

## **PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACIÓN DEL AIRE EN UN COLECTOR PARA CALEFACCIÓN**

**N. Salvo, A. Hernandez**

Universidad Nacional de Salta – Instituto de Energías no Convencionales (INENCO) – Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas – Avenida Bolivia 5150 - C.P. 4400 – Salta Tel. 54-387-4255424 – Fax 54-387-4255489

E-mail: [nahuel@unsa.edu.ar](mailto:nahuel@unsa.edu.ar) - [alejo@unsa.edu.ar](mailto:alejo@unsa.edu.ar)

### **RESUMEN:**

Colectores solares donde el fluido de trabajo es aire, son por lo general utilizados para el acondicionamiento térmico de locales. La implementación de diferentes técnicas de cálculo permiten determinar valores de las principales variables involucradas. Por lo general se utilizan técnicas en elementos finitos o diferencias finitas para describir al flujo que circula en el colector. El estudio de las diferentes pérdidas de carga dentro de un colector es de gran importancia, porque permite considerar los efectos que provocan las diferentes partes o secciones de la geometría del sistema sobre el flujo. Por lo tanto es posible determinar las caídas de presión y a partir de ello determinar una curva de eficiencia del colector.

En este trabajo se muestran los valores obtenidos para la eficiencia analizando un colector solar de aire desde el punto de vista hidrodinámico. El colector consta de una chapa absorbidora con agujeros a través de los cuales circula aire. Se determina la eficiencia como función de las diferentes caídas de presión, temperaturas de funcionamiento, radiación incidente, etc. Se muestran las ecuaciones utilizadas en el cálculo.

**Palabras clave:** cálculo eficiencia, convección natural, colectores planos

### **INTRODUCCION**

Existen muchas situaciones donde el fenómeno de convección natural esta presente, pero es de sumo interés analizarlo en colectores solares donde el fluido de trabajo es aire. Este tipo de colectores generalmente son utilizados para calefaccionar locales, para secado de productos agrícolas, etc. En todos los casos el movimiento del fluido es el principal responsable de transportar la energía que absorbe el colector del sol. Teniendo en cuenta, que la posición del colector y su geometría son importantes y que estos dos factores son las principales variables que determinan la circulación del fluido en su interior, es necesario contar con un método de cálculo sencillo para determinar valores de, por ejemplo, eficiencia (definida convenientemente).

También hay que notar que la transferencia de calor por convección depende en general de las propiedades del fluido, de la superficie de contacto con el fluido y de las características del flujo. Para el caso de convección natural, la disminución de la densidad por efecto de aumento de volumen en la zona de absorción es el fenómeno responsable de la circulación. Por lo tanto en este tipo de fenómeno las fuerzas de flotación que se generan en el fluido son las responsables del movimiento. Un aspecto importante es que en este tipo de fenómenos determinar una velocidad característica del fluido no es fácil de obtener en forma teórica.

Entre las propiedades de la superficie, donde se manifiesta el fenómeno, la geometría juega un papel importante. Si se considera todo el circuito por donde circula el fluido, que involucra a todo un colector, la fricción en diferentes tramos y las pérdidas menores en codos, cambios de sección, etc. también determinan la forma de circulación del flujo. Estas consideraciones además determinan si el flujo es laminar o turbulento, lo que también influye en la velocidad de transferencia de energía (calor) por convección y en otros aspectos hidrodinámicos.

A partir de estas consideraciones, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos de analizar a un colector, cuyo fluido de trabajo es aire, utilizando principalmente consideraciones hidrodinámicas. Como se mencionó anteriormente, como no es posible determinar una velocidad característica en el fenómeno de convección, se utilizaron valores medidos de esta variable en la entrada del colector.

Como prototipo de ensayo, se utilizó un equipo construido en el marco del Proyecto N° 1.579 (Consejo de Investigación – UNSa.) “Diseño, evaluación y desarrollo de un colector solar calentador de aire del tipo loop convectivo vertical para el calefaccionado de edificios”. También este trabajo se enmarca en el Proyecto 1367/4 (Consejo de Investigación – UNSa.) “Elementos finitos en problemas de transferencia de calor”.

