

ESTIMACION DE COEFICIENTES CONVECTIVOS EN RECINTOS CON BAJA VENTILACIÓN

V. Molina¹, C González, S. Ogrégón, N. Salvo

INENCO – Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177 - (4400) – Salta – Argentina
Tel: 54-387-4255424 Fax: 54-387-4255489

U.F.I.De.T – Salta – Unidad de Formación e Investigación y Desarrollo Tecnológico - Salta
Fragata Libertad 550 – Salta- Argentina
Tel: 54-387-4255888 Fax: 54-387-4252428

E-mail: molinav@inenco.net – gonzalec@inenco.net – obregon@inenco.net - nahuel@unsa.edu.ar

RESUMEN: Para analizar la ventilación de un determinado recinto o vivienda se necesita determinar las características fluidodinámicas del aire que circula en su interior además de conocer valores de temperatura en muros, pisos y techos. A partir de un análisis bidimensional se puede determinar los efectos del cambio de temperatura en un vivienda determinando correlaciones para el cálculo de coeficientes convectivos en general. Estos dependen de la velocidad del aire como también de la distribución de la temperatura en el recinto. Por lo tanto poder evaluarlos representa información muy importante a tener en cuenta a la hora de diseñar una vivienda, cuando se pretende tener una aproximación de las ganancias como pérdidas de energía. Estas correlaciones dependerán principalmente de las aberturas ya que ellas determinan la forma en que circula el aire en el interior. En tal sentido se presentan resultados provenientes de una simulación numérica para la variación de temperatura, velocidad y calculo de coeficientes convectivos dentro de una vivienda. Se realiza un análisis bidimensional utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF).

Palabras claves: simulación numérica, ventilación, convección forzada, coeficientes convectivos.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el estudio de los fenómenos sobre la transferencia de energía por convección natural y forzada ha recibido considerable atención por parte de ingenieros, arquitectos, etc. Este interés se debe exclusivamente a que este tipo de fenómenos altera apreciablemente las características térmicas de numerosas utilidades. En particular, si se considera una vivienda la ventilación está asociada con la ganancia y pérdida de energía con respecto al ambiente y los coeficientes convectivos determinan el flujo de energía.

En el caso de considerar un recinto ventilado, los patrones de circulación dentro de él están estrechamente ligados a las características del flujo externo. La circulación de aire en el interior del recinto dependerá de muchas variables como ser: la orientación con respecto al flujo externo, distribución de aberturas, diseño interior (distribución de locales), etc. Todas estas variables determinan los patrones del flujo en el interior, los cuales en la mayoría de las aplicaciones son turbulentos. A todas las variables enunciadas hay que sumarle que la distribución de temperatura en el interior de una vivienda no es constante sino que varía punto a punto (variación espacial) además de variar temporalmente. Como por lo general el flujo es turbulento, se debe tener en cuenta las componentes aleatorias tanto de la velocidad como de la temperatura.

Plantearse resolver una situación como la enunciada en los párrafos anteriores, implica utilizar métodos aproximados, por que intentar realizar un análisis exacto de una situación tal significaría resolver un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, tarea casi imposible de llevar a cabo. Por el contrario obtener soluciones aproximadas para este tipo de problemas hoy en día es alcanzable. Los métodos numéricos permiten obtener tales tipos de soluciones. Un método, muy difundido por su versatilidad en este tipo de planteos, es el Método de Elementos Finitos (MEF).

El MEF, es un método que permite aproximar problemas continuos. La idea básica del método es dividir el espacio físico bajo estudio en un número finito de partes. El comportamiento de cada parte se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos, denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con su adyacente y el comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos. Esto se hace mediante funciones de interpolación. Por lo tanto un fenómeno continuo como el planteado puede ser aproximado por un modelo discreto. Implementar el MEF para un problema como el propuesto implica diseñar y discretizar (mallado) el medio continuo de estudio, imponer condiciones de contorno y/o iniciales a ciertos nodos, resolver el sistema de ecuaciones y realizar el post-proceso para la visualización de los resultados. Por lo tanto el estudio de la dinámica de fluidos, con fenómenos acoplados de transferencia de calor, puede ser enfocado utilizando técnicas iterativas para resolver un sistema de ecuaciones no lineales. (Molina et al. 2003)

