

MODELADO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO DE AIRE CON COMSOL MULTIPHYSICS

A. Arias Barreto¹, A. Gastón^{1,2}, R. Abalone^{1,3}

¹Fac. Cs. Exs., Ing. y Agrimensura, UNR, Av Pellegrini 250 CP 2000 – Rosario, Argentina

²CIC-Consejo de Investigaciones Científicas, UNR

³Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR)

e-mail: rabalone@fceia.unr.edu.ar

Recibido: 02/08/12; Aceptado: 31-09-12

RESUMEN: En el presente trabajo se realiza una primera modelización de un colector solar plano con circulación natural, considerando condiciones ambientales variables (irradiación solar y temperatura ambiente). El modelo planteado permite conocer la distribución espacial y temporal de temperaturas en los elementos que componen un colector solar de placas planas inclinadas. El modelo fue implementado mediante el software COMSOL Multiphysics, paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para diversas aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente orientado a fenómenos acoplados, o multifísicos. Se analizaron tres pendientes para el colector y condiciones climáticas variables correspondientes un día de cielo claro de primavera-verano y otro de otoño-invierno. Se exploraron las posibilidades que brinda el software en la modelización del colector plano donde aparecen procesos de transferencia de calor y momento acoplados y no lineales en dos dimensiones.

Palabras clave: colector solar, placas planas, calentamiento de aire, modelización, COMSOL Multiphysics

INTRODUCCIÓN

El colector solar simple de placas planas (CSSP) es un dispositivo ampliamente utilizado para la transformación de energía solar en energía térmica debido a su sencillez estructural y a su bajo costo de fabricación y mantenimiento. Se componen de placas paralelas, con particulares propiedades a la radiación, entre las cuales se establece un flujo de aire para su calentamiento. Aprovechan tanto la radiación solar directa como la difusa, y al no disponer de sistemas de seguimiento solar, las placas se encuentran adecuadamente inclinadas respecto de la horizontal con la finalidad de mejorar la captación de la irradiación solar. Además, la superficie que absorbe la radiación solar es igual a la superficie que la capta porque no usan sistemas concentradores.

Estos dispositivos pueden clasificarse según el número de pasos de calentamiento en CSSP de paso simple o de paso múltiple; y según el número de canales de flujo en CSSP de un canal o de varios canales. El funcionamiento y operación de un colector solar depende de las condiciones climáticas, y de la disponibilidad del recurso. Con la finalidad de extender el periodo de funcionamiento durante un día, es posible incorporar elementos que almacenan energía, los cuales actúan como sumideros de energía durante las horas del día, y como fuentes o emisores de energía durante la noche.

En aplicaciones que involucran secado de productos orgánicos e industriales, el colector solar de placa plana para calentamiento de aire ha tenido un uso extendido a nivel mundial debido a que resulta ser más eficiente que el secado a la intemperie y presenta costos de operación menores a los secadores mecánicos.

La modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el comportamiento de los diferentes componentes del sistema así como la optimización de materiales y dimensiones.

Existen numerosas referencias sobre modelización de colectores solares mediante circuitos eléctricos equivalentes que trabajan en estado estacionario o no y estiman el coeficiente global de pérdida de energía del colector, imponiendo el flujo de aire (Bistoni et al., 2003; Lema et al., 2003). En este tipo de modelo, las placas se consideran a una temperatura media, por lo que las variaciones espaciales no se tienen en cuenta. En la literatura se encuentran diversos modelos que trabajan con el balance de flujo de energía para cada elemento del colector solar y se resuelven mediante el método de diferencias finitas, pero en general consideran circulación forzada (Fan et al., 2007; Baritto y Bracamonte, 2012; Ramani et al., 2010). Algunos modelos de circulación natural trabajan en estado estacionario con condiciones ambientales constantes (Forson et al., 2003).

En el presente trabajo se realiza una primera modelización de un colector solar plano con circulación natural, considerando condiciones ambientales variables (irradiación solar y temperatura ambiente). El objetivo principal es explorar las posibilidades que brinda el software COMSOL Multiphysics en la modelización del colector plano donde aparecen procesos de transferencia de calor y momento, acoplados y no lineales en dos y tres dimensiones. COMSOL Multiphysics es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para diversas aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente orientado al tratamiento de fenómenos multifísicos.