## MODELO PROPUESTO

En la figura 1, se muestran las principales características del sistema analizado. Este se caracteriza por tener dos boquillas, una de entrada y otra de salida, además la zona de absorción de energía (placa colectora) está dispuesta en forma diagonal en el interior del colector. Esta placa tiene una serie de agujeros por donde circula el aire que proviene de la sección (1).

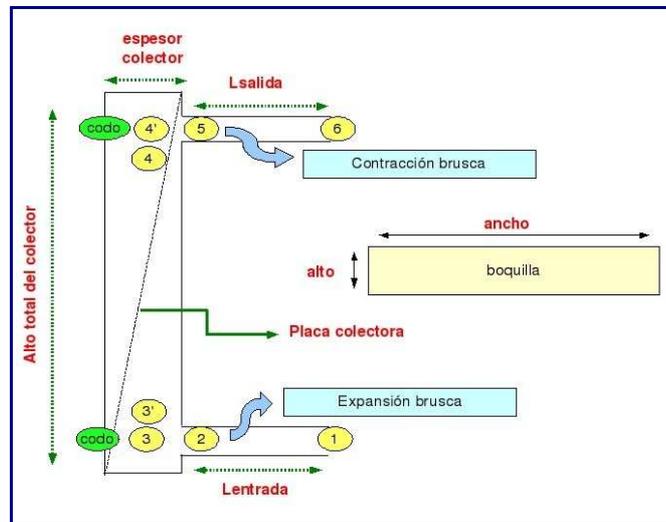


Figura 1: Esquema del circuito donde circula el aire en un colector.

Como valores de entrada para los diferentes cálculos, se consideran datos de velocidad de aire tomados en la parte inferior del colector (1). El colector funciona adosado a un recinto cerrado, los cálculos se realizan para dos días de ensayo cerca del mediodía solar para el plano del colector.

Datos Generales del Colector							
Boquilla de entrada			Boquilla de Salida				
Ancho (m)	Alto (m)	Lentrada (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Lsalida (m)		
0,47	0,04	0,17	0,47	0,04	0,17	Ancho total (m)	0,9
						Alto total (m)	2,14
						Espesor (m)	0,05
Diámetro Agujero (m)		0,006	Longitud Placa Perforada (m)		2		

Tabla 1: Valores de parámetros geométricos del colector.

Constantes física del aire T=350 K)		
Densidad	995,0E-3	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	2,08E-005	N s/m <sup>2</sup>
Cond. Térmica	30,0E-3	W/m K
Capacidad Calorífica	1009	J/Kg K
factor fricción turbulencia		
Factor fricción turbulento fT	0,017	
sigma=A_agujero/A_placa	0,3620	

Tabla 2: Constantes físicas utilizadas en el análisis hidrodinámico del colector.

En las tablas que anteriores se describen las principales variables geométricas del colector y valores de las diferentes constantes físicas utilizadas en el análisis.

## HIPOTESIS DE TRABAJO

Se consideró al colector como un sistema de tuberías, las cuales están todas conectadas en serie, para la zona donde se encuentra la placa perforada, puntos (3') a (4) en la figura 1, se considera por separado la pérdida de carga sin la chapa, sumando un término que considera la presencia de la chapa perforada.

Se supone que la presión en la entrada del colector es la presión atmosférica, (1) en la diagrama de la figura 1. A partir de este punto se aplican las ecuaciones que se detallan a continuación. En cada caso se considerará la pérdida de carga correspondiente. Como los valores de la velocidad varían significativamente en el período de ensayo del colector, los valores del Re (Número de Reynolds) y por lo tanto los factores de fricción también cambian en el mismo período. Esto hace que las características del flujo no sean constantes durante el ensayo y también en los cálculos realizados.

(1)

A lo largo del colector, los conductos cambian de dimensiones en los diferentes tramos, por lo tanto se utilizó para los cálculos el Diámetro Hidráulico ( $D_h$ ), de esta forma las ecuaciones que siguen pueden ser aplicadas correctamente. Hay que tener en cuenta que de esta forma se tiene un valor de diámetro hidráulico para cada sección.