La simulación numérica del flujo de aire y la distribución de temperatura dentro de un determinado local involucra la

1 Docente e Investigador de U.F.I.De.T - Salta

solución numérica de la ecuación de continuidad (conservación de la masa), las ecuaciones de conservación de momento y la ecuación de conservación de energía. Además, si el flujo es turbulento, implica que la velocidad y la temperatura en cualquier punto son fluctuantes en el tiempo a una determinada frecuencia. Esto implica que se debe utilizar un modelo que determine la viscosidad turbulenta y por lo tanto resolver una nueva ecuación diferencial la cual se acopla al sistema de ecuaciones de conservación. (Molina, et al. 2004).

SISTEMA DE ECUACIONES

La descripción matemática de un problema de ventilación significa resolver el sistema de ecuaciones que se muestra en la Tabla 1. En ella se resumen las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno. Estas ecuaciones son las que se resuelven utilizando el MEF. Como se supone un flujo turbulento, para el modelo de viscosidad se emplea el k-w de acuerdo a lo analizado en trabajos anteriores. (Molina et al. 2005)

Descripción	Ecuación
<i>Ecuación de continuidad</i>	$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ \mathbf{u} = velocidad
<i>Ecuación de Navier Stokes</i>	$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot 2 \mu \mathbf{D}$ \mathbf{f} = fuerzas de volumen \mathbf{D} = tensor velocidad de deformación
<i>Balance de Energía Cinética</i>	$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = P_k - C_\mu \frac{k^{3/2}}{L} + \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + \nu \Delta k$; $\nu_t = \frac{k}{\omega}$ $\nu = \frac{\mu}{\rho}$
<i>Ecuación de la variable auxiliar ω</i>	$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k} P_k - C_{\omega 2} \frac{\omega^2}{k} + \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \nabla \omega \right) + \nu \Delta \omega$ $P_k = \frac{1}{\rho} \sigma_R : \nabla \mathbf{u}$
<i>Ecuación de Calor</i>	$\rho C_p [\partial_t T + \mathbf{u} \cdot \nabla T] - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = S$ T= temperatura
<i>Coefficiente Convectivo Forzado</i>	$h_{forz} = (6.940 - 0.0344 T_{film}) u^{4/5} L^{-1/5}$
<p>P_k=producción de energía cinética, C_μ constante experimental, σ_k tensor de tensiones, $C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$ constantes para este modelo - k = energía cinética turbulenta, σ_R tensor de Reynolds, κ coeficiente de conducción térmica, S fuente de calor, h_{forz} coeficiente convectivo forzado, T_{film} temperatura promedio entre el aire y la superficie, L longitud característica.</p>	

Tabla 1: Sistema de ecuaciones a resolver por el Método de Elementos Finitos.

El cálculo del coeficiente convectivo determina la rapidez con que se disipa la energía por efecto del flujo. Para determinar el o los valores de este coeficiente se deben imponer ciertas hipótesis de trabajo. Con respecto a esto y a partir de que el MEF determina en cada nodo los valores de velocidad y temperatura se utilizaron estos valores para evaluar dichos coeficientes. La bibliografía en general muestra para el cálculo del coeficiente convectivo forzado relaciones empíricas. Una de ellas es la propuesta por Burch (1980) y McAdams (1954) para el coeficiente convectivo forzado y es de la forma $Nu = f(Re, Pr)$.

$$Nu = h_{forz} \frac{L}{k} = 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3}$$

donde:

Número de Reynolds - $Re = u L / \nu$

Número de Prandtl - $Pr = \nu / \lambda$

donde λ : coeficiente de difusión térmico (m²/s)

ν : viscosidad cinemática (s/m²)

u : módulo de la velocidad (m/s)

Esta ecuación puede ser linealizada sobre un rango de temperaturas, el cual usualmente se elige para la simulación de edificios o viviendas, entre (260 K y 300 K):

$$h_{forced} = (6.940 - 0.0344 T_{film}) u^{4/5} L^{-1/5}$$

donde T_{film} es el promedio de la temperatura del aire en el exterior de la vivienda y la temperatura de la zona caliente (interior)

de la vivienda) y L (una longitud característica), la cual se supone como la dimensión más relevante de la abertura por donde circula la corriente de aire.