MODELO MATEMÁTICO

La Figura 1 muestra la conformación de un colector solar plano con una cubierta, con circulación natural de aire por debajo de la placa colectora.

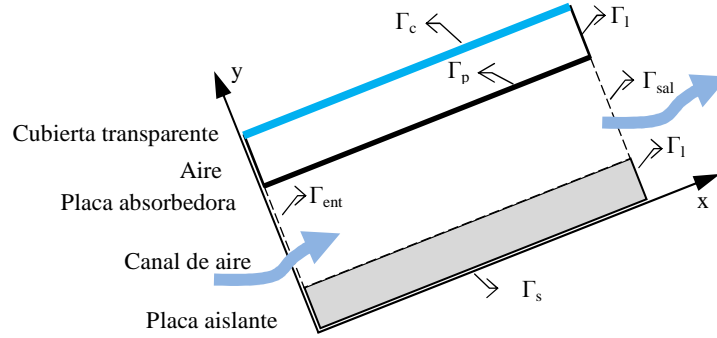


Figura 1: Dominio de cálculo mostrando los diferentes componentes del sistema.

El balance de energía en los dominios sólidos (cubierta transparente, placa absorbidora y placa aislante) y en fluidos (aire) es:

$$\text{En sólidos: } c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T) \quad \text{con } i = c, p, ais \quad (1)$$

$$\text{En fluidos: } c_a \rho_a \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \rho_a \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_a \nabla T) \quad (2)$$

Los balances de masa y momento lineal en el fluido son:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \bar{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_a \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho_a (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla \cdot \left(-p \bar{I} + \mu_a (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) - \frac{2}{3} \mu_a (\nabla \cdot \bar{u}) \bar{I} \right) + \bar{g} \rho_a \beta_T (T - T_{ref}) \quad (4)$$

La ec. (3) es la ecuación de continuidad. El último término de la ec. (4) es la fuerza volumétrica de flotación responsable de la circulación natural del aire dentro del colector, tanto en el canal abierto como entre la placa colectora y la cubierta transparente. El coeficiente de expansión volumétrica del aire, considerado como gas ideal, puede calcularse como $\beta_T = 1/T$.

Como puede verse en las ecs. (1) a (4) los procesos de transferencia de calor en los subdominios sólidos y transferencia de calor y momento en el fluido están fuertemente acoplados.

A continuación se detallan las condiciones de contorno e iniciales asociadas al problema.

$$\text{Condiciones de contorno: } -\bar{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad \text{en } \Gamma_l \text{ y } \Gamma_s \quad (5)$$

$$-\bar{n} \cdot (-k_c \nabla T) = h_c (T_{amb} - T) + \varepsilon_c \sigma (T_{cie}^4 - T^4) + \alpha_c I_\beta \quad \text{en } \Gamma_c \quad (6)$$

$$-\bar{n} \cdot (-k_p \nabla T) = (\tau \alpha) I_\beta \quad \text{en } \Gamma_p \quad (7)$$

$$T = T_{amb}(t) \quad \text{y} \quad p = p_{amb} \quad \text{en } \Gamma_{ent} \text{ y } \Gamma_{sal} \quad (8)$$

$$\left(\mu_a (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) - \frac{2}{3} \mu_a (\nabla \cdot \bar{u}) \bar{I} \right) = 0 \quad \text{en } \Gamma_{ent} \text{ y } \Gamma_{sal} \quad (9)$$

$$\bar{u} = 0 \quad \text{sobre superficies sólidas} \quad (10)$$

$$\text{Condiciones iniciales: } T(x, y, t=0) = T_{ini} \quad (11)$$

$$\bar{u}(x, y, t=0) = 0 \quad (12)$$

La ec. (6) tiene en cuenta el intercambio radiativo del colector con el cielo y las pérdidas por convección con el ambiente. El último término corresponde a la porción de la energía incidente que es absorbida por la cubierta transparente. La ec. (7) considera la energía total absorbida por la placa colectora luego de las múltiples reflexiones que se producen con la cubierta transparente. El producto transmitancia-absorbancia puede aproximarse por $(\tau \alpha) = 1.01 \tau \alpha$ (Duffie y Beckman, 2006).

