

**ASADES***Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*  
Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE DEL TIPO LOOP CONVECTIVO**

**S. Obregón, 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 54-387-4255489E-mail: [obregon@inenco.net](mailto:obregon@inenco.net) - [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, pueden ser utilizados en el acondicionamiento térmico de locales. La implementación de técnicas de cálculo numérico que permiten la simulación de procesos, donde el movimiento del aire se genera por variaciones de densidad, constituye una herramienta importante que permite evaluar las principales variables involucradas en el funcionamiento de este tipo de colectores. Por ejemplo predecir la temperatura en función del tiempo, el flujo a la salida del colector, etc.

En este trabajo se muestran resultados de una simulación bidimensional para un colector solar calentador de aire y se comparan resultados con valores obtenidos experimentalmente para casi un día completo de funcionamiento del colector. .

**Palabras clave:** simulación, convección natural, colectores planos

### **INTRODUCCION**

En el proceso de transferencia de energía por convección natural el movimiento del fluido es el principal responsable del transporte de energía. Este movimiento se realiza en forma natural por efecto de un cambio de la densidad, lo que se origina por un intercambio de energía entre el fluido propiamente dicho y una frontera sólida, que por lo general se encuentra a una mayor temperatura. Los gradientes de velocidad que se generan son el resultado de los gradientes de temperatura que existen entre el sólido y el fluido adyacente. Por esta razón, la orientación y geometría de los límites sólidos son los responsables de condicionar la circulación del fluido.

El flujo, que se origina por el efecto del cambio en la densidad del fluido, inicialmente se lo puede considerar como laminar, pero pueden surgir inestabilidades hidrodinámicas las que se amplifican produciendo una transición a flujo turbulento. En este sentido, cuando se realiza una simulación numérica hay que tener en cuenta también el carácter turbulento del flujo. Esto significa solucionar simultáneamente la ecuación de Navier Stokes y una ecuación que establezca la contribución turbulenta del flujo a la viscosidad desde el punto de vista hidrodinámico. Además hay que acoplar al sistema anterior la ecuación de transferencia de energía, ecuación que contiene también términos dependen de la naturaleza turbulenta del flujo o no.

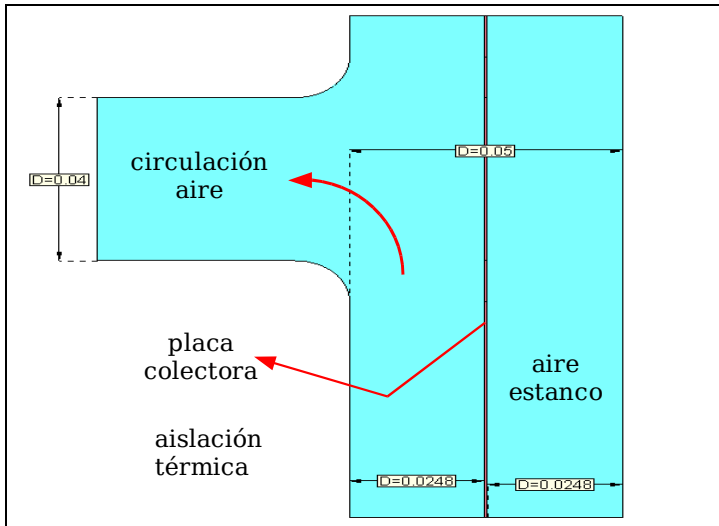
La simulación que se realizó para este trabajo, consiste en establecer valores característicos del flujo a la salida de un colector solar calentador de aire, valores de temperatura, etc. Como técnica de simulación se empleó el Método de Elementos Finitos (MEF) y se consideró la geometría del colector en 2D. Como modelo de viscosidad turbulenta se utilizó Smagorinsky, este modelo relaciona la viscosidad turbulenta de la siguiente forma:

$$\nu_t = C_s \Delta h_{grid} \sqrt{S(u):S(u)}$$

siendo  $C_s$  la constante de Smagorinsky,  $\Delta$  una función de espacial que disminuye la intensidad de la viscosidad turbulenta a medida que el flujo se acerca a objetos sólidos,  $h_{grid}$  es el tamaño de la malla, lo cual produce el efecto deseado que a medida que afinamos la grilla la turbulencia

resuelta en forma directa aumenta. Por último, el término en la raíz cuadrada es la traza del tensor velocidad de deformación que constituye una variable local del flujo.