RESULTADOS

Las ecuaciones anteriores se aplicaron al caso de una vivienda ya ensayada en trabajos anteriores (Molina et al, 2005). Con el objeto de generalizar los resultados para diferentes condiciones de flujo se estudiaron dos orientaciones de la casa con respecto a la dirección del flujo exterior. La figura 1 muestra parte de la malla de elementos finitos en el recinto (primera orientación) y la figura 2 muestra la segunda orientación. La cantidad de nodos y elementos considerados fueron los siguientes: Incidencia normal del aire exterior sobre la vivienda (figura 1): 6330 nodos, 5982 elementos; incidencia con un ángulo de 45° de la vivienda con respecto al flujo principal (figura 2): 5983 nodos, 5760 elementos.

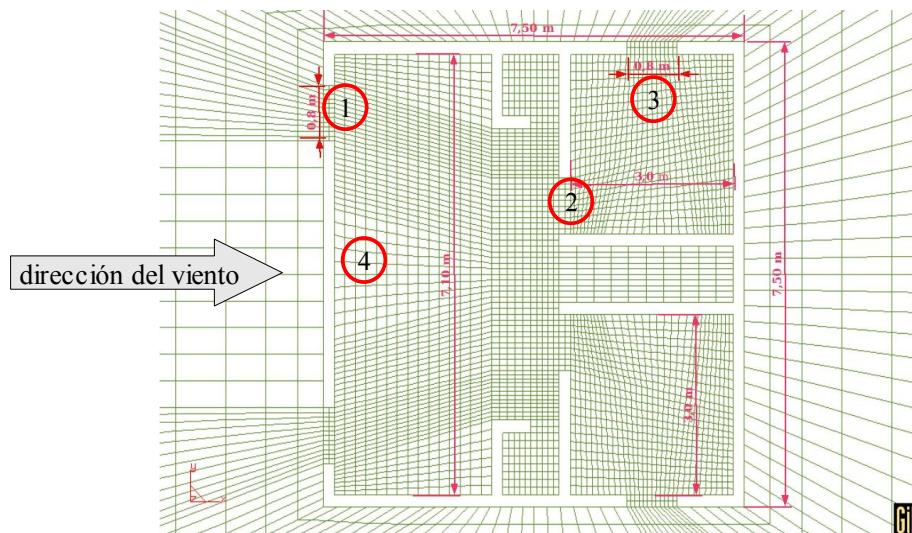


Figura 1: Corte de planta de la vivienda (primera orientación)

La temperatura ambiente inicial en el interior se fijó en 20°C (293 K) y para la temperatura del aire exterior se consideró 16°C (289 K), para las temperaturas de las paredes internas y externas impusieron los valores de 19°C y 15°C (292 K y 288 K) respectivamente a los efectos de la simulación. Estas condiciones iniciales pueden ser modificadas como también la velocidad del viento incidente la que fue asumida en ambos casos estudiados en $u = 0.5$ m/s (velocidad media). La ejecución del programa simula una situación hidrodinámica de 15 minutos, con un paso temporal de 5 s. La forma arbitraria de fijar los valores de temperatura no influye en las características del programa.