La irradiación solar global para días claros sobre una superficie horizontal I_h fue calculada en base al modelo C de transferencia radiativa de la atmósfera (Iqbal, 1983), utilizando parámetros atmosféricos estándares del lugar. La irradiación

solar sobre una superficie inclinada I_β , despreciando la radiación reflejada por los alrededores, se calcula en función de la radiación solar directa I_b y difusa I_d sobre la superficie horizontal, mediante (Duffie y Beckman, 2006):

$$I_\beta = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (13)$$

donde R_b es el factor geométrico que representa la relación entre la radiación directa sobre la superficie horizontal y sobre la superficie inclinada.

La temperatura de cielo T_{cie} en la ec. (6) se expresó en función de la temperatura ambiente (Mills, 1995):

$$\sigma T_{cie}^4 = \varepsilon_{cie} \sigma T_{amb}^4 \quad (14)$$

Para la placa absorbadora y la cubierta transparente se consideró una absorbancia solar de 0.96 y 0.08, respectivamente. Para la emisividad infrarroja del cielo y de la cubierta transparente, 0.82 y 0.89, respectivamente. Valores típicos tomados de Kreith (1965), Mills (1995) y Duffie and Beckman (2006).

Las ec. (8) y (9) son las condiciones requeridas en la entrada y salida del aire y la ec. (10) la condición de velocidad nula del fluido sobre las superficies sólidas.

IMPLEMENTACIÓN EN COMSOL

El modelo planteado fue implementado en COMSOL Multiphysics 4.2 utilizando la interfaz 'Heat Transfer' para modelar la transferencia de calor en sólidos (cubierta transparente, placa absorbadora y placa aislante) y en fluidos (aire), con las propiedades de los materiales típicos definidos en cada subdominio y la interface 'Laminar Flow' para modelar el flujo de fluido de una fase en régimen laminar.

COMSOL utiliza el método de los elementos finitos para la resolución numérica de los sistemas de ecuaciones acoplados planteados con las correspondientes condiciones iniciales y de contorno. La discretización del dominio se realizó con una densificación de la malla sobre las fronteras, donde se concentran los mayores gradientes de temperatura y velocidad como se muestra en la Figura 2 resultando 24010 grados de libertad. Se emplearon elementos Lagrangianos de orden dos, e integración numérica de cuarto orden.

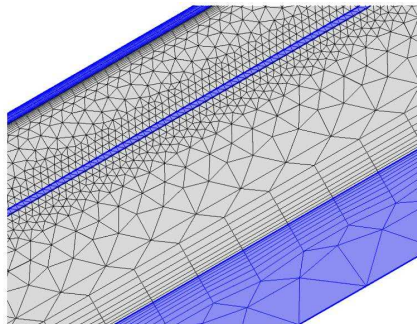


Figura 2: Muestra del mallado

Debido a la no linealidad, el sistema de ecuaciones resulta altamente inestable por lo que es necesario aplicar métodos de estabilización para obtener soluciones físicas. COMSOL dispone de tres tipos de métodos de estabilización que fueron seleccionados debido a las características del flujo de fluido.

RESULTADOS OBTENIDOS

Se consideró un colector de 1.2m de largo por 1m de ancho, orientado al Norte, con tres pendientes posibles $\beta = 10^\circ, 30^\circ$ y 45° . Se eligieron estas inclinaciones a manera de ejemplo debido a las diferentes posiciones del Sol durante un día de invierno y de verano. El espesor de la capa de aislante inferior se fijó en 5 cm, el canal de aire en 8 cm y la separación entre la placa colector y la cubierta transparente en 4 cm. Todas estas especificaciones son fácilmente modificables e incluso es posible realizar un estudio paramétrico donde se varían en forma controlada por el software para su análisis y optimización.

Se aplicó el modelo para analizar el comportamiento del colector, durante un día de cielo claro de primavera-verano (día 2: 2 de enero) entre las 9 y las 18hs y un día de cielo claro de otoño-invierno (día 162: 11 de junio) entre las 10 y las 17hs, en Rosario. La temperatura inicial del colector se fijó en 20C y 5C respectivamente. Se consideró una velocidad del viento constante de 1m/s.

La figura 3a) muestra los valores de las temperaturas ambiente medidos. En las figuras 3 b) y c) se comparan la irradiación solar medida sobre el plano horizontal con la calculada para los días 2 y 162 respectivamente. A partir de la radiación

calculada sobre el plano horizontal se estimó la radiación sobre el plano inclinado del colector, considerando las tres pendientes posibles. Estos valores se ingresan al programa como archivos de datos.