Para el caso de tuberías rectas, las pérdidas por fricción pueden calcularse a partir de la ecuación de Darcy, donde  $f$  se define como el factor de fricción que se calcula utilizando la ecuación experimental de Barr.

$$D_h = 4 \frac{\text{Area}}{\text{Perímetro mojado}} \quad h_L = \underbrace{\left( f \frac{L}{D_h} \right) \frac{v^2}{2g}}_{\text{ec. Darcy Tubería Recta}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon_r}{3.7} + \frac{5.1286}{Re^{0.89}} \right) \quad (3) \quad \epsilon_r = \underbrace{\frac{\epsilon}{D_h}}_{\text{rugosidad relativa}} \quad (4)$$

*Ecuación de Barr*

$$\frac{L'}{efecto\ de\ entrada} = 4.4 Re^{1/6} D \quad (5)$$

*salida*

En las ecuaciones anteriores, las diferentes variables representan:

- |   |  |
|---|--|
| L = longitud de la tubería (sección del colector considerada) | L' = longitud equivalente por efecto de entrada y salida |
| v = velocidad   | $h_L$ = Pérdida principal = $\Delta p / \rho g$          |
| g = aceleración de la gravedad                                | $\rho$ = densidad  |
| $\epsilon$ = rugosidad  | Re = Número de Reynolds                                  |

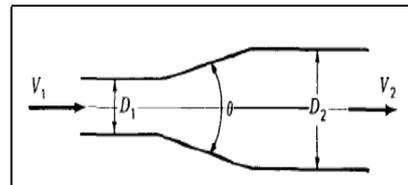
$$\underbrace{h_L = K \frac{v^2}{2}}_{\text{Pérdida de Altura en valvulas o accesorios}} \quad (6)$$

*independiente de Re y f*

Para la geometría del colector hay que tener en cuenta que cuando el fluido sale de la boquilla de entrada, se encuentra con una expansión brusca y un codo a 90°, en la salida sucede todo lo contrario o sea un codo de 90° y una contracción brusca, para estas singularidades se consideraron las siguientes ecuaciones:

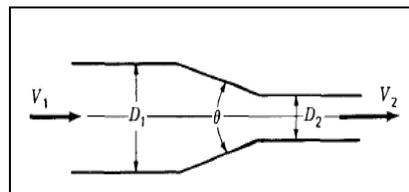
$$K_{12} = \frac{[1 - (D_{h1}/D_{h2})^2]^2}{(D_{h1}/D_{h2})^4} \rightarrow h_L = K_{12} \frac{V_2^2}{2} \quad (7)$$

*expansión brusca*



$$K_{12} = \frac{0,5[1 - (Dh_2/Dh_1)^2] \sqrt{\sin 45}}{(Dh_2/Dh_1)^4} \rightarrow h_i = K \frac{V_1^2}{2} \quad (8)$$

*contracción brusca*



Para las curvas en 90° se consideró la siguiente hipótesis de trabajo:

**CURVAS EN ESCUADRA  
O FALSA ESCUADRA**

$\alpha$	K
0°	2 $f_T$
15°	4 $f_T$
30°	8 $f_T$
45°	15 $f_T$
60°	25 $f_T$
75°	40 $f_T$
90°	60 $f_T$

$f_T$  es un factor de fricción turbulento que se encuentra tabulado para distintos números de Reynolds. En la sección donde se encuentra la chapa perforada se utiliza una correlación para el cambio de presión en los agujeros:

$$\Delta p = \frac{\rho Q}{A_p} 6.82 \left( \frac{1-\sigma}{\sigma} \right)^2 Re_D^{-0.236} \quad (9)$$

*salto de presión en los agujeros*

donde  $\sigma$  representa la relación entre Area de agujeros y Area de placa.  $Re_D$  es el número de Reynolds calculado en los agujeros. Esta correlación es utilizada frecuentemente para calcular el cambio de presión en medios porosos.

Otra ecuación que se aplicó entre cada tramo fue la ecuación de Bernoulli modificada. A partir de esta ecuación se puede calcular la pérdida de presión por efecto del rozamiento del fluido con las paredes, se expresa como: (para dos puntos cualquiera (a), (b):

$$\frac{v_a^2}{2g} + y_a + \frac{p_a}{\rho g} = \frac{v_b^2}{2g} + y_b + \frac{p_b}{\rho g} + h_p \quad (10)$$

*ecuación de Bernoulli modificada*

además se puede expresar a partir del 1er Principio de la Termodinámica aplicado a un tubo de corriente:

$$\left( \frac{p_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} + g z_a \right) - \left( \frac{p_b}{\rho} + \frac{v_b^2}{2} + g z_b \right) = (U_b - U_a) - \frac{dQ}{dm} \quad (11)$$