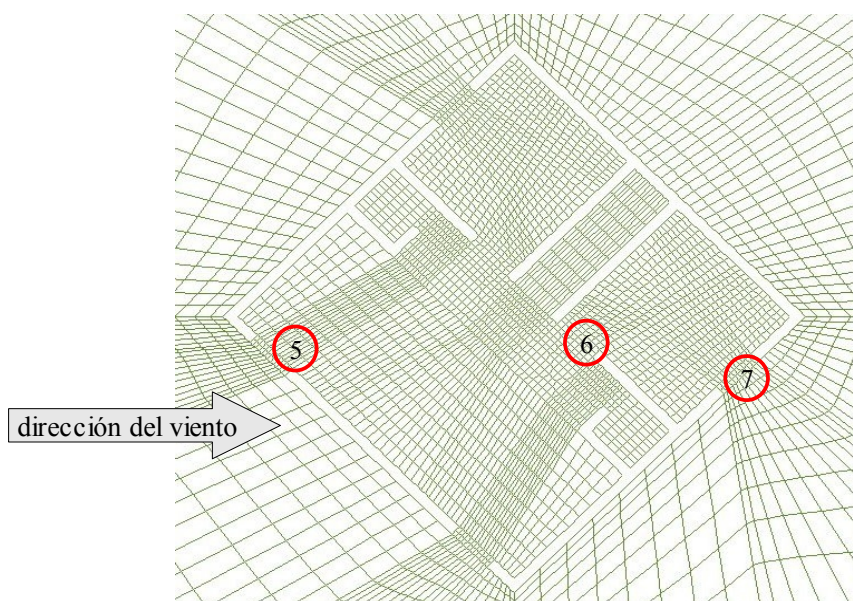


Figura 2: Corte de planta de la vivienda (segunda orientación)

El objetivo principal del trabajo es obtener una herramienta de cálculo que permita determinar coeficientes convectivos con la idea de obtener una distribución de energía en el interior de un recinto y poder analizar las pérdidas al medio ambiente. Determinar además si estos coeficientes dependen de la orientación de la vivienda y por ende de sus aberturas con respecto a la dirección principal del flujo externo.

En las figuras 1 y 2 también las zonas donde se calcularon los coeficientes convectivos a partir de la distribución de temperatura y velocidad en el interior y con respecto a las condiciones del flujo en el exterior. En la primera orientación las zonas 1, 2 y 3 se encuentran en la corriente principal de circulación del aire en el interior, mientras que la zona 4 está en un punto de estancamiento entre las dos puertas de entrada, las cuales se encuentra abiertas. Para la segunda orientación las zonas de análisis son 5, 6 y 7. Las zonas fueron elegidas aleatoriamente, pudiendo estudiarse cualquier sector en particular. Según la bibliografía los coeficientes convectivos forzados se expresan como una función de la velocidad del viento o del aire que incide sobre el cuerpo y de la temperatura. Como los datos de la distribución de velocidad y temperatura se obtienen para cada nodo de la malla para cada instante de la simulación se cuenta con un volumen de datos suficientes para realizar un cálculo muy aproximado. De esta forma se pueden evaluar los coeficientes de transferencia de energía en cada zona, por efecto de la circulación del aire y variación de la temperatura, considerando muchos valores locales y sus variaciones espaciales. Por lo tanto el resultado es una muy buena aproximación de lo que realmente sucede.

Los resultados así obtenidos, en código de colores se pueden ver en la figura 3, para la primera orientación y en la figura 4, para la segunda orientación. Para la figura 3 puede observarse la simetría del fenómeno.

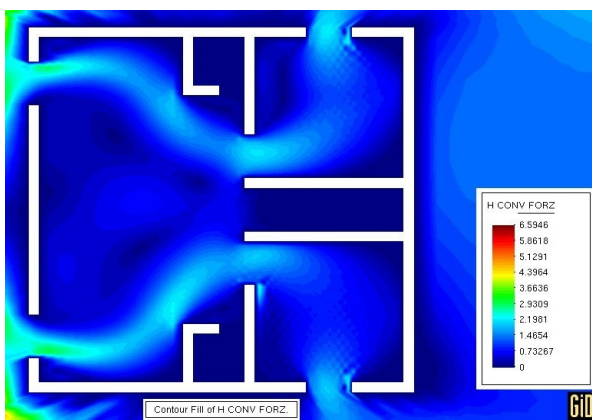


Figura 3: Coef. para todos los nodos (1ra orientación)

