

ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA CIRCULACIÓN DE AIRE EN UN COLECTOR PARA CALEFACCIÓN

N. Salvo, A. L. Hernández, V. S. Molina Castillo

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 - alej@unsa.edu.ar – molinav@inenco.net

RESUMEN: Para el caso de un colector solar, donde el fluido de trabajo es aire, se analiza su geometría y se propone un balance de energía a través de su circuito hidráulico para determinar las principales características de la circulación del aire. A partir de considerar las caídas de presión, las pérdidas de carga en accesorios por efecto de la fricción entre el fluido y los materiales sólidos o por cambios en la dirección del flujo principal, se calculan los valores de las principales variables involucradas. Se presentan los resultados que surgen de resolver las ecuaciones hidrodinámicas conjuntamente con el primer principio de la termodinámica. Los valores obtenidos se resumen en curvas de eficiencia para un colector de aire y se comparan con datos experimentales. Esta metodología de trabajo presenta una alternativa de análisis para el caso de dispositivos solares y permite considerar valores de eficiencia como una variable de pre-diseño.

Palabras clave: convección natural, colectores planos

INTRODUCCIÓN

A partir de la situación energética que vive el mundo, con respecto al aumento en los costos de los combustibles fósiles, existen actualmente muchas aplicaciones que pueden considerarse una alternativa para reemplazar sistemas convencionales. Si se presta atención a la calefacción de viviendas, por ejemplo, se puede optar por un amplio espectro de dispositivos para tal fin.

La calefacción de un local o vivienda requiere una cantidad de energía importante, que si se considera en forma convencional y desde un punto de vista económico, se traduce en un gasto de dinero importante. Este planteo ha generado, en los últimos tiempos, muchas aplicaciones solares pensando principalmente en lo económico, o sea acondicionar térmicamente un edificio en forma gratuita o con muy bajo costo. Otro aspecto que también hace atractivo la calefacción en forma no convencional es construir equipos que requieran un muy bajo mantenimiento.

En términos generales, un equipo destinado a la calefacción, deberá calentar un fluido y luego transportarlo al interior de la vivienda donde intercambiará su energía. El fluido de trabajo de colectores destinados a calefacción son por lo general agua o aire. Para el primero, el tamaño, peso y mantenimiento pueden restarle mérito a su implementación. Por el contrario en el caso de usar colectores que calienten aire, parecería a primera vista ser mucho más sencillos de construir y además muy aplicables para la aplicación en calefacción de locales.

Si bien se necesita un volumen de aire mucho mayor que el de agua para transportar la misma cantidad de energía, esto por la diferencia en sus capacidades caloríficas, el aire presenta otras ventajas que lo hacen muy atractivo como fluido de trabajo en un colector, por ejemplo no tiene problema de congelamiento o de ebullición, se pueden implementar instalaciones mucho más sencillas (menos costo) que en el caso de considerar agua.

A partir de las consideraciones anteriores la construcción de colectores solares de aire es muy sencilla y esto es lo que ha generado actualmente muchas aplicaciones de este tipo de equipos, no solo para calefacción sino pensados también para otras aplicaciones como puede ser secado de frutas o alimentos.

En todo equipo solar es importante considerar la eficiencia como un factor determinante en la calidad del mismo. Este parámetro permite evaluar como se comportará en una dada aplicación o sea una curva o gráfica que muestre valores de eficiencia mostrará la capacidad de conseguir un efecto determinado por parte del prototipo en la instalación donde se encuentre. Para un diseño determinado, habrá que considerar algún mecanismo teórico, para poder evaluar la eficiencia cuando el sistema está en su etapa previa a la construcción definitiva.

De poder contar con una herramienta teórica de cálculo, como la mencionada, esta deberá considerar solo algunos parámetros generales y a partir de ellos evaluar la eficiencia del equipo. Si bien se pueden hacer simulaciones numéricas muy aproximadas, estas tienen el inconveniente de necesitar computadoras de gran capacidad de cálculo, cierta especialización del usuario que ejecuta el programa, capacidad para interpretar los resultados obtenidos, etc.

Para evitar un análisis muy detallado, que por lo general lleva mucho tiempo y utilizando algunos parámetros generales en este trabajo se muestra una metodología de cálculo que permite evaluar la eficiencia de un determinado colector solar. Por lo tanto con pocas consideraciones y manteniendo un modelo teórico determinado se obtienen curvas de eficiencia para colectores solares. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se utilizó en el análisis solo relaciones hidrodinámicas y térmicas.