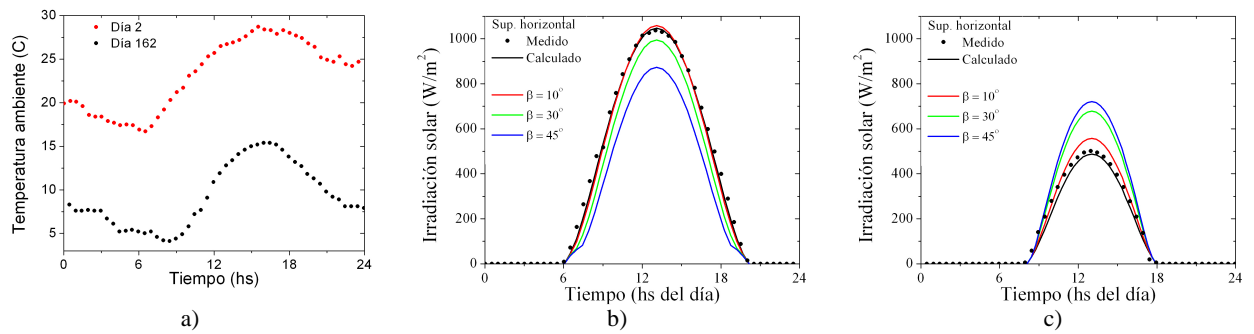


Figura 3. a) Temperatura ambiente medida. Irradiación solar para los días b) 02/01/10 (día 2) y c) 11/06/10 (día 162)

A continuación se presentan los resultados obtenidos por el programa para el caso de $\beta = 30^\circ$. Para calcular el coeficiente local de transferencia de calor de convección forzada externa sobre la cubierta transparente se emplearon las correlaciones dadas por Codina (1998), dependiente de la velocidad del viento, disponibles para el usuario a través de las interfaces de COMSOL Multiphysics. La velocidad del viento se tomó constante por no disponer de valores medidos. Las propiedades se evalúan a la temperatura media $(T_c + T_{amb})/2$, por lo que el coeficiente varía sobre la cubierta en la dirección del flujo, $h_c(x,y,t)$. La figura 4 muestra la evolución temporal del coeficiente h_c en los extremos de la cubierta transparente, es decir en la zona correspondiente a la entrada y a la salida del colector. Los valores relativamente bajos se deben al valor muy bajo considerado para la velocidad del viento (1m/s).

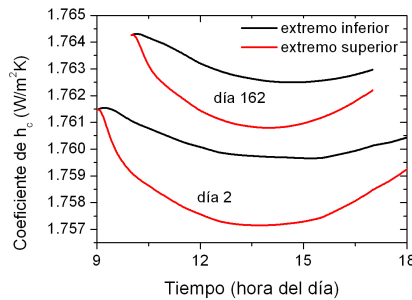


Figura 4: Coeficiente de transferencia de calor local en los extremos de la cubierta transparente del colector, $\beta = 30^\circ$

Las figuras 5a) y b) muestran las distribuciones de temperaturas en el colector a las 13hs cuando se produce el pico de radiación solar. Debido a la alta conductividad de la placa absorbadora, el gradiente de temperatura en dirección normal es despreciable, sin embargo la temperatura no es uniforme a lo largo de la placa. Las Figuras 6 a) y b) muestran la evolución de la temperatura en los puntos extremos de la placa comparados con la temperatura promedio de la placa, que se obtiene por integración de los valores locales. Puede observarse una diferencia de temperatura máxima de 35C para el día 2 y de 25C para el día 162 entre los extremos de la placa.