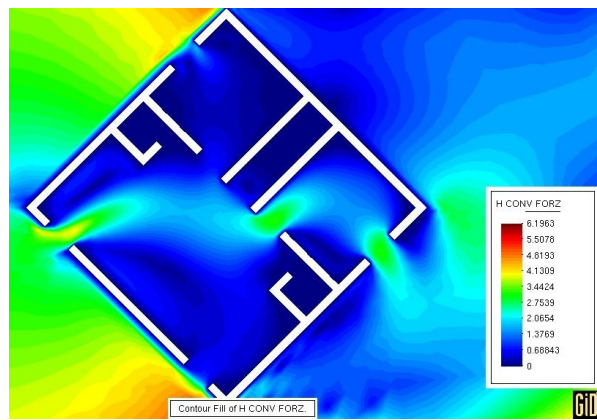
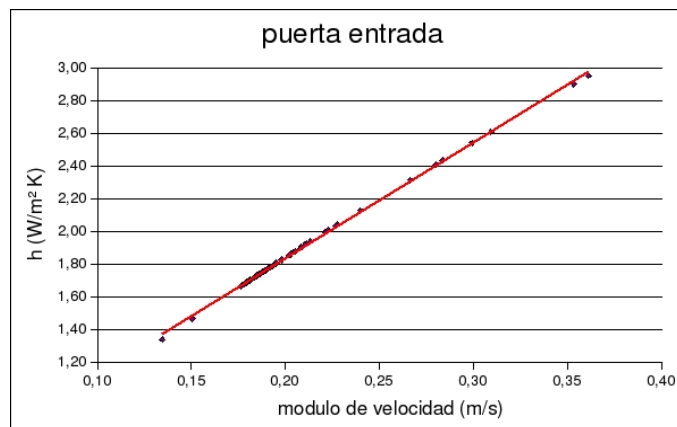


Figura 4: Coef. para todos los nodos (2da orientación)

En las gráficas que se muestran a continuación puede observarse, para los lugares que se indicaron en la figura 1, los valores obtenidos del coeficiente convectivo forzado y su regresión lineal correspondiente. Los datos para todas las gráficas representan 15 minutos de simulación en tiempo real.

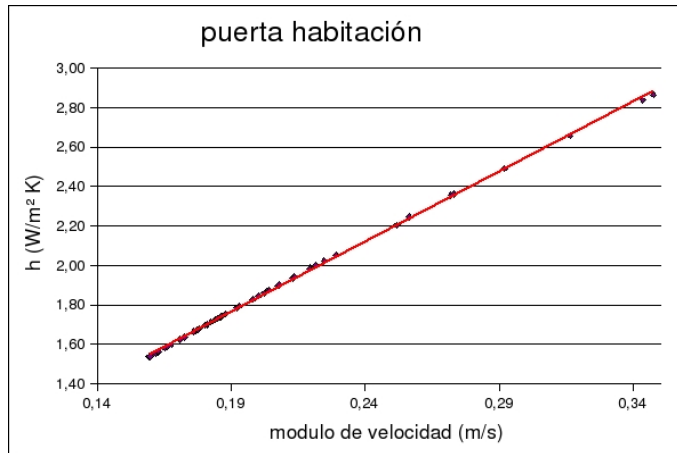


Gráfica 1: coeficiente convectivo forzado para la puerta de entrada (primera orientación).sector 1

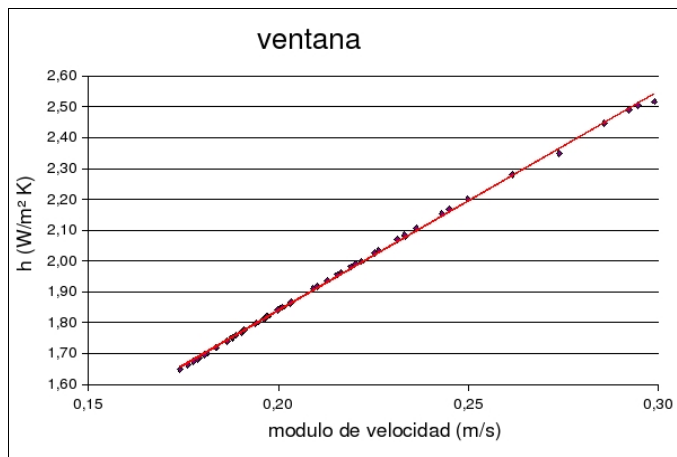
Las gráficas 1 y 2 muestran un comportamiento idéntico, esto se debe a que ambos sectores se encuentran en la corriente principal de circulación del aire en el interior de la vivienda aunque los parámetros del ajuste son diferentes. Todos los puntos representados están igualmente espaciados en el tiempo con un intervalo de 5 s.

