_c$$

Donde τ es la transmitancia del vidrio exterior del equipo y α es la absortancia de la superficie absorbente.

La tasa con la cual el colector pierde energía mediante los tres mecanismos de transferencia de calor puede expresarse mediante la denominada ecuación de diseño de

un intercambiador, que involucra al coeficiente global de transferencia de calor (en este caso, coeficiente global de pérdidas), el área de transferencia y la fuerza impulsora que es, en este caso, la diferencia entre la temperatura media del colector y la temperatura ambiente.

$$\dot{Q}_{perd} = U_L A_c (T - T_{amb})$$

Reemplazando todas estas expresiones en la ecuación de rendimiento y reordenando términos puede llegarse a la siguiente ecuación lineal:

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_e - T_{amb})}{I}$$

Donde $(\tau\alpha)_n$ es el coeficiente óptico (ordenada al origen de la recta) y $F_R U_L$ es el coeficiente global de pérdidas, asociado a la pendiente de la misma. Puede observarse que para incrementar el rendimiento sería deseable que el primer término tenga el mayor valor posible y que el segundo sea mínimo. Con respecto al segundo término, puede verse que un coeficiente global de pérdidas elevado hace caer el rendimiento rápidamente cuando la diferencia de temperatura entre el colector y el ambiente se incrementa, mientras que un coeficiente bajo se asocia con una caída más gradual del rendimiento frente al aumento de este delta de temperaturas. A continuación se ilustran las gráficas típicas de las ecuaciones de rendimiento para distintos tipos de colectores.

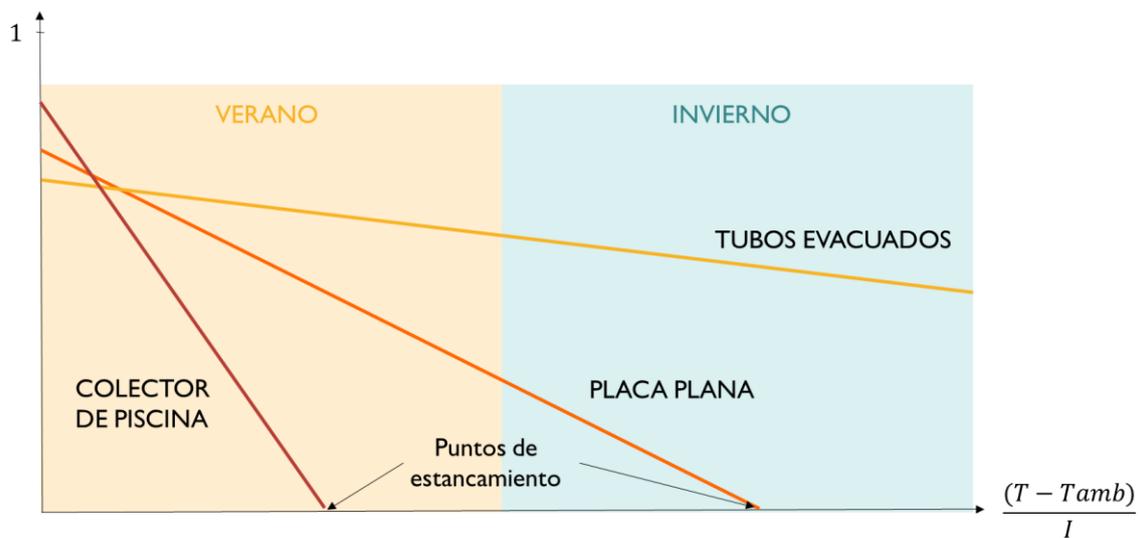


Ilustración 2: curvas de rendimiento típicas de colectores
Fuente: elaboración propia en base a datos de hojas técnicas

Resulta esencial poder predecir el comportamiento de los colectores diseñados previo a su ensayo, para dirigir correctamente los esfuerzos durante su diseño. El parámetro más importante a determinar de forma preliminar es el coeficiente global de pérdidas.

Se procedió posteriormente a elegir un método de cálculo apropiado para el coeficiente global de pérdidas de colectores y se seleccionó el propuesto por Solar Engineering of Thermal processes – 4ta edición.