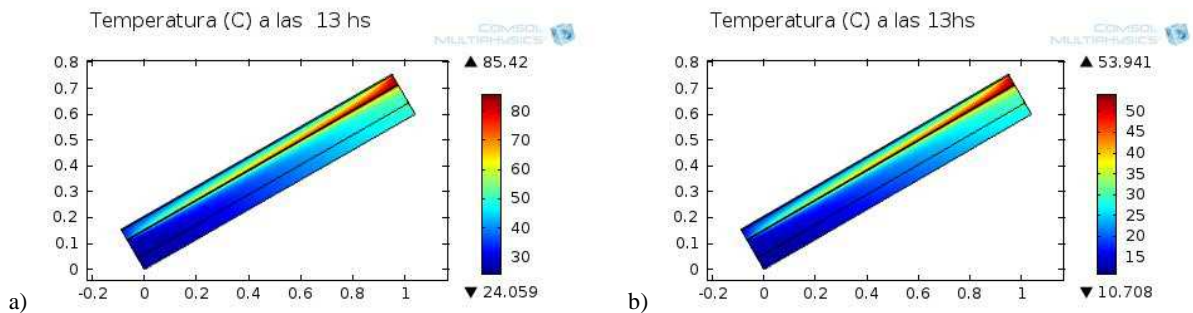


Figura 5: Perfil de temperatura para a) día 2 y b) día 162. $\beta = 30^\circ$

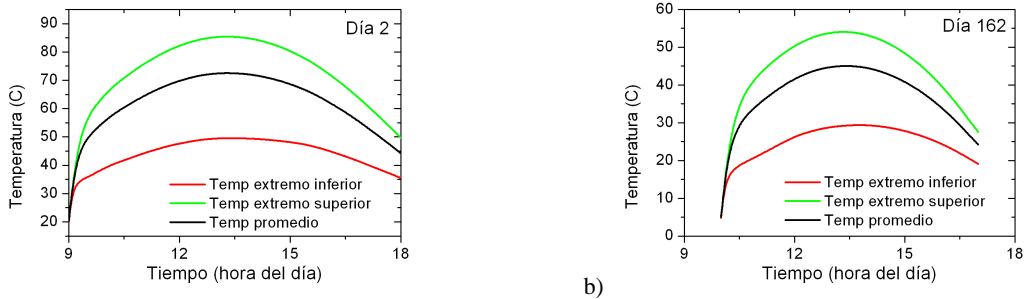


Figura 6: Temperatura de la placa colectora, para a) día 2 y b) día 162, $\beta = 30^\circ$

Las Figuras 7 a) y b) muestran las líneas de corriente que se producen en las masas de aire. Puede apreciarse una pequeña circulación de aire en el espacio cerrado entre la placa colectora y la cubierta transparente.

La distribución de velocidades y temperaturas del aire en la sección del canal de circulación resulta no uniforme produciéndose los máximos en la zona más próxima a la placa colectora. Los perfiles de velocidades y temperaturas a la salida se muestran en las Figuras 8a) y b). La posición a la salida está medida desde la parte superior (placa colectora). Las Figuras 9a) y b) muestran las evoluciones de la velocidad y temperatura del aire promediadas sobre la sección del canal de circulación a la salida del colector. Puede observarse una diferencia máxima con la temperatura ambiente de 30C para el día 2 y de 15C para el día 162.

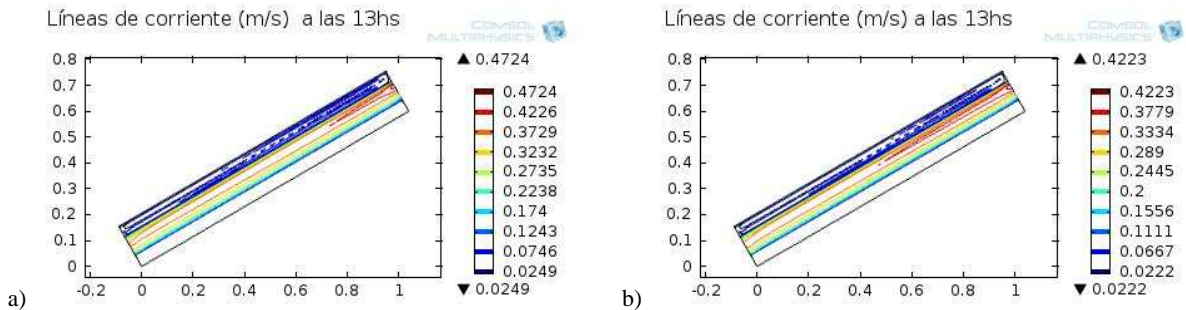


Figura 7: Distribución de líneas de corriente para a) día 2 y b) día 162, $\beta = 30^\circ$