Puede observarse también que hay una mayor concentración de valores para algunos intervalos de tiempo, esto también se repite en todas las gráficas que se muestran, inclusive para la otra orientación (45°).

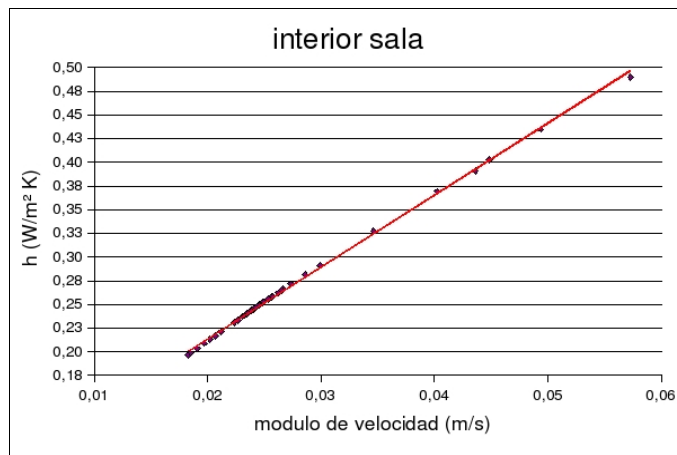
Este aspecto se puede justificarse a partir de que hay valores de velocidad más probables que otros, son los valores para cuando se establece el flujo en un estado casi estacionario. Si se excluyeran los valores menos probables las correlaciones no cambian sustancialmente. La gráfica 3 muestra la correlación encontrada para el sector de la ventana. En este sector, los valores están más separados, lo que se justifica a partir de que el flujo en la ventana esta muy influenciado por la corriente de aire externa a la vivienda y por lo tanto no hay un patrón constante en el tiempo para los valores de velocidad en este sector.



Gráfica 2: coeficiente convectivo forzado para la puerta de habitación (primera orientación).sector 2



Gráfica 3: coeficiente convectivo forzado para una ventana de la habitación (primera orientación).sector 3



Gráfica 4: coeficiente convectivo forzado para una zona interior (primera orientación) sector 4.

Para la gráfica 4 se puede observar una mayor concentración de valores para módulos de velocidad menores, lo que significa

que hay recirculación en este sector y se traduce en una regresión lineal con una menor pendiente (Tabla 2) y con una menor ordenada al origen.

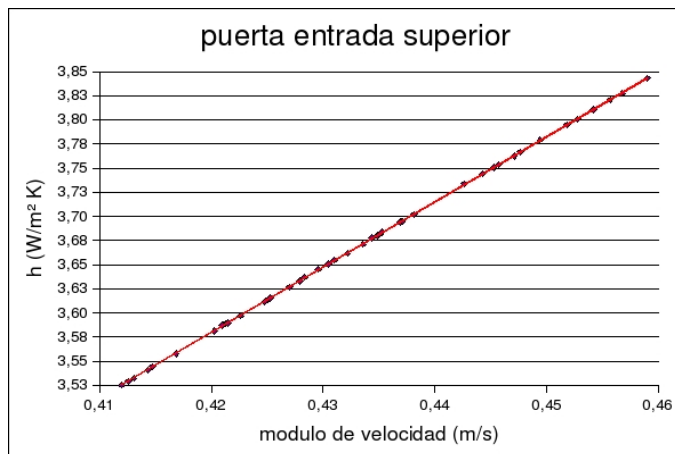
En la tabla 2 se resumen las correlaciones mostradas. Para todos los sectores la pendiente de la regresión es del mismo orden. Los coeficientes de correlación para todos los ajustes son del orden de 0,999.