La geometría que se muestra en la figura 1, corresponde a la parte superior del colector. En ella se puede apreciar la placa colectorora de un espesor de  $0.8 \times 10^{-3}$  m. En la misma figura se detallan las otras dimensiones: ancho de la boquilla de salida (que es igual a la de entrada), espesores adelante y atrás de la chapa colectorora.

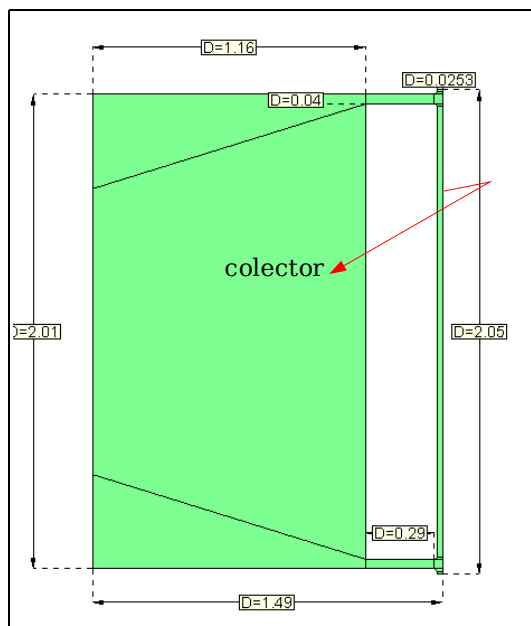


También se puede apreciar en la misma figura que por delante de la chapa el aire se mantiene estanco (sin movimiento).

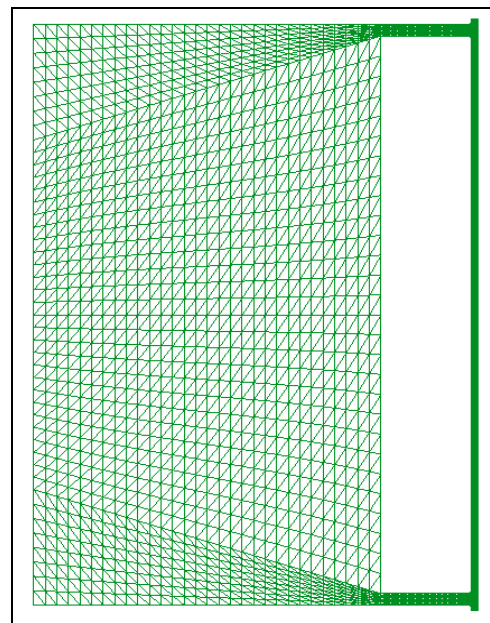
En la figura 2a, se muestra el colector en forma completa. Además en la misma figura se aprecia el recinto que se utilizó conectado al colector para que lograr la circulación de aire.

La figura 2b, muestra la malla de elementos finitos utilizada que esta compuesta por 7258 elementos triangulares y 3465 nodos. En la zona del colector se realizó concentración de elementos.