Como variable de entrada o variable principal en los cálculos realizados se tomó la velocidad de entrada al sistema. El valor fue medido en un prototipo. Se consideran dos formas diferentes de funcionamiento, una en convección natural y otra en forma forzada.

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”.

PROTOTIPO ENSAYADO Y PLANTEO DEL PROBLEMA

La figura 1 muestra un esquema del colector construido y algunos valores de su dimensiones principales. En el punto 1 se midió la velocidad de entrada al colector. Se utilizó una sonda anemométrica TSI VelociCalc con un rango de velocidad de 0 m/s y 30 m/s y de temperatura de -17.8 °C a 93.3 °C. Para la medida de temperatura se utilizaron termocuplas tipo T, cobre-constantan y los valores se registraron en forma automática.

Los puntos 2, 3, 4, 5, 6 son los lugares físicos del colector donde se realizaron los cálculos de velocidad y presión. El circuito hidráulico puede considerarse como una serie de conductos todos unidos en serie, pero en una parte de este circuito hay dos conductos en paralelo como puede observarse en la figura 1 entre los puntos 3 y 4.

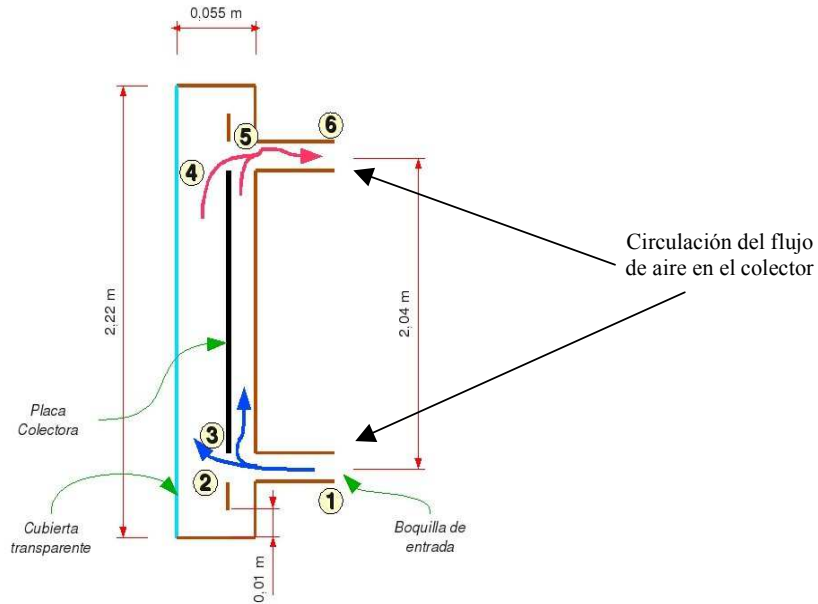


Figura 1: Esquema del circuito donde circula el aire en el colector ensayado.

Este sistema se ensayó en convección natural y también en convección forzada, en este caso los ventiladores que movían el aire se colocaron en la boquilla de salida del sistema, punto 6 en el esquema de la figura 1. La tabla 1 muestra las principales características geométricas del prototipo. Como puede apreciarse es un colector que tiene casi 2 m² de superficie siendo el área de la placa colectora algo inferior. En la tabla 2 se muestran otras constantes utilizadas en el cálculo

Boquilla			colector			doble conducto		
ancho	0,470	m	ancho	0,900	m	espesor atrás	0,025	m
alto	0,040	m	altura	2,220	m	espesor adelante	0,030	m
L=Long entrada	0,170	m	espesor	0,055	m	L2 = altura placa	2,04	m
			área colector	1,9980	m ²			

Tabla 1: Datos geométricos del colector ensayado

Constantes física del aire T=350 K)	Unidades
Densidad	995,0E-3 Kg/m ³
Viscosidad	2,08E-005 N s/m ²
Cond. Térmica	30,0E-3 W/m K
Capacidad Calorífica	1009 J/Kg K
factor fricción turbulencia	
total fT	0,017

Tabla 2: Constantes físicas utilizadas en el cálculo de eficiencia.