<i>Lugar de la vivienda</i>	<i>primera orientación</i>
sector 1	$h_{forz} = 7,0932 \bar{u} + 0,4211$
sector 2	$h_{forz} = 7,1046 \bar{u} + 0,4152$
sector 3	$h_{forz} = 7,0731 \bar{u} + 0,42057$
sector 4	$h_{forz} = 7,0511 \bar{u} + 0,0756$

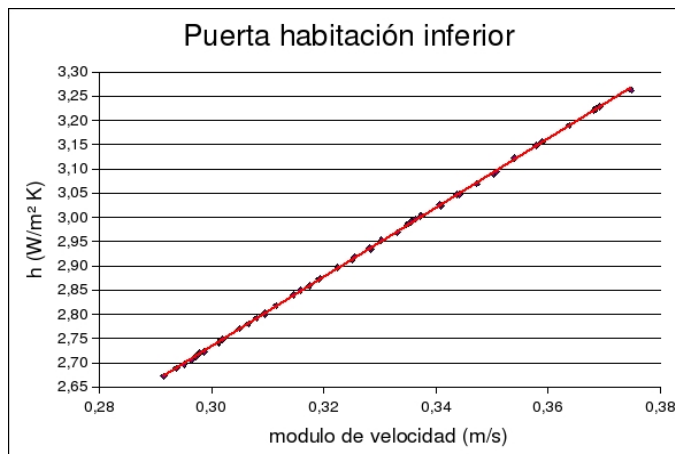
Tabla 2: Correlaciones para la primera orientación de la vivienda

En las gráficas 5, 6 y 7 se muestran los datos obtenidos para la segunda orientación. En la tabla 3 se listan las ecuaciones de la regresión lineal correspondientes. También para estos casos el coeficiente de correlación es de $R = 0,999$

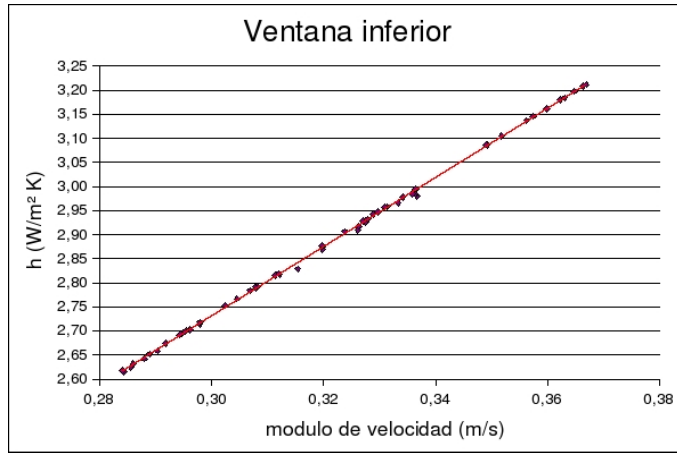
Los datos para esta orientación están más uniformemente distribuidos que en el caso anterior. Esto puede deberse a que la circulación principal atraviesa diagonalmente la vivienda (preponderancia a la circulación cruzada). Si se compara la gráfica 1 con la gráfica 5 puede observarse que en esta última los datos están más uniformemente distribuidos no existiendo concentración de valores. Una causa de ello es que, por efecto de la orientación, la corriente de aire se establece rápidamente no sucediendo esto en la primera orientación.



Gráfica 5: coeficiente convectivo forzado para una zona interior (segunda orientación) sector 4.



Gráfica 6: coeficiente convectivo forzado para una zona interior (segunda orientación) sector 4.



Gráfica 7: coeficiente convectivo forzado para una zona interior (segunda orientación) sector 4.

En la tabla 3 se resumen las regresiones lineales mostradas. Para esta orientación cambian los valores de las constantes de la regresión en el caso de la puerta de entrada.

Lugar de la vivienda	segunda orientación
sector 5	$h_{forz} = 6,7617\bar{u} + 0,7400$
sector 6	$h_{forz} = 7,1449\bar{u} + 0,5909$
sector 7	$h_{forz} = 7,1881\bar{u} + 0,5749$

Tabla 3: Correlaciones para la segunda orientación de la vivienda

Si se representara los vectores velocidad para todos los tiempos de simulación se puede observar que para esta orientación inicialmente el aire del exterior no ingresa directamente a la vivienda sino que por la puerta de entrada se genera una corriente desde el interior hacia el exterior. O sea se establece un gradiente adverso lo que se debe a que hay una recirculación en la parte posterior de la casa. (Molina et al 2005)

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, para la simulación numérica en la determinación de coeficientes convectivos, se puede considerar que el programa empleado resulta ser una buena alternativa de diseño y estudio de problemas de intercambio de energía entre diferentes recintos.

