



## VISUALIZACIÓN DE FLUJOS DE ENERGÍA EN RECINTOS VENTILADOS

V. Molina, S. Obregón, N. Salvo

INENCO – Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - (4400) – Salta – Argentina  
Tel: 54-387-4255424 Fax: 54-387-4255489  
E-mail: molinav@inenco.net obregon@inenco.net nahuel@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** Cuando el viento incide sobre un obstáculo no solo se modifican los patrones del flujo por su presencia sino que también se modifican las condiciones térmicas fuera y dentro de este. La ventilación de un determinado recinto depende entre otros factores de la orientación de aberturas con respecto al flujo principal que lo rodea. Su disposición determina la circulación del aire en el interior de una habitación. En tal sentido se presentan resultados para la variación de temperatura y vectores de velocidad dentro y fuera de un recinto el que contiene aberturas y se encuentra inmerso en un flujo turbulento.

**Palabras claves:** simulación numérica, ventilación, flujo recirculante.

### INTRODUCCIÓN

El estudio de la transferencia de energía térmica por convección natural y por acción del viento a recibido considerable atención en los últimos años por parte de ingenieros, arquitectos, etc. Este interés se debe particularmente a que este tipo de fenómeno modifica las características térmicas de muchas aplicaciones. En particular, si se considera que la mayoría de las personas permanecen mucho tiempo dentro de oficinas, habitaciones o cualquier otro tipo de espacios interiores, la calidad del aire dentro de estos recintos se ve afectada por problemas de contaminación y sobre todo en locales con poca ventilación. Por lo tanto, la ventilación es necesaria para remover los contaminantes de los ambientes interiores y acondicionar correctamente el hábitat para su ocupantes. Esta consideración ha generado una creciente cantidad de ensayos experimentales y estudios al respecto, motivados principalmente en brindar una mejor calidad del aire que se respira, que en locales con poca ventilación la contaminación se presenta con una mayor frecuencia.

Tener una descripción del movimiento de las corrientes de aire en locales, brindaría al proyectista información no solo de la ventilación de la habitación sino también sobre una de las posibles causas de pérdida o ganancia de energía con respecto al entorno.

Las alteraciones que sufre un determinado flujo en presencia de un obstáculo se encuentran presentes en todas sus direcciones. Además las características de la corriente fluida son diferentes delante y detrás del objeto. Si además el fluido ingresa dentro del obstáculo atravesándolo, las alteraciones externas se manifestarán en el interior. Por este motivo y con la necesidad de tener una mejor visualización del fenómeno es importante considerar esta interacción, entre el ambiente externo e interno en el análisis global de esta situación.

En la mayoría de los recintos ventilados los flujos presentan un comportamiento recirculante, caracterizado por vórtices y como es de interés conectar los patrones de flujo del ambiente exterior con el interior se deben considerar ambas situaciones simultáneamente.

En este trabajo se considera el perfil de una vivienda en distintos cortes y con diferentes orientaciones con respecto a la dirección del flujo principal de aire, el interior de la misma se lo supone como un solo habitáculo. Además para todos los cálculos se asume una diferencia de temperatura entre el aire fresco del exterior y el de la vivienda. Esta corriente de aire ingresa a la vivienda a través de las ventanas para producir una recirculación global y ventilarla modificando la temperatura media de la misma. También como se explica luego se supone en algunos casos una fuente de energía constante en el interior. Las características del flujo de aire dentro de un recinto depende de como se presenta fuera de este, por lo tanto los resultados que se muestran están sujetos a las orientaciones del mismo con respecto a la corriente principal externa y por supuesto al variar el flujo externo cambiarán los patrones de circulación internos.

### MODELO COMPUTACIONAL

En 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 lineal. Una técnica de cálculo es el caso del Método de Elementos Finitos (MEF). El sistema de ecuaciones se obtiene discretizando el espacio continuo que está siendo modelado, llamado dominio y sobre cada elemento de esta discretización se resuelve el sistema de ecuaciones, (Molina et al. 2003).

Para el caso que se estudia, el dominio empleado en cada una de las geometrías, considera el flujo de aire que rodea a un recinto e interacciona con este, tanto fluidodinámicamente como en transferencia de energía. La característica principal del flujo incidente es su turbulencia la que es modelada a partir de un modelo determinado de viscosidad.

La simulación numérica del flujo de aire y la distribución de temperatura dentro y fuera del local considerado involucra la solución numérica de la ecuación de continuidad, las ecuaciones de conservación de momento y la ecuación de conservación

de energía. Como hipótesis de trabajo se consideró que el flujo dentro del ambiente interior de la vivienda es completamente turbulento, por lo tanto, la velocidad y la temperatura en cualquier punto del mismo son fluctuantes en el tiempo a una alta frecuencia. A partir de lo anterior la elección del modelo turbulento a utilizar debe responder a esta imposición. El modelo empleado es el modelo  $k-\omega$ , el cual ya fue discutido en trabajos anteriores (Molina, et al. 2004).