Este método establece que la pérdida de energía por la parte superior del colector es el resultado de los fenómenos de convección y radiación de la cubierta superior, entre las capas de cubierta sucesivas y entre la primera cubierta y la placa absorbadora. Teniendo en cuenta que el flujo de energía térmica en estado estacionario a través de todas estas capas debe ser el mismo se llega a la expresión:

$$q_{sup} = (h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1})(T_p - T_{c1})$$

$$h_{c,p-c1} = \frac{kNu}{L}$$

$$h_{r,p-c1} = \frac{\sigma(T_p + T_{c1})(T_p^2 + T_{c1}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1}$$

Donde $h_{c,p-c1}$ es el coeficiente pelicular convectivo de transferencia de calor entre dos placas inclinadas obtenido en función de número de Nusselt, $h_{r,p-c1}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, σ es la constante de Stefan Boltzman, T son las temperaturas de las superficies (placa y cubierta) y ε son las emisividades de las mismas.

La resistencia correspondiente a la sección superior del colector R3 puede expresarse como:

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}}$$

Una expresión similar puede obtenerse para R2, que es la resistencia entre dos cubiertas sucesivas.

La resistencia al flujo de energía térmica ente el cobertor superior y los alrededores se calcula de forma análoga teniendo en cuenta que el coeficiente convectivo h_w corresponde al de una placa inclinada expuesta a la atmósfera y que el intercambio por radiación se da con el cielo terrestre que se encuentra a una determinada temperatura T_s . El coeficiente de transferencia por radiación referido a la temperatura ambiente T_a se expresa como:

$$h_{r,c2-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_{c2} + T_s)(T_{c2}^2 + T_s^2)(T_{c2} - T_s)}{(T_{c2} + T_a)}$$

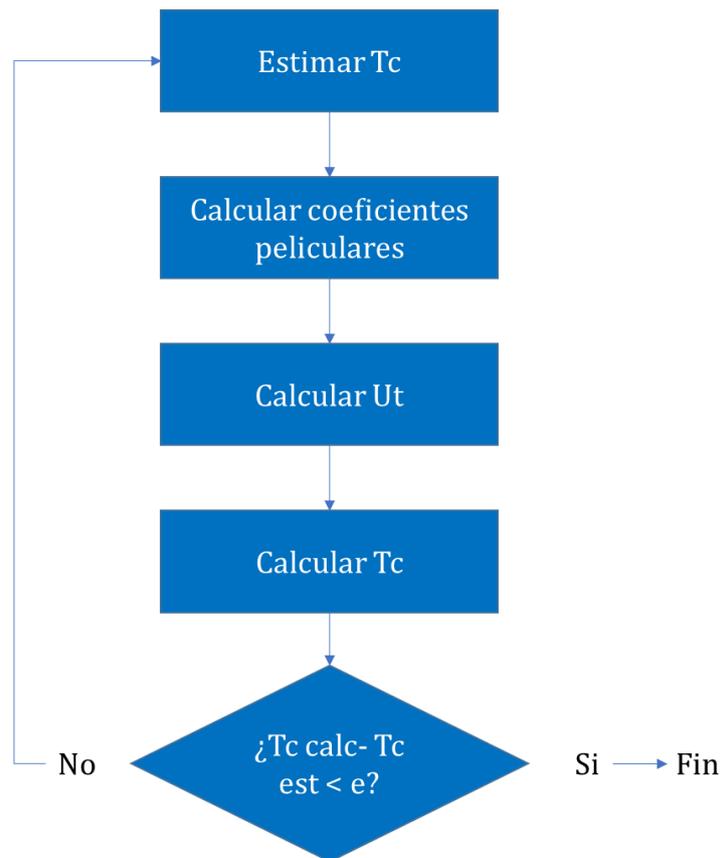
La resistencia R1 es entonces:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + (T_{c2} + T_s)}$$

El coeficiente global de pérdidas por la parte superior para un colector de dos cubiertas puede calcularse entonces como:

$$U_{top} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

El cálculo de este coeficiente requiere de la utilización de un proceso iterativo ya que no se conoce de antemano la temperatura de las cubiertas. El procedimiento se ilustra en la siguiente imagen.