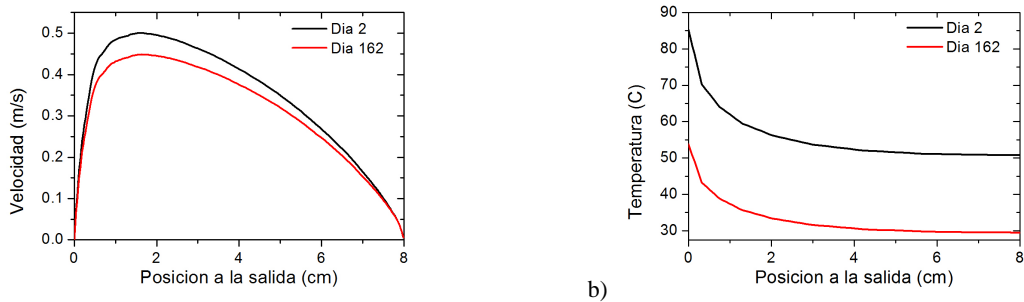


Figura 8: a) Perfil de velocidad del aire y b) perfil de temperatura del aire a la salida del colector a las 13hs, $\beta = 30^\circ$

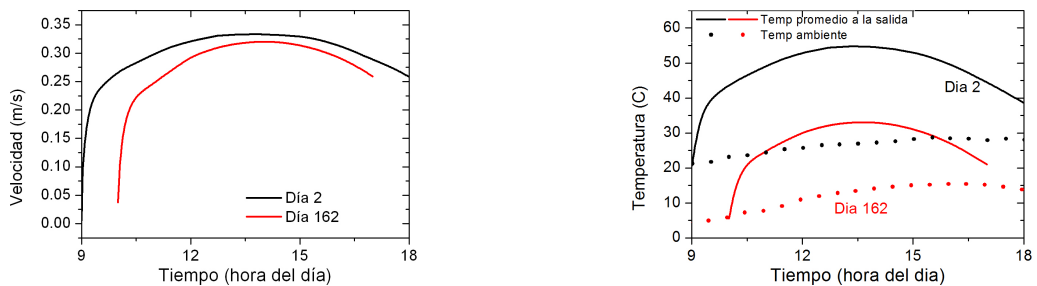


Figura 9: a) Velocidad promedio y b) temperatura promedio a la salida del colector, $\beta = 30^\circ$

A continuación se presentan algunos resultados equivalentes para $\beta = 10^\circ$ y 45° . En las Figuras 10 a) y b) se muestran las líneas de corriente a las 13 hs, y en las Figuras 11 a) y b) se comparan las velocidades promedio a la salida del colector para las tres pendientes. Para ambos días, la velocidad promedio aumenta con la pendiente. Además el aumento en la pendiente produce una disminución en la radiación incidente en primavera-verano (día 2) y un aumento de la radiación incidente en otoño-invierno (día 162). El efecto combinado puede verse en la evolución de la temperatura promedio a la salida del colector (Figura 12).

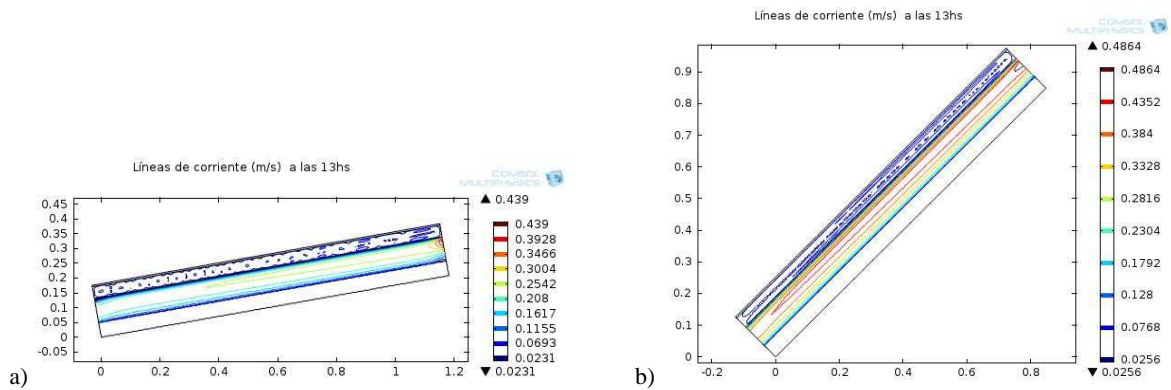


Figura 10: Distribución de líneas de corriente para el día 2, 13hs, a) $\beta = 10^\circ$ y b) $\beta = 45^\circ$