Al dominio de trabajo se lo dividió en dos subdominios, uno que considera el ambiente exterior y otro el interior. La solución del problema se plantea en forma simultánea para ambos subdominios con el objeto de poder visualizar la interacción que ejerce el exterior sobre el interior. En la discretización se empleó un programa desarrollado en el International Center for Numerical Method in Engineering (CIMNE) en su versión 6.0. Este programa (GiD) permite la definición, preparación y visualización de los datos relacionados con la simulación numérica. Para la simulación propiamente dicha se implementó un código en FORTRAN que implementa el MEF.

### SISTEMA DE ECUACIONES - MODELO DE VISCOSIDAD

La tabla que se muestra a continuación resume el sistema de ecuaciones a resolver para el análisis del problema planteado. Las ecuaciones del balance de energía cinética y la ecuación diferencial de la variable auxiliar  $\omega$  determinan el modelo  $k-\omega$  para un flujo de fluido. Para el uso de estas ecuaciones se acepta la hipótesis de Boussinesq.

Descripción	Ecuación
Ecuación de continuidad	$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ $\mathbf{u}$ = velocidad
Ecuación de Navier Stokes	$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot 2\mu \mathbf{D}$ $\mathbf{f}$ =fuerzas de volumen $\mathbf{D}$ =velocidad de deformación
Balance de Energía Cinética	$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = P_k - C_\mu \frac{k^{3/2}}{L} + \nabla \cdot \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + \nu \Delta k$ ; $\nu_t = \frac{k}{\omega}$ $\nu = \frac{\mu}{\rho}$
Ecuación de la variable auxiliar $\omega$	$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k} P_k - C_{\omega 2} \frac{\omega^2}{k} + \nabla \cdot \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \nabla \omega \right) + \nu \Delta \omega$ $P_k = \frac{1}{\rho} \sigma_R \cdot \nabla \mathbf{u}$
Ecuación de Calor	$\rho C_p [\partial_t T + \mathbf{u} \cdot \nabla T] - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = S$ T= temperatura

$P_k$ =producción de energía cinética,  $C_\mu$  constante experimental,  $\sigma_k$  tensor de tensiones,  $C_{\omega 1}$ ,  $C_{\omega 2}$  constantes para este modelo  
 $k$  = energía cinética turbulenta,  $\sigma_R$  tensor de Reynolds,  $\kappa$  coeficiente de conducción térmica,  $S$  fuente de calor.

### DEFINICION DE LAS GEOMETRIAS (PRE-PROCESO)

En la definición de las geometrías estudiadas se empleó el programa GiD. Las figuras 1 y 2 muestra una parte del mallado del recinto estudiado en sus cortes de perfil y de planta. El tipo de elemento empleado en la discretización de los dominios esta formado por cuatro nodos, elemento brick. En cada figura se detalla la cantidad de nodos y elementos.

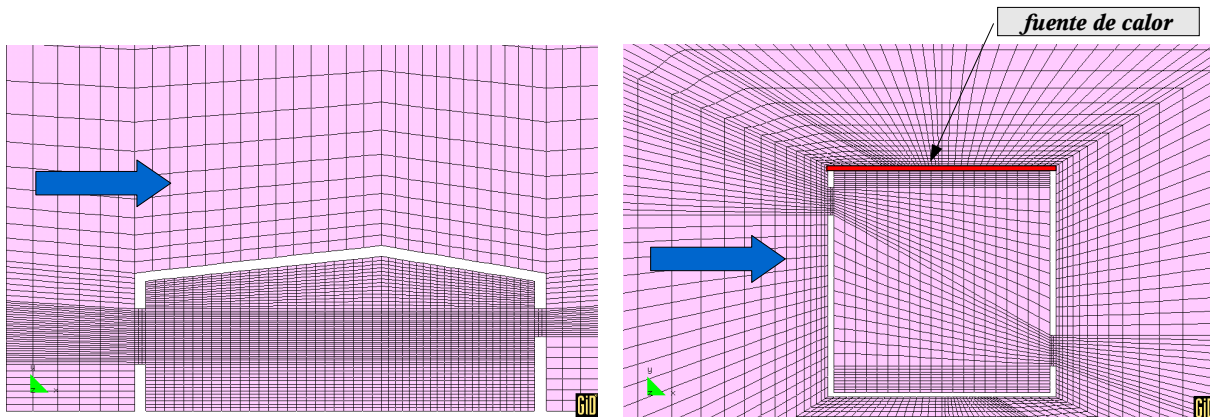


Fig. 1. Mallado, vista de perfil,  
6386 nodos - 6148 elementos

Fig. 2. Mallado, vista de planta,  
5115 nodos - 4912 elementos

Las dimensiones del recinto son 7.5 m de ancho y largo con una altura de 2,5 m inferior y 3,0 m de altura superior. Las aberturas son de 0,9 m para la vista de planta y 1,0 m y 0,5 m de ancho para la vista en corte. Se suponen para el cálculo que todas las aberturas se encuentran completamente abiertas.

### RESULTADOS OBTENIDOS (POST-PROCESO)

En las figuras 1 y 2 el aire incide desde la izquierda. Para el recinto visto de planta (Figura 2) se consideraron además