*Ilustración 3: algoritmo de cálculo del coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector
Fuente: Elaboración propia en base a Solar Engineering of Thermal Processes*

Las pérdidas de energía a través de la parte inferior se calculan teniendo en cuenta dos resistencias en serie R_4 (conducción a través del aislamiento) y R_5 (convección-radiación con el ambiente). Teniendo en cuenta que la resistencia R_5 es en general mucho menor que R_4 se la desprecia para los cálculos de modo que el coeficiente global de pérdidas por la parte inferior se expresa como:

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L}$$

Donde k es la conductividad del aislante y L es su espesor.

En la mayoría de los casos la evaluación de las pérdidas laterales es complicada. Sin embargo, teniendo buenas prácticas en el diseño pueden obtenerse coeficientes de transferencia bajos de modo que no resulta imperativa la estimación de los mismos con una alta precisión. Este coeficiente se estima asumiendo un flujo de energía unidimensional en sentido lateral alrededor del perímetro del equipo y se referencia al área del colector A_c .

$$U_e = \frac{\left(\frac{k}{L}\right) p e}{A_c}$$

Donde k es la conductividad del material aislante lateral del colector, L su espesor, p el perímetro del equipo y e el espesor del equipo.

Teniendo en cuenta los tres coeficientes de pérdidas (superior, inferior y lateral) el coeficiente global de pérdidas del equipo puede calcularse como:

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

A continuación se incluye un esquema del modelo utilizado en función de los coeficientes peliculares (izquierda) y de resistencias (derecha).

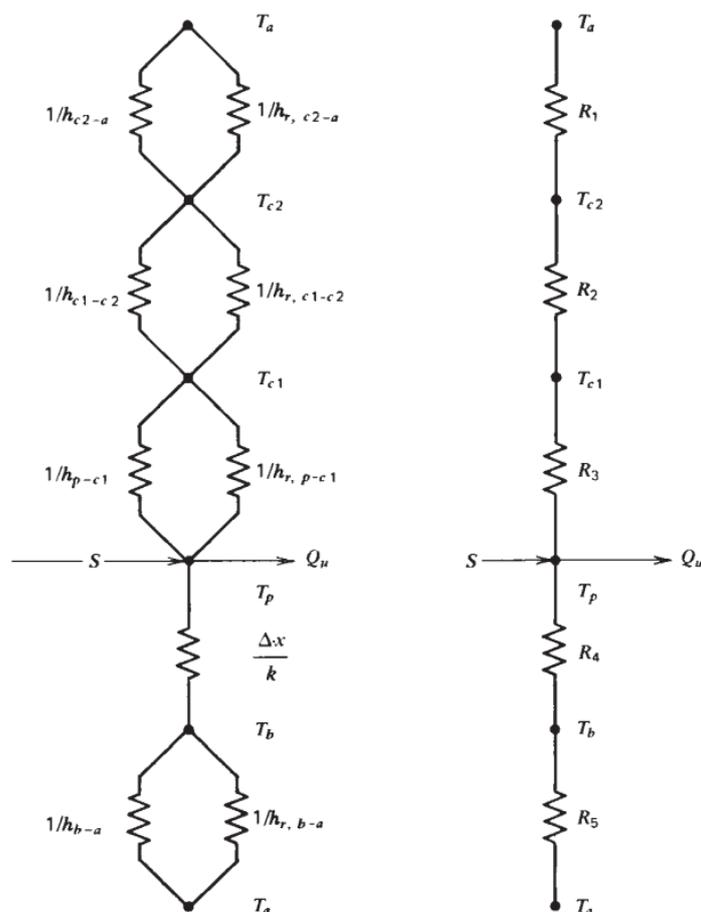


Ilustración 4: modelo circuital para el cálculo del coeficiente global de pérdidas de un colector solar de placa plana

Fuente: Solar Engineering of Therma Processes

Adicionalmente se estudiaron las normas de ensayo utilizadas para caracterizar este tipo de equipos (IRAM 210002). Las condiciones de ensayo establecidas serán las utilizadas como condiciones base para el cálculo del coeficiente global de pérdidas.