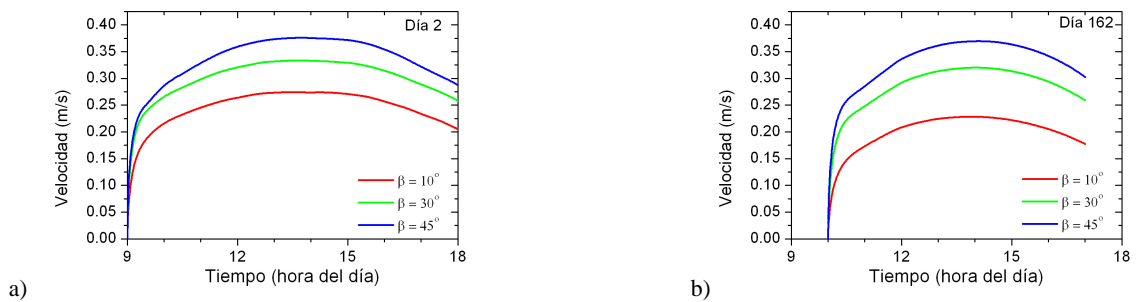


Figura 11: Velocidad promedio a la salida del colector, para a) día 2 y b) día 162, para las tres pendientes

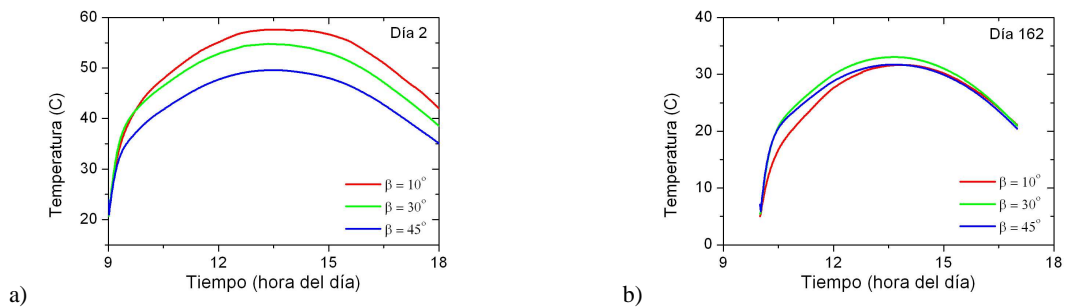


Figura 12: Temperatura promedio a la salida del colector, para a) día 2 y b) día 162, para las tres pendientes

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realiza una primera modelización de un colector solar plano con circulación natural, considerando condiciones ambientales variables (irradiación solar y temperatura ambiente).

El modelo fue implementado mediante el software COMSOL Multiphysics, que utiliza el método de elementos finitos en la resolución numérica. COMSOL Multiphysics es un paquete de software de análisis y resolución para diversas aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. Dispone de herramientas que proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, preprocesado y postprocesado y de una muy bien gestionada interfaz a MATLAB.

Si bien el software permite trabajar con interfaces de matemáticas para resolver ecuaciones en derivadas parciales y ordinarias, realizar análisis de sensibilidad, modelando mallas fijas o variables, etc. la implementación se realizó utilizando las interfaces específicas de los procesos físicos involucrados 'Heat Transfer' y 'Laminar Flow'. Estas interfaces permiten agregar fácilmente al modelo diversas interacciones, intercambios convectivos, radiativos con el medio ambiente y entre superficies, flujos de energía, etc. Todas las propiedades pueden ser variables y dependientes de las propias incógnitas.

Su utilización resultó altamente satisfactoria debido a la gran versatilidad para incorporar geometrías, materiales, propiedades dependientes de diversas variables, y acoplamiento entre distintos procesos, etc., además de una amplia gama de herramientas para el mallado del dominio de cálculo. Los métodos de estabilización que COMSOL dispone, permitió obtener la convergencia a soluciones con sentido físico a pesar de la no linealidad del problema.

Se espera continuar con la implementación de este tipo de modelo con el software COMSOL Multiphysics, extendiendo a 3D e incluyendo las interacciones radiativas entre las superficies, distintas configuraciones y estrategias de funcionamiento, etc. validando las predicciones con resultados experimentales.