**Figura 1:** dimensiones salida del colector y circulación



**Figura 2a:** dimensiones del colector



**Figura 2b:** malla de elementos finitos utilizada (7258 elementos, 3465 nodos)

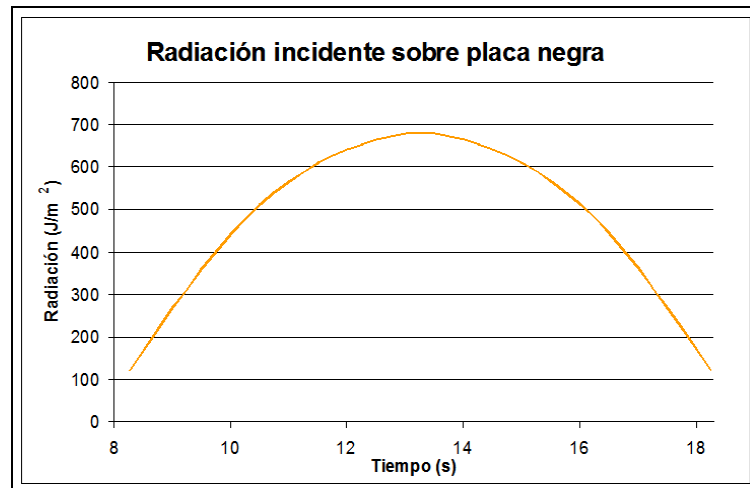
## CONDICIONES DE TRABAJO Y RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al funcionamiento del colector durante 9 horas. Se inicia a las 8:00 de la mañana y finaliza a las 17:00 horas. Si bien se puede simular más tiempo, se eligió este rango porque coincide con el rango temporal de los valores experimentales.

En la simulación se tuvo en cuenta el cambio en la radiación incidente en el colector y con respecto a las pérdidas de energía al ambiente, se consideró que estas dependen de la diferencia de temperatura. Esta diferencia de temperatura depende de la zona donde se considere. Por ejemplo, en el colector (chapa) se consideró una pérdida de energía que depende de la diferencia

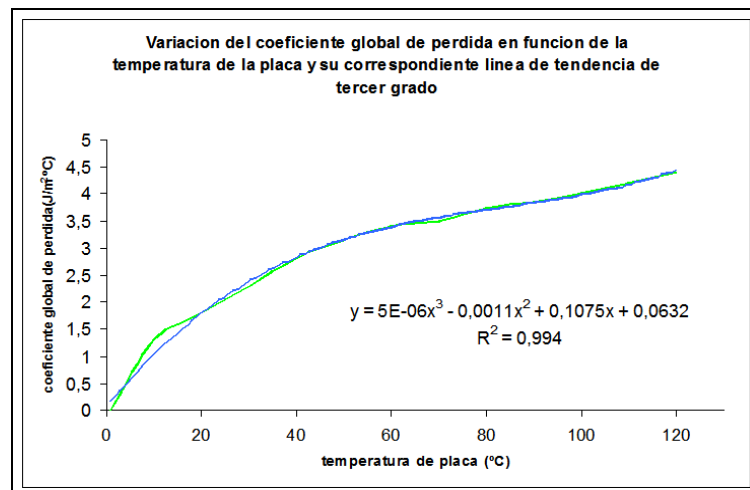
entre la temperatura del colector y la temperatura ambiente, pero en la zona posterior, la diferencia de temperatura es entre la del aire y la temperatura en la aislación. Ambos parámetros varían temporalmente.

La figura 3 muestra la curva de radiación solar en función del tiempo utilizada en la simulación. Esta curva representa la radiación total que llega a la placa negra o sea la resultante después de haber atravesado el vidrio y la capa de aire estanco por detrás del vidrio. Son valores de radiación sobre superficie vertical. Los valores de radiación fueron calculados a partir de valores medidos en el exterior del colector.



**Figura 3:** radiación incidente en la placa del colector.

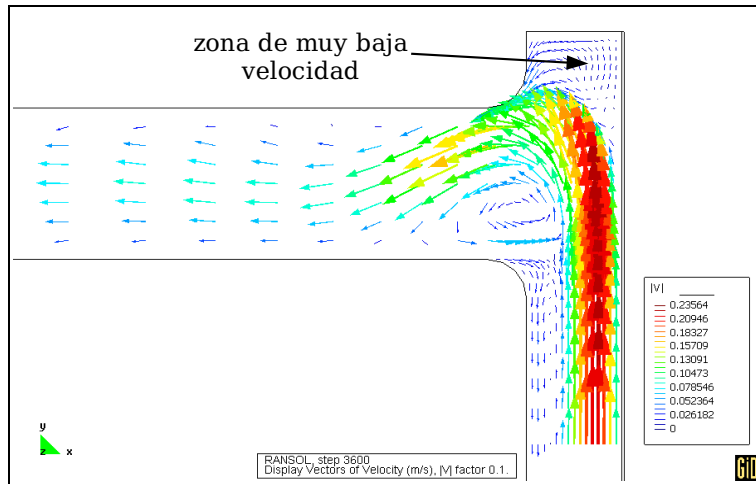
La figura 4 muestra los valores del coeficiente global de pérdida para el colector en función de la temperatura y el polinomio de grado tres que lo ajusta. Esta función de ajuste se utilizó en las condiciones de borde de la simulación. El programa, para cada intervalo de tiempo, evalúa en la resolución de la ecuación de energía las ganancias y las pérdidas, además en el caso de las pérdidas primero evalúa la temperatura, por ejemplo en la chapa colectora, hace la diferencia con la temperatura ambiente y posteriormente calcula la pérdida. De esta forma el programa toma la pérdida correspondiente para cada hora y realiza la integración de las ecuaciones.