Parámetro	Valor	Desviación de la media
Radiación global G [W/m ²]	700	+/- 50
Radiación difusa Gd/G [%]	<15	
Ángulo de incidencia [°]	<30	
Velocidad del viento [m/s]	2-5	+/- 0,5

Tabla 1: parámetros de ensayo de colectores solares
Fuente: Norma IRAM 210002

2. Relevamiento de constantes

Se realizó un relevamiento de las principales constantes térmicas y ópticas de los materiales comúnmente utilizados en la construcción de colectores solares planos.

Adicionalmente se relevaron las principales propiedades del fluido de trabajo (agua) en un rango de temperaturas apropiado para la aplicación para poder realizar el cálculo de los números adimensionales involucrados en el modelo previamente expuesto.

Los datos de viscosidad experimentales fueron ajustados a un polinomio de segundo grado para facilitar el posterior proceso iterativo como se muestra en la figura:

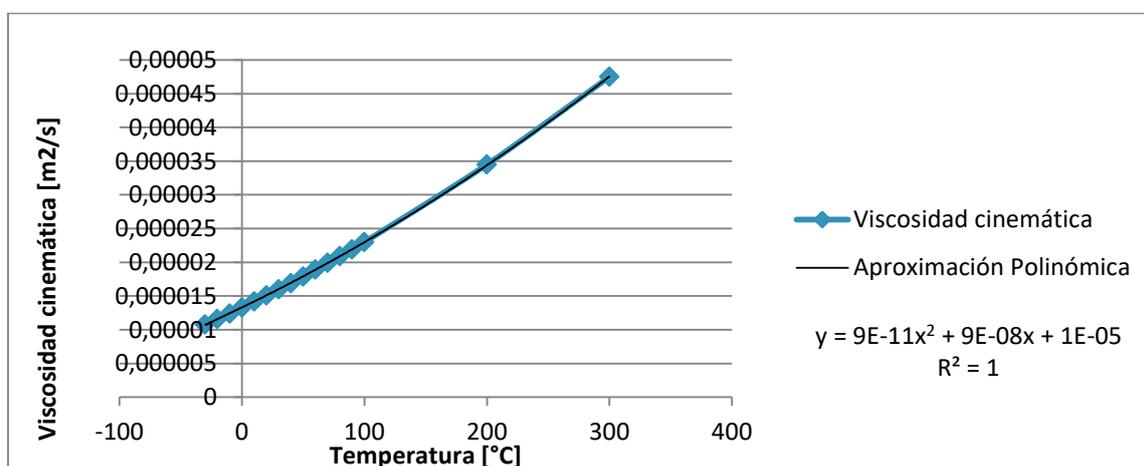


Ilustración 5: ajuste de curva de viscosidad cinemática a un polinomio de segundo grado
Fuente: elaboración propia

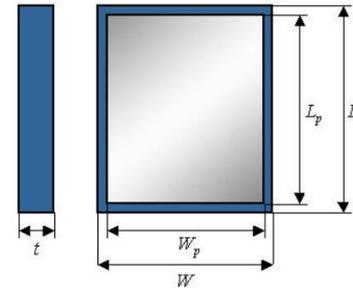
3. Confección de planilla Excel

El método de cálculo seleccionado requiere de un proceso iterativo para obtener los coeficientes peliculares. Por esta razón se decidió confeccionar el modelo en Excel de modo de poder realizar de forma sencilla esta iteración. Además, esto permite variar de forma sencilla la geometría, materiales, número de cubiertas y espaciados entre las distintas capas del colector a fin de poder confeccionar diferentes equipos según las necesidades particulares y disponibilidad de recursos que se presenten.