Donde cada término representa:

- pa, pb = presión de entrada y de salida
- va, vb = velocidad de entrada y de salida
- za, zb = alturas
- Ua, Ub = energía interna
- dQ/dm = calor por unidad de masa aplicado entre (a) y (b)

## RESULTADOS

Las ecuaciones anteriores fueron programadas y se calcularon las diferentes variables en cada tramo del colector. Como se mencionó la variable principal de entrada fue la velocidad medida durante el ensayo. También se midieron Temperatura de entrada, Temperatura de salida, Temperatura ambiente e Irradiancia sobre el plano del colector (plano vertical). Para el caso de temperatura de entrada, el ensayo del colector se realizó cambiando la temperatura del aire en la entrada del colector calentándolo antes que ingrese al sistema.

La figura 2 muestra los valores de velocidad del aire a la entrada del colector. De las gráficas puede apreciarse, como se mencionó anteriormente, que las características del flujo son muy aleatorias, siendo el segundo día de medias el mejor en lo que respecta a la uniformidad de los valores.

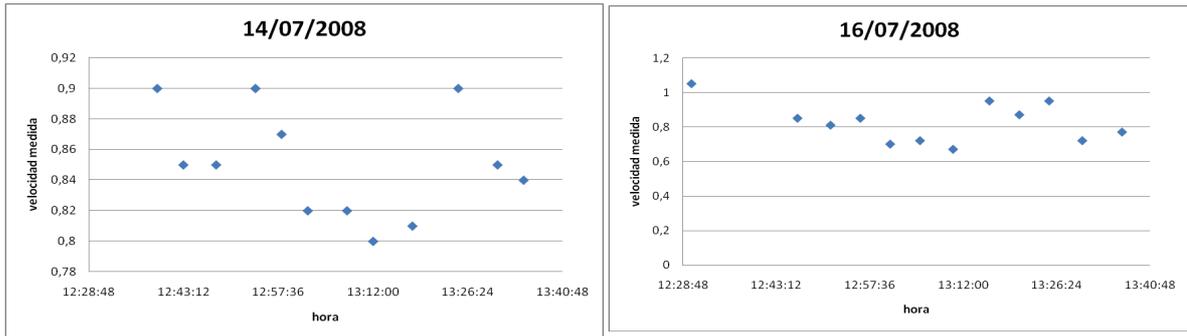


Figura 2: Valores de velocidad medidos a la entrada del colector

En la figura 3 se representa, para los mismos días de medición los valores de irradiancia. También están representadas dos variables más. Una que se denomina S (potencia) y otra llamada Qutil. Este último representa el producto del flujo másico, por la capacidad calorífica del aire, por una diferencia de temperatura entre la salida y la entrada al colector. Todos los datos utilizados están en los mismos intervalos de tiempo.

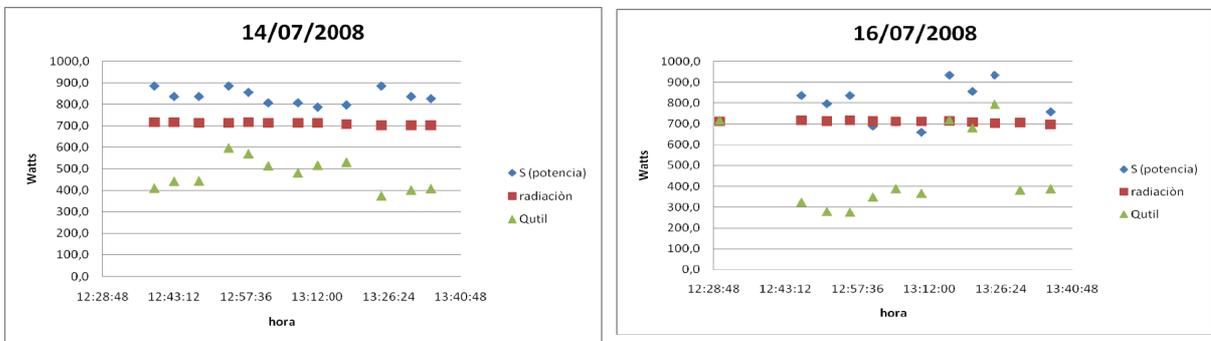


Figura 3: Valores de diferentes energías involucradas en la circulación del fluido en el colector

La variable S, representa el segundo miembro de la ecuación del primer principio de la termodinámica por una relación de áreas. (ec. 11). En particular una relación entre el área del colector y la superficie de la placa colectora. Esta variable es la que luego se utiliza para definir la eficiencia. O sea, representa la diferencia de energía mecánica entre entrada y salida y por lo tanto esta relacionada con: la radiación, el cambio de energía interna y con las pérdidas calculadas por efecto de la fricción.