**Figura 4:** coeficiente global de pérdida del colector.

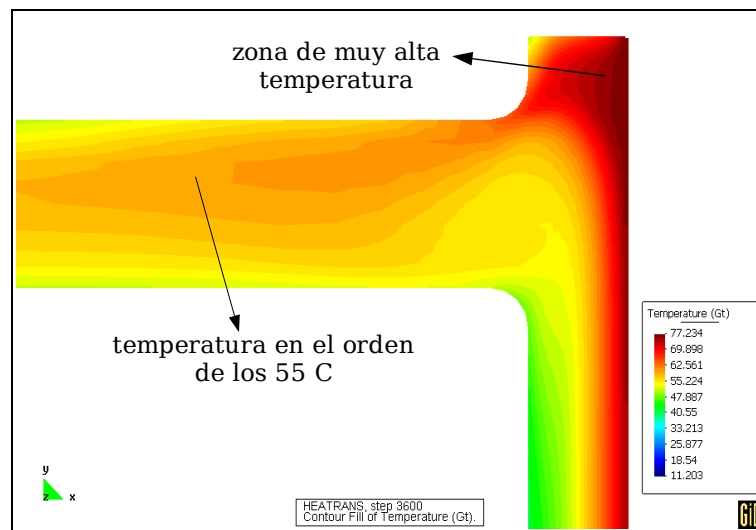
Como el calculo anterior lo realiza para toda la malla de elementos finitos la resolución también en cada paso debe chequear que el sistema tenga una convergencia adecuada.

En las figuras que se muestran a continuación, pueden observarse los campos de velocidad del aire y de temperatura para la parte superior (salida) del colector. Las figura 5a y 5b corresponden al estado del colector a la hora 9:27 de la mañana. La condición inicial para la temperatura, en todo el colector se supuso 20 C



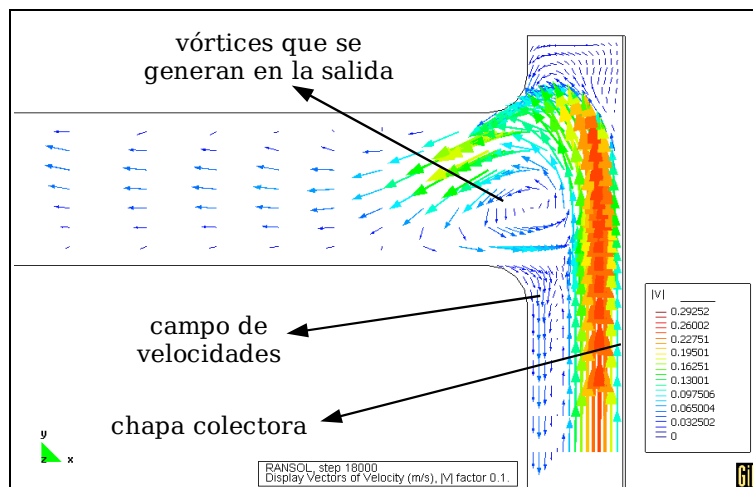
**Figura 5a:** campo de velocidades a la salida del colector.