Un parámetro importante, en el cálculo de los coeficientes convectivos, es la determinación de la longitud característica. Esta depende de la disposición de las aberturas con respecto a dirección principal del flujo incidente y también del sector donde se pretenda evaluar los coeficientes. Por ejemplo, para la primera orientación, las aberturas principales (las dos puertas) se encuentran en dirección normal al flujo en cambio en la segunda orientación las aberturas forman un ángulo con la corriente principal. Para el primer caso la longitud característica es el ancho de la puerta pero en el segundo caso es el ancho proyectado sobre la dirección del flujo, que resulta menor que el anterior.

Si bien la ecuación de cálculo para el coeficiente convectivo depende de los valores de la velocidad elevados a la 4/5, en el rango de velocidades características dentro de la vivienda (obtenidas de la simulación numérica) los coeficientes se comportan de forma lineal. De esta forma se cuenta con una sencilla relación entre h y la velocidad que permitiría evaluar cuantitativamente el intercambio de energía.

REFERENCIAS

Mermet A, Lesino G. “Modelización desarrollo y ensayo de calentadores solares de aire para ventilación en aulas. (Evaluación del confort bioambiental en aulas de escuelas primarias) Tesis Doctoral

M. Grosso (1992) “Wind pressure distribution around buildings: a parametrical model”.- Department of Enviromental Science and Technology, Politecnico di Torino, Turin (Italy).

A.R. Kristoffersen (2004) “Effect of room air delay on the decay rate of tracer gas concentration”.- Norwegian Building Research Institute, Norway

D. Faulkner (2002) "Ventilation efficiencies of a desk-edge-mounted task ventilation system".- Lawrence Berkeley National Lab, Berkeley, CA, USA.

R. W. Bottcher (1986) "Experimental analysis of wind ventilation of poultry buildings".- American Society of Agricultural Engineers.

J. Niu & J. Van der Kooi (1992) "Two-dimensional simulation of airflow and thermal comfort in a room with open-window and indoor cooling systems".- University of Technology of Mekelweg , Netherlands.

L Davison (2003) "An Introduction to Turbulence Models".- Departament of thermo and fluid dynamics. Chalmers University of Technology – Suecia.

Burch, D.M. and Luna, D.E.(1980). A Mathematical Model for Predicting Attic Ventilation Rates Required for Prevention of Condensation on Roof Sheathing. Ashrae Trans. Vol 86:201. Ashrae, Atlanta, California.

Walker I., Degenetais G. and Siegel J. (2002). Simulation of Sizing and Comfort Improvements for Residential Forced – Air Heating and Cooling Systems. Energy Performance of Building Group Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley. California.

Molina V. Salvo N. Villena M. (2005). "Análisis fluidodinámico de un vivienda". Avances en Energía Renovables y medio ambiente. Vol. 9, versión CD, pp.05.13-05.18.

Molina V. Obregón S. Salvo N. (2005)."Visualización de flujos de energía en recintos ventilados". Avances en Energía Renovables y medio ambiente. Vol. 9, versión CD, pp.08.79-08.84.

ABSTRACT: To analyze the ventilation of a certain enclosure or housing it is necessary determine the characteristics fluidodinámicas of the air that circulates in this interior beside knowing values of temperature in walls, floors flats and roofs. From a two-dimensional analysis it is possible to determine the effects of the change of temperature in a vivienda determining correlations for the calculation of coefficients convectivos in general. These depend on the speed of the air as also on the distribution of the temperature in the enclosure. Therefore to be able to evaluate them represents very important information to bearing in mind at the moment of designing a housing, when one tries to take an approximation of the earnings as losses of energy. These correlations will depend principally on the openings since they determine the form in which it circulates the air in the interior. To this respect they present results provenientes of a numerical simulation for the variation of temperature, speed and I calculate of coefficients convectivos inside a housing. A two-dimensional analysis is realized using the Method of Finite Elements (MEF).

Keyword: numerical simulation, ventilation, forced convection, coefficients convectiv.