El planteo principal del problema es resolver las ecuaciones hidrodinámicas que intervienen en el sistema formado por el colector. En cada punto del esquema mostrado en la figura 1 se resuelve en forma simultánea la ecuación de Bernoulli modificada y el primer principio de la termodinámica aplicado a un tubo de corriente.

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

ecuación de Bernoulli modificada

(1)

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

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)

En la ecuación (1) hp representa la pérdida de carga que existe en cada tramo considerado. Dependiendo el “accesorio” que se presenta se calcula hp de acuerdo correlaciones empíricas. Hay que tener en cuenta en el cálculo que en el circuito se tienen expansiones bruscas, contracciones bruscas, codos y efectos de entrada y salida en cada boquilla, etc. Además es importante considerar factores de fricción los que determinan las pérdidas de carga por efecto de la viscosidad en cada “accesorio”. La forma de evaluar la pérdida de carga se realizó de acuerdo a manuales desarrollados por muchos autores (Crane, 1990). En este punto, se evaluaron los coeficientes de pérdida de acuerdo a diferentes expresiones y se optó por aquel que ajustó mejor los datos de eficiencia obtenidos a partir de las medidas realizadas. En el cálculo de eficiencia utilizando datos empíricos se consideró la expresión para colectores planos (Duffie, Beckman, 1991). Otra ecuación que se consideró en cada cálculo es la conservación de la masa (ecuación de continuidad), evaluándose en cada tramo del colector.

A partir de los cálculos realizados, aplicando las ecuaciones anteriores a lo largo del colector, es posible obtener diferentes valores de eficiencia, pero de todas las posibles curvas se optó por aquella que se ajustara más a la obtenida a partir de los datos experimentales. Por lo tanto aproximarse a estos valores es una forma de validar el método y poder aplicarlo luego a otras geometrías. Cuando se considere este método para varias geometrías diferentes se estará en condiciones de afirmar su validez general.

RESULTADOS

Los ensayos se realizaron, como se mencionó anteriormente, haciendo funcionar el sistema en convección natural y en convección forzada. Los datos se tomaron cerca del mediodía solar y el equipo (colector de aire) está instalado en el campus experimental del INENCO en la Universidad Nacional de Salta.

En el caso de los ensayos en termosifón, los valores del Número de Reynolds varían entre 3500 a 4000. Estos valores indican que el colector funciona en una condición de transición entre régimen laminar y turbulento. Para la situación de mover el flujo por un agente externo, convección forzada, los números de Reynolds superaron el valor de 4000 y en este caso el flujo es realmente turbulento.

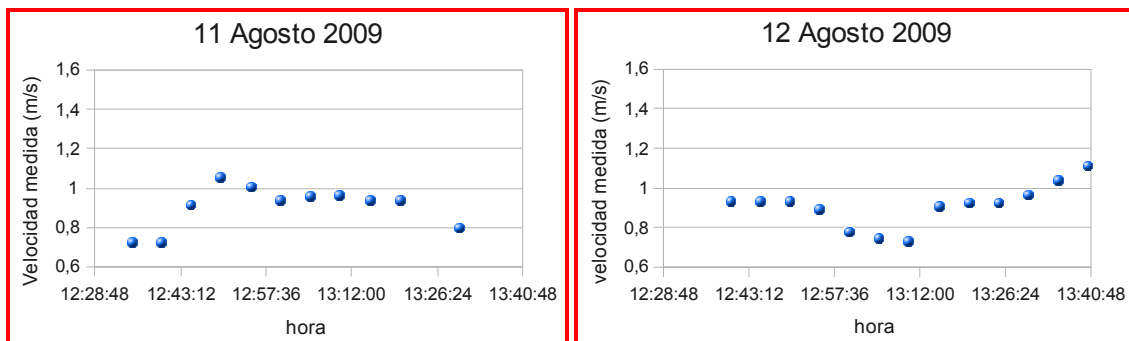


Figura 2: Valores de velocidad medidos en la entrada del colector en régimen de termosifón.