a

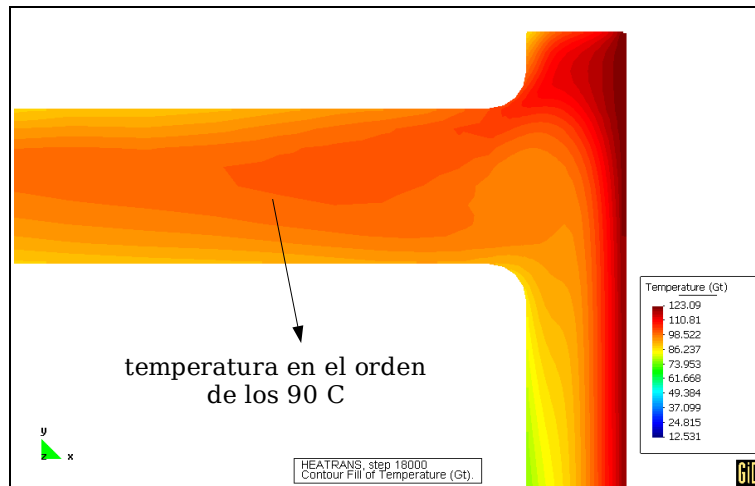


**Figura 5b:** campo de temperatura a la salida del colector.

En la figuras 6a y 6b se representan los mismos campos pero la hora 13:27, la radiación esta casi en su máximo valor. Se estiman temperaturas muy elevadas en la salida del colector. Estas zonas de muy alta energía coinciden con las bajas velocidades del fluido. A partir de esta hora la ganancia de energía comienza a disminuir y por lo tanto las temperaturas en la salida también.

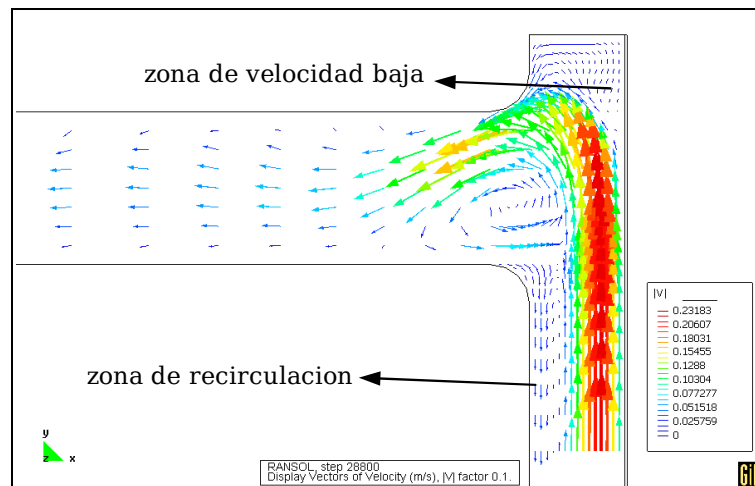


**Figura 6a:** campo de velocidades a la salida del colector.

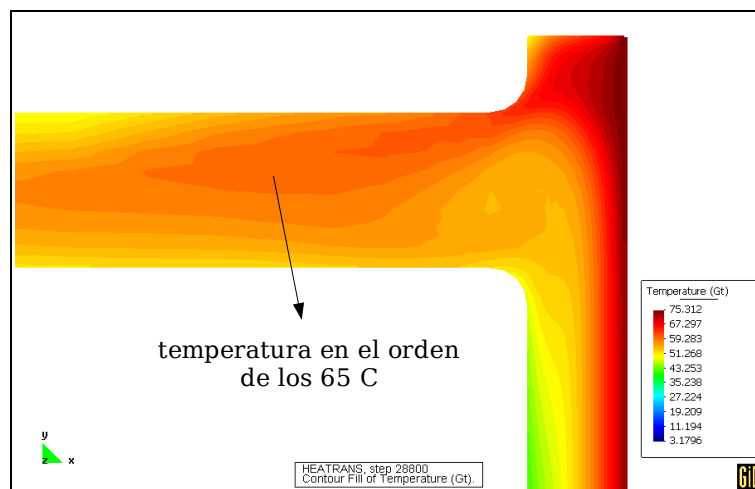


**Figura 6b:** campo de temperatura a la salida del colector.

Las figuras 7a y 7b corresponden para la hora 16:27, cuando la radiación ya ha disminuido bastante. El programa predice una temperatura menor en la salida. Además las características fluidodinámicas del aire en la salida no se modifican demasiado. Lo que significa que el colector sigue funcionando pero con una eficiencia menor.