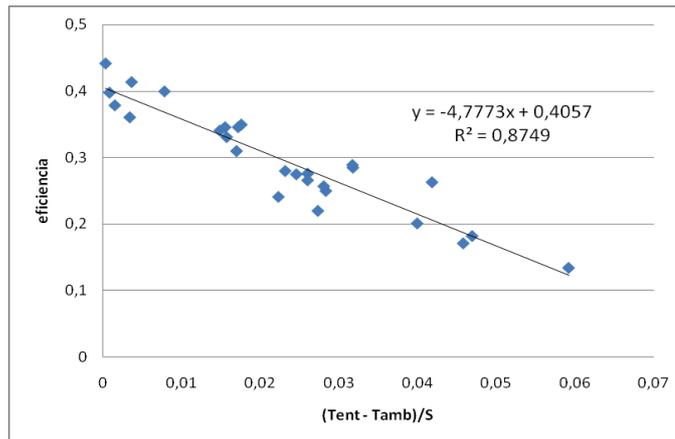
Como puede apreciarse en las dos curvas los valores de la irradiancia son casi constantes en el intervalo de medición, cerca del mediodía solar para el plano del colector y por lo tanto es de suponer que el sistema funcione en un estado estacionario. Los valores de la velocidad de entrada tienen una variación significativa en el intervalo de medición. Estas variaciones deben ser atribuidas al sistema de medición más que al funcionamiento del colector. El anemómetro utilizado, mostraba una dispersión muy pronunciada en los valores. A pesar de este inconveniente se utilizaron estos valores de velocidad medidos para calcular los diferentes parámetros relacionados con las ecuaciones anteriores. En el análisis global del sistema se consideraron estos datos como la velocidad de aire a la entrada del colector.

Teniendo en cuenta que estas variaciones en los valores de la velocidad se propagan numéricamente en las diferentes ecuaciones, por lo tanto los resultados que se obtienen también oscilan. Pero en la resolución del sistema completo intervienen también diferentes coeficientes de fricción,  $f$  y el resultado general para todo el sistema de ecuaciones presenta una "amortiguación" en los valores numéricos y en particular en los valores obtenidos a partir de los cálculos de las energías intervinientes.

Estas oscilaciones, aunque menores pueden observarse en los valores que adquieren, en el intervalo de medición, la potencia S y el Qutil, definidos anteriormente.

La figura 4 muestra los valores de eficiencia calculada teniendo en cuenta la variable S definida anteriormente. Para la confección de esta gráfica se tomaron todos los datos calculados para los dos días de ensayo. También se presenta en la misma figura la línea de tendencia correspondiente, con su ecuación respectiva. La eficiencia en este caso se define como  $Qutil/S$  (potencia) por unidad de área del colector.

Si se hubiera considerado la radiación incidente en lugar de la potencia S calculada, se hubieran obtenido valores de eficiencia superiores. O sea cambian los datos en el eje de las abscisas y por supuesto en las ordenadas, como resultado se obtiene un ajuste con mayor pendiente.



**Figura 4:** Valores de eficiencias calculadas en función de la variable  $S$

Este no es el objetivo del trabajo, o sea la de obtener valores de eficiencia, el principal objetivo es desarrollar una herramienta de cálculo para colectores, considerando las diferentes ecuaciones que determinan el comportamiento del fluido que circula en el colector y determinar curvas de eficiencia aproximadas de forma tal de poder realizar un prediseño para alguna determinada aplicación.

En la figura 4 para los valores de las abscisas se respetó como variable la diferencia de temperatura dividida por  $S$  (potencia) de esta forma se pueden comparar estos resultados con curvas de eficiencia de un colector determinado, de forma tal de establecer correlaciones entre diferentes geometrías.