La figura 2 muestra los valores medidos de velocidad. Puede apreciarse que el sistema no trabaja con un valor de velocidad constante cuando se encuentra en régimen de termosifón. Una posible causa que hace que varíe tanto la velocidad puede deberse a la inercia térmica de algunos de los componentes del colector. Otra causa puede ser debido a que la temperatura del colector o de la chapa colectora no tienen una distribución constante de temperatura y como el movimiento es por flotación

(cambio de densidad) entonces se generan diferentes patrones de flujo en el interior del sistema. La figura 3 muestra los valores medidos en régimen forzado, también puede observarse una característica muy dispar en los valores de la velocidad de entrada. Todas estas variaciones influyen en un estudio hidrodinámico, haciendo que la eficiencia del prototipo varíe en cada instante. Por lo tanto es importante tener en cuenta estas consideraciones cuando se pretenda incorporar un sistema como el descrito en un edificio para utilizarlo como un elemento calefactor.

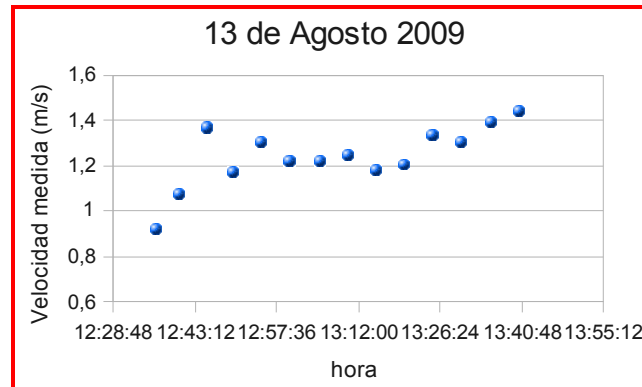


Figura 3: Valores de velocidad medidos en la entrada del colector en régimen forzado.

El sistema de ecuaciones se resuelve en cada tramo de forma tal de determinar una variable a partir del conocimiento de otra en un tramo anterior. Se obtuvieron soluciones de la ecuación para la presión y la velocidad. Tanto en la entrada como en la salida no influye el cambio de altura, ec 1, solo se la considera cuando se analiza el flujo en la zona de placas paralelas.

En cada tramo se calculó el diámetro hidráulico correspondiente así se podía analizar el colector como si fuera una cañería cilíndrica y por lo tanto aplicar las ecuaciones desarrolladas empíricamente para tuberías.

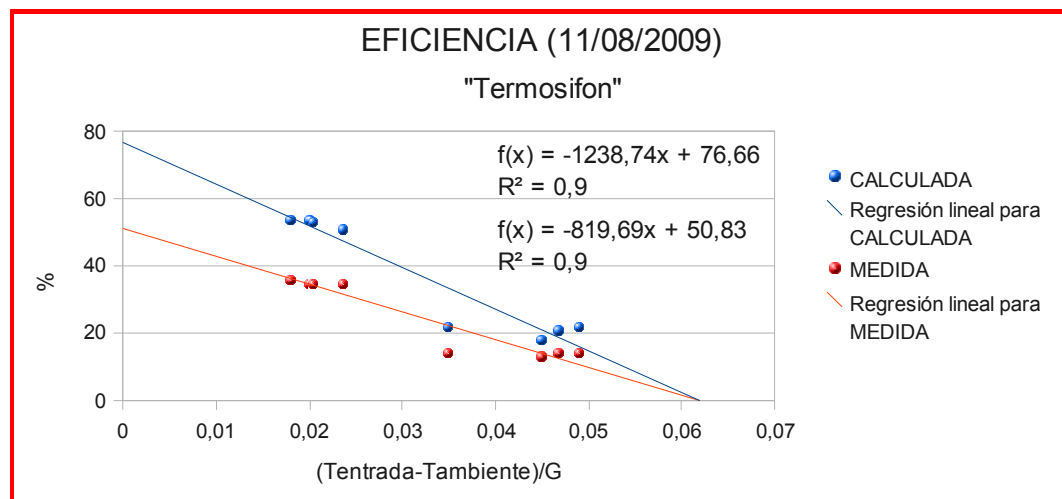


Figura 4: Curvas de eficiencia para 11 de Agosto de 2009, sistema en termosifón.

Las figuras 4 y 5 muestran los resultados obtenidos para la eficiencia del colector cuando funciona en forma natural y la figura 6 en el caso de sistema forzado. Todas las gráficas se representan en función del mismo parámetro, que es una relación entre la temperatura de entrada (medida) la temperatura ambiente (medida) y la irradiancia (medida). En este ultimo caso es el valor sobre el plano del colector.