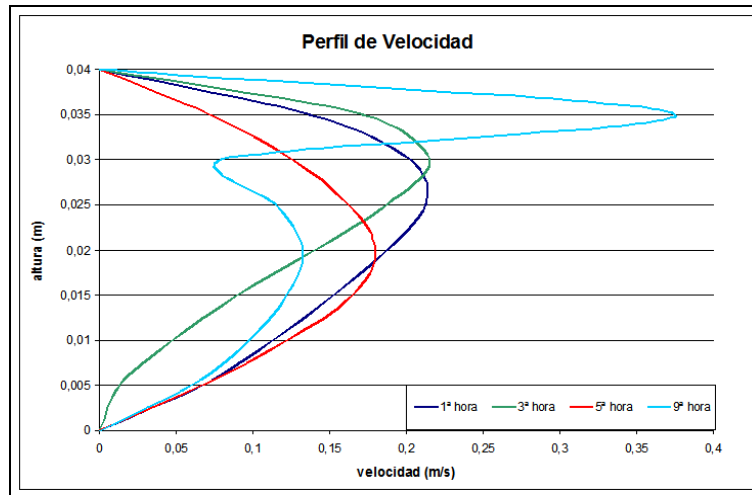
**Figura 7a:** campo de velocidades a la salida del colector.



**Figura 7b:** campo de temperatura a la salida del colector.

Comparando todas las figuras que representan el campo de velocidades se puede apreciar que al inicio de la simulación se establece un patrón de circulación el que se mantiene a lo largo de todo

el tiempo. Si bien la circulación no se altera mucho, los perfiles de velocidades en algunas zonas sufren variaciones muy interesantes. Como las condiciones de borde del problema, con respecto a la temperatura, dependen de una diferencia de temperatura y como las temperatura varía en cada intervalo, estamos en la situación que los perfiles de velocidad cambiarían para distintos intervalos. En la figura 8 se representan perfiles de velocidad en la boquilla de salida para diferentes horas, en función de la altura. El ancho de las boquilla de salida es de 0,04 m. En esta gráfica puede apreciarse claramente el constante cambio que realiza el flujo en la salida del colector.



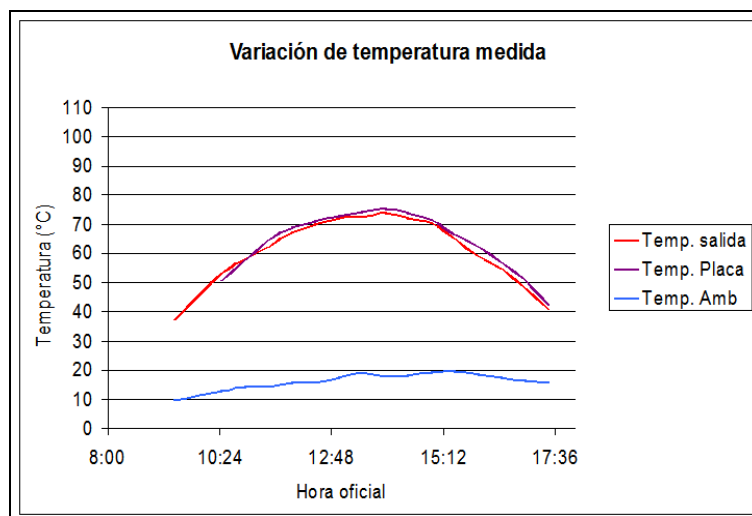
**Figura 8:** perfiles de velocidades en la boquilla de salida.

Esta variación en el flujo medio en la salida, predicho por la simulación, es importante a tener en cuenta en la medición de la velocidad del aire. Además este cambio permanente en la velocidad modifica la temperatura del aire y sus variaciones.