NOMENCLATURA

A	area, m ²
c	calor específico, J/kg K
h_c	coeficiente de transferencia de calor, W/m ² K
I_h	irradiancia solar sobre una superficie horizontal, W/m ²
I_β	irradiancia solar sobre una superficie inclinada, W/m ²
I_d	irradiancia solar directa sobre una superficie horizontal, W/m ²
I_b	irradiancia solar difusa sobre una superficie horizontal, W/m ²
k	conductividad térmica, W/m K
L	longitud característica
p	presión, Pa
t	tiempo, s
\dot{m}	flujo másico de aire, kg/s
\vec{n}	vector normal a la superficie
T	temperatura, C o K
R_b	factor geométrico
\vec{u}	vector velocidad, m/s
V	velocidad del viento m/s
a	absorbancia
β	pendiente del colector, radianes
β_T	coeficiente de expansión volumétrica, 1/K
τ	transmitancia
ε	emitancia
ρ	densidad, kg/m ³
μ	viscosidad dinámica. Pa s
Γ	superficie de contorno
σ	constante de Stefan-Boltzmann, 5.6697 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴

Subíndices	
a	aire
c	cubierta transparente
p	placa colectora
cie	cielo
amb	ambiente
atm	atmosfera
ais	aislante
ent	entrada
ini	inicial
sal	salida
l	lateral
prom	promedio
s	base
β	superficie inclinada
b	radiación directa
d	Radiación

REFERENCIAS

- Baritto M. y Bracamonte J. (2012). A dimensionless model for the outlet temperature of a nonisothermal flat plate solar collector for air heating. *Solar Energy* 86, pp. 647–653.
- Bistoni S., Iriarte A., Saravia L. (2003). Análisis teórico de un colector solar de aire. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 7, N° 1, pp. 02.01-02.06.
- Codina R. (1998). Comparison of Some Finite Element Methods for Solving the Diffusion-Convection-Reaction Equation. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg*, vol. 156, pp. 185–210.
- Duffie J. y Beckman W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3ª edición. John Wiley & Sons.
- Fan J, Jivan Shah L., Furbo S. (2007). Flow distribution in a solar collector panel with horizontally inclined absorber strips. *Solar Energy* 81, pp. 1501–1511.
- Forson F.K., Nazha M.A.A, Rajakaruna H. (2003). Experimental and simulation studies on a single pass, double duct solar air heater. *Energy Conversion and Management*, Vol 44, Issue 8, pp. 1209-1227.
- Iqbal M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press.
- Kreith F (1973). *Principles of Heat Transfer*. P.A. International Textbook Co, Scranton, PA.
- Lammardo A. y Baritto M. (2010). Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire. *Revista Ingeniería UC*, Vol. 17, nro 3, pp. 19-27.
- Lema A., Miriani R., Sender G., Barral J., Adaro J. (2003). Incidencia de la utilización de una cubierta transparente y de deflectores de flujo en el comportamiento de un colector solar calentador de aire de bajo costo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 7, N° 1, pp. 03.01-03.06.
- Lema A.I., Pontin M.I., Morsetto J.M. y Ruetsch L.G. (2011). Diseño, desarrollo y análisis térmico de un colector solar de aire con placa plana. Eficiencia y exergía perdida. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 15, 2011. pp. 02.15-2.23.
- Mills A. F. (1995). *Transferencia de Calor*. Editorial Irwin.
- Ramani B.M., Gupta A., Kumar R. (2010). Performance of a double pass solar air collector. *Solar Energy* 84, pp. 1929–1937.

ABSTRACT

This paper presents the first attempt to model a flat solar collector with natural circulation, considering variable environmental conditions (solar radiation and ambient temperature). The proposed model enables the prediction of the spatial and temporal distribution of temperatures in the elements of a tilted flat plate solar collector. The model was implemented in COMSOL Multiphysics software, a package for analysis and finite element resolution for various physical and engineering applications, especially coupled or multiphysics phenomena. The analysis was carried out considering three slopes of the solar collector and weather conditions of a day of clear sky in spring-summer and in fall-winter. The capabilities provided by COMSOL Multiphysics software to account for nonlinear coupled heat and momentum processes arising in the analysis of a solar collector were explored.

Keywords: solar collector, flat plate, air heating, modeling, COMSOL Multiphysics