Las líneas de tendencia se incluyen en cada gráfico para tener una referencia para la comparación de los diferentes valores. Todas las gráficas fueron construidas con datos obtenidos de la misma forma y con las mismas consideraciones. Por ejemplo, los factores de fricción son los mismos para todos los casos. Esto debe ser así porque la “tubería” siempre la misma. La rugosidad del sistema hidráulico es el principal responsable de la pérdida de carga y como es una propiedad de la superficie se consideró de la misma forma tanto para un régimen en termosifón como forzado.

Si centramos la atención en las figuras 4 y 5 se puede apreciar que tanto los valores medidos como los obtenidos con las ecuaciones guardan una correlación muy estrecha. Dicho de otra forma, salvo la diferencia en el valor la tendencia global de todos los puntos es la misma para los diferentes valores de la variable independiente.

En todos los casos los valores calculados son superiores a los medidos, una posible causa de esto puede ser que no se

consideraron pérdidas menores como pueden ser fugas de aire del sistema al exterior, cosa que no puede detectarse cuando se realizan los cálculos, pero si lo hace un equipo de medida cuando da un resultado o sea las posibles irregularidades (fugas) están presentes en el valor de la medida.

En el caso del sistema forzado, el flujo es más estable en el sentido que el movimiento inducido externamente hace que, por ejemplo, los perfiles de velocidad sean más regulares o uniformes lo que determina que el sistema se encuentre en un estado cercano al estado estacionario. Lo que no sucede y es más evidente en las gráficas, cuando el sistema es libre o sea funciona naturalmente (termosifón).

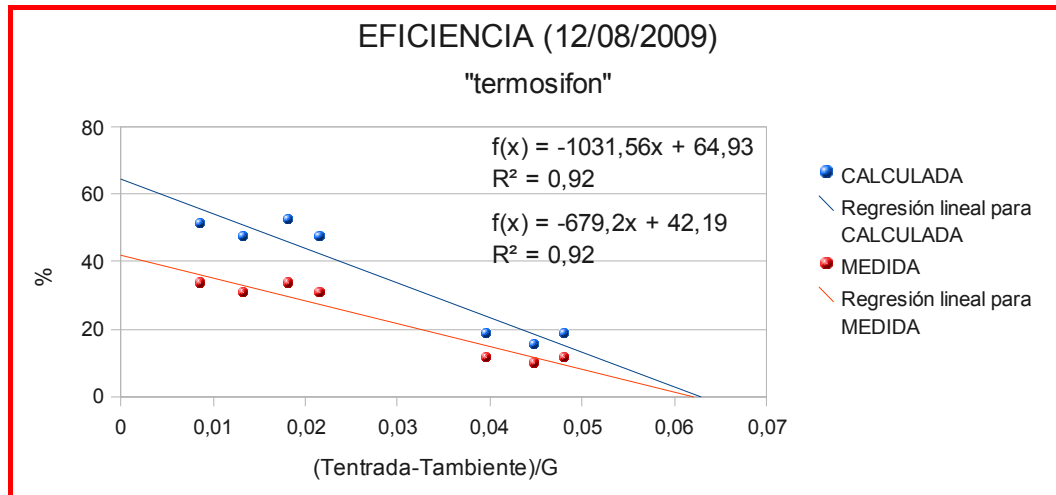


Figura 5: Curvas de eficiencia para 12 de Agosto de 2009, sistema en termosifón.