### COMPARACIÓN CON VALORES EXPERIMENTALES

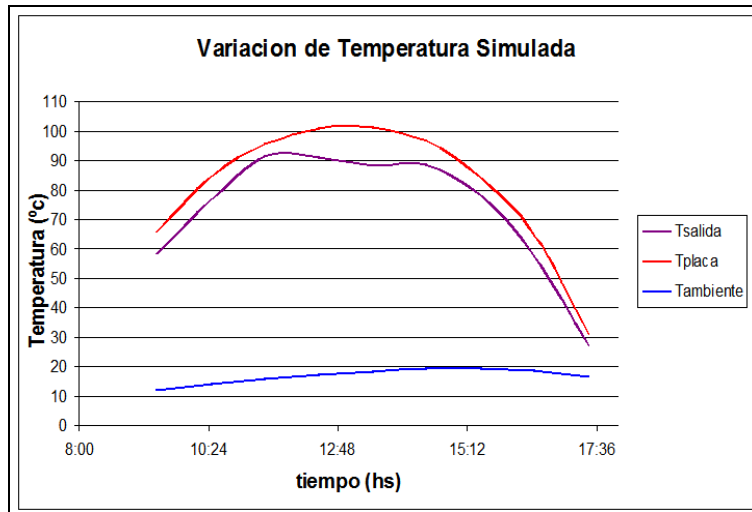
Con el objeto de validar lo realizado se comparan con valores medidos. Los puntos representados en las diferentes gráficas son coincidentes con el lugar donde se colocaron los sensores: sobre la placa (centro), salida del colector real (boquilla superior).

La figura 9 muestra los valores medidos en el prototipo y en la figura 10 se dan los valores obtenidos a partir de la simulación numérica.



**Figura 9:** valores de temperaturas medidos a lo largo del día de ensayo

De la comparación de ambas gráficas se puede apreciar el buen ajuste que hay entre datos medidos y datos simulados. Aunque en el caso de la simulación esta predice una mayor temperatura de placa para el mediodía solar comparada con la que realmente se midió.

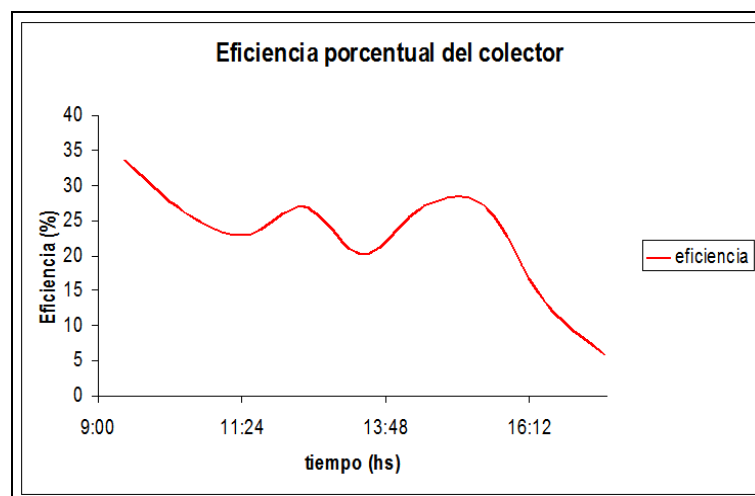


**Figura 10:** valores de temperaturas simulados a lo largo del día para el ensayo.

Por otro lado las temperaturas medidas en la placa (punto medio) y a la salida se mantienen muy cercanas para casi todo el tiempo del ensayo, no sucede lo mismo con las temperaturas en los mismos puntos, pero obtenidas a partir de la simulación. Puede apreciarse una mayor separación entre ellos. Otro aspecto a tener en cuenta, es la máxima temperatura de placa; para la simulación llega a ser por arriba de los 100 C, mientras que los valores medidos no superan los 80 C. En este punto hay que tener en cuenta la modelización de las pérdidas, que sufre el colector al medio ambiente.