## CONCLUSIONES

A partir de las ecuaciones presentadas en este trabajo se puede evaluar el comportamiento de un colector, en este caso un prototipo solar por el cual circula aire por efecto de convección natural. De la misma forma sería posible realizar un estudio similar para el caso de circulación por convección forzada.

Mejorando las correlaciones utilizadas para calcular los coeficientes de fricción se podrá en un futuro ajustar mejor los datos medidos y predecir a partir de pocas variables de entrada o de salida el comportamiento de un colector. Las correlaciones utilizadas son las que normalmente se utilizan en el cálculo de pérdida de carga de flujos en conductos cerrados. Los valores obtenidos muestran un correcto acople de las diferentes ecuaciones presentadas en un principio, por lo tanto estas constituyen un sistema que puede ser programado para determinar el prediseño de un sistema.

El principal inconveniente encontrado en la ejecución de este trabajo es acondicionar la geometría, o sea transformarla convenientemente para poder aplicar las ecuaciones mencionadas y las diferentes correlaciones empíricas con un grado suficiente de aproximación. Por ejemplo para el caso de la chapa perforada, se aplicó una correlación para circulación de fluidos en medios porosos, que funcionó muy bien. Esto en el sentido de que los valores obtenidos se ajustan bastante bien con los valores esperados en las diferentes mediciones realizadas. O sea los valores encontrados están en el rango con respecto al caudal de entrada en el colector. Es difícil de asegurar la correcta o incorrecta aplicación de esta ecuación, por varios motivos. Una causa puede ser la fluctuación que presentaron los valores medidos de la velocidad en un rango de valores considerablemente y por lo tanto el caudal de aire que recibe la chapa perforada puede decirse que no es constante. Pero en una primera aproximación se puede considerar un valor constante.

Este inconveniente de que la velocidad a la entrada del colector tuviera una variación considerable hace que los números de Reynold varíen de la misma forma y por lo tanto las predicciones para el flujo en algunos casos se encuentre cerca de ser laminar y en otros muy turbulento.

Este trabajo se considera como una primera etapa en la realización de un desarrollo más profundo, siempre con el objetivo de contar con una herramienta de cálculo que permita una evaluación rápida de un colector calentador de aire. Es también importante contar con esta herramienta, porque muchas veces ciertos desarrollos experimentales no cuentan con una curva de eficiencia que permita realizar un dimensionamiento de alguna aplicación. Si se cuenta con un grupo de ecuaciones debidamente programadas es posible, a partir de valores de la geometría, de radiación, temperaturas, etc. calcular o predecir el comportamiento de ciertas variables de un colector.

## REFERENCIAS

ObregonS, Molina V, Salvo N. (2005) "Simulación de fenómenos de convección natural en recintos cerrados" *Averma* Vol 9. pp 08-85, 08-90.

ObregonS, Molina V, Salvo N. (2006) "Simulación térmica y fluidodinámica del comportamiento de un muro trombe aplicando el método de elementos finitos" *Averma* Vol 10. pp 08-91, 08-98.

CRANE “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías – Mc Graw Hill

Incropera F. De Witt D. (1999) “Fundamentos de transferencia de Calor” Pearson Educación SA – ISBN 970-17-0170-4

Welty J. (1996) “Transferencia de calor aplicada a la ingeniería” – Limusa S.A. ISBN 968-18-0628-X

J. A Duffie, W. Beckman “SolaR Engineering of Thermal Processes”-John Wiley & Sons, INC–ISBN 13 978-0-471-69867-8

**ABSTRACT:**

Solar collectors where the the fluid of work is air, are generally used in the thermal conditioning of places. The implementation of different estimation techniques for determining values of the main variables involved. In general techniques are used in finite element or finite differences to determine the main features of the flow. The implementation of different technologies of calculation they allow to determine values of the principal involved variables. The study of the different losses of load inside a collector performs great importance, because it allows to consider the effects that provoke the different parts or sections of the geometry of the system on the flow. Therefore it is possible to determine the falls of pressure and from it to determine a curve of efficiency of the collector. In this work the values obtained for the efficiency appear analyzing a solar collector of air from the puntode dresses hydrodynamically. The efficiency decides as function of the different falls of pressures, temperatures of functioning, incidental radiation, etc.

**Keyword:** simulation, natural convection, flat collectors