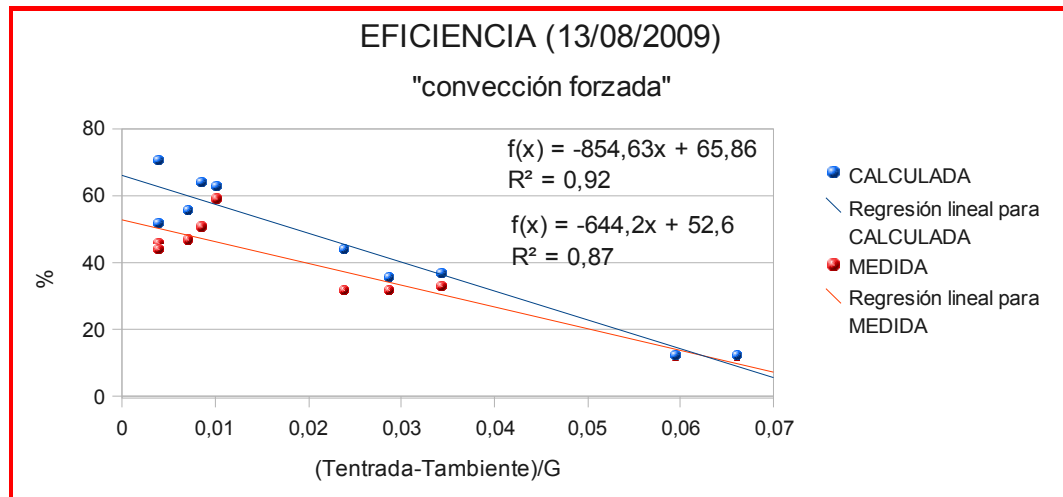


Figura 6: Curvas de eficiencia para 13 de Agosto de 2009, sistema forzado.

Otro factor importante y que es motivo de discrepancia entre lo calculado y lo medido la consideración de los perfiles como si fueran planos. O sea el flujo que sale o entra a una determinada sección del colector esta determinado por un perfil de velocidad el cual varía punto a punto en una dirección transversal a la sección. En este caso, el término que determina la energía cinética, términos cuadráticos en la ecuaciones anteriores (1) y (2) debe ser modificado.

La modificación se realiza incorporando un factor de corrección que multiplica a la velocidad elevada a cuadrado. Este factor de corrección se consigue haciendo que el flujo de energía cinética en una determinada sección sea proporcional al cuadrado de la velocidad media. Esta cuenta se debe realizar en cada zona del colector y como se pretendía obtener un método de cálculo rápido que permita una primera evaluación del sistema, no se calculó este factor. Además para calcular el flujo de energía cinética, hay que realizar una integral de superficie de esta variable y esta integral cambia a medida que se pasa de una sección a otra dentro del colector. Esto podría hacerse si se pretende un estudio más detallado del sistema.

CONCLUSIONES

A partir de comparar las diferentes gráficas se puede concluir que es posible evaluar, con este método la eficiencia con anterioridad a la construcción de un prototipo, en este caso para un colector que caliente aire. Esto significa que se pueden diseñar diferentes geometrías y luego a partir de calcular sus probables eficiencias construir la mejor. De esta forma se puede ahorrar tiempo de construcción porque se realiza un solo prototipo y por sobre todas las cosas se ahorra dinero de inversión.

Este método de cálculo debe ser mejorado en el sentido de obtener resultados más exactos, una forma de lograrlo es realmente ensayar equipos y determinar correlaciones empíricas en lo que se refiere a las pérdidas de carga en placas paralelas, placas rugosas, colectores acanalados, etc. y bajo condiciones como las que se presentan en equipos que funcionan con energía solar.

Existen correlaciones para fenómenos térmicos o hidrodinámicos, correlaciones para los dos fenómenos conjuntos para sistemas muy simples o a escala industriales. Por ejemplo hay correlaciones para flujos en placas paralelas verticales isotermas o calentadas uniformemente en un costado, no existen o no son fáciles de obtener, correlaciones para la misma geometría pero calentando en forma variable una de las caras paralelas. En este sentido es necesario ensayar este tipo de sistemas y a partir de consideraciones teóricas como las presentadas obtener relaciones empíricas que permitan diseños más eficientes.

Otro aspecto importante, independiente de los valores presentados y comparados es que el sistema ensayado presenta una muy buena eficiencia de trabajo. Si bien no fue el objetivo de este trabajo presentar un determinado colector, queda claro que el sistema ensayado presenta una muy buena eficiencia de trabajo, lo que establece que los colectores de aire son una muy buena opción a implementar en la calefacción de locales.

BIBLIOGRAFIA

Crane (1990) "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

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

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

ABSTRACT

In the case of a solar collector, where the working fluid is air, its geometry is discussed and proposed an energy balance through its hydraulic circuit to determine the main characteristics of the airflow. After considering the pressure drops, the head loss on accessories, the effect of friction between the fluid and solid materials or changes in the main flow direction are calculated values of the main variables involved. The results that arise from solving the hydrodynamic equations together with the first law of thermodynamics. The results were summarized in efficiency curves for an air collector and compared with experimental data. This methodology paper presents an alternative analysis for the case of solar devices and allows consideration of efficiency values as a variable pre-design.

Keywords: natural convection flat-plate collectors