Queda claro, que las pérdidas, son un factor importante a tener en cuenta. En el modelo utilizado para modelarlas, se las supuso dependientes de la diferencia de temperatura, pero habría que tener en cuenta también los efectos de los bordes cosa que no es muy fácil de realizar. Además ser una simulación bidimensional los valores se ajustan bastante bien, considerando que estos se comparan con valores medidos, que son en 3D, donde la influencia de la tercera dimensión es importante. Por ejemplo, los bordes laterales del colector, no considerado en este caso, puede modificar el patrón de circulación en el interior y por lo tanto modificar drásticamente toda la distribución de temperatura, lo que se traduce en un cambio en las pérdidas. Por lo tanto hay que ser muy cauteloso a la hora de sacar conclusiones comparando datos medios con datos simulados.

Con el objeto de analizar como se comporta a lo largo del día, se procedió a definir una "eficiencia" considerando el caudal másico que circula por el colector, la diferencia de temperatura entre la salida y la ambiente y teniendo como referencia toda la radiación que llega a la placa, en este caso se consideró que el ancho del colector es de 1 m. Los valores calculados se representan en la figura 9.



**Figura 9:** variación de la relación entre ganancia de energía y el aumento de temperatura en la salida a lo largo del día.

Se puede apreciar que en esta "eficiencia" hay un comportamiento muy diferente en diferentes horas del día. En el inicio el colector se comporta muy bien, funcionando con muy alta eficiencia, pero luego a medida que pasan las horas, como aumenta la temperatura de la placa y del aire aumentan las pérdidas, que son función de la diferencia de temperatura con el ambiente, lo que hace que la eficiencia decaiga. Efecto que se ve claramente casi al final del día, alrededor de las 16 hs. El carácter oscilante de la curva proviene del hecho de que la simulación indica que la temperatura en la salida oscila entre ciertos rangos. Esta oscilación puede ser generada por la característica turbulenta del flujo de aire en la boquilla de salida, o sea hay una constante generación de vórtices que hacen que la temperatura varíe constantemente.

## CONCLUSIONES

Como primera conclusión puede decirse que la simulación ajusta bastante bien los valores medidos experimentalmente. Las diferencias que existen se deben principalmente a la modelización de las ganancias y las pérdidas del colector. Pero se cuenta con una herramienta de diseño que puede predecir en ciertos rangos el funcionamiento de un colector de este tipo. Esto es importante porque se puede realizar un primer análisis térmico y fluidodinámico de diferentes geometrías, observar como se comportan y luego construir el prototipo que mejor se ajuste a las necesidades de calefacción.

Si bien se pueden realizar simulaciones en 3D, que serían las que se ajusten más a la realidad, estas involucran un volumen de cálculo importante lo que se traduce en mucho tiempo de ejecución, perdiéndose el principal objetivo de contar con una herramienta que brinde un prediseño rápido y confiable para poder evaluar diferentes geometrías.

Como un objetivo del trabajo es comparar resultados con datos experimentales, para establecer y validar una herramienta de diseño, no se presentan resultados para horas donde la radiación es cero (noche), aunque se calcularon algunos valores. La simulación para radiación cero, por ejemplo, predice circulación en sentido contrario. Este aspecto es importante por que se podría obtener el funcionamiento para un día completo de algún colector en particular.

Otro aspecto importante a tener en cuenta son las condiciones iniciales impuestas para la simulación. En el caso presentado se consideró una temperatura uniforme inicial de 20 C para todo el sistema y esta no deben ser las condiciones que el prototipo real ensayado lo que puede generar también discrepancias entre los datos medidos y los simulados.

También hay que tener en cuenta que la habitación colocada adyacente al colector tiene influencia tanto en las pérdidas como en los patrones de circulación del flujo, lo que influye de manera muy drástica en los diferentes valores que se calculan. En el caso del prototipo se tomó directamente la temperatura en la salida superior (no hay recinto).

## 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.

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

## ABSTRACT:

Solar collectors where the fluid of work is an air, can be used in the thermal conditioning of places. The implementation of technologies of numerical calculation that allow the process simulation, where the movement of the air is generated by variations of density, constitutes an important tool that allows to correlate values of the principal variables involved in the functioning of this type of collectors.

In this work there show themselves results of a two-dimensional simulation for a solar collector air heater and results are compared with values obtained experimentally.

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