Los datos de entrada que pueden ser modificados se ilustran en las siguientes tablas:

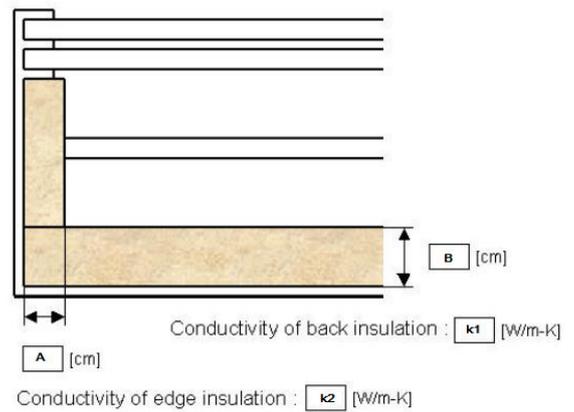
Dimensiones del colector:

Alto	L		(m)
Ancho	W		(m)
Espesor	t		(m)
Area bruta	Ac		(m ²)
Perímetro	Ac		(m)



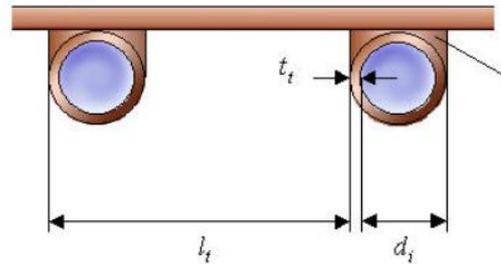
Características del aislamiento:

Espesor de la aislación lateral	A		(m)
Espesor de la aislación fondo	B		(m)
Conductividad de la aislación fondo	ka1		(W/m.ºK)
Conductividad de la aislación lateral	ka2		(W/m.ºK)



Tubos:

Número de tubos	Nt		
Diametro Interior	Di		(m)
Diametro Exterior	De		(m)
Distancia entre Tubos	W		(m)
Conductividad Soldadura	Cb		(W/m.ºK)
Coef trans dentro tubo	Hf		W/m2ºC



Cubierta y placa absorbadora:

		Material		<input type="text"/>	
CUBIERTA 2	Espectro Solar	Índice Refracción	n		
		Transmitancia			
	Long-Wave	Absortancia			
		Transmitancia			

		Material		<input type="text"/>	
CUBIERTA 1	Espectro Solar	Índice Refracción	n		

		Transmitancia			
	Long-Wave	Absortancia			
		Transmitancia			

Distancia entre Cubiertas C1 y C2			
Distancia entre Cubierta y placa C2 y P			

		Material	<input type="text"/>
PLACA	Conductividad		(W/m°C)
	Espesor		(m)
	Espectro Solar	Absortancia	
	Long-Wave	Emitancia	ϵ_p

Una vez cargados todos los datos se indica el ángulo de inclinación del panel, la temperatura ambiente y se fijan las condiciones iniciales de temperatura de cubiertas para iniciar la iteración.

Una vez que el programa finaliza la iteración los coeficientes peliculares y el coeficiente global de pérdidas pueden leerse en la pestaña de resultados. A continuación, se muestran los resultados correspondientes a un ejemplo de cálculo de [1] ensayado para verificar el correcto funcionamiento del modelo.

Coeficientes de radiación		
hr, p-c1	5,86	W/(m ² .°C)
hr, c1-c2	4,99	W/(m ² .°C)
hr, c2-a	4,93	W/(m ² .°C)

Coeficientes de Convección		
hc, p-c1	2,68	W/(m ² .°C)
hc, c1-c2	2,28	W/(m ² .°C)
hw	10,00	W/(m ² .°C)

Resistencias		
R1	0,07	(m ² .°C)/W
R2	0,14	(m ² .°C)/W
R3	0,12	(m ² .°C)/W

Ut	5,43	W/m ² °C
Ue (lateral)	0,41	W/m ² °C
Ub (fondo)	1,13	W/m ² °C
UL	6,96	W/m² °C

Adicionalmente se verificó la capacidad de predicción del coeficiente global de pérdidas del modelo en base a los datos experimentales de hoja técnica de un colector de placa plana obteniendo resultados satisfactorios.

4. Confección de presentación para capacitaciones de la empresa

En última instancia se confeccionó una presentación en formato Power Point de la que la empresa hará uso en los cursos de capacitación dictados. En la misma se explica el modelo de cálculo del coeficiente global de pérdidas y el procedimiento para utilizar correctamente la planilla de cálculo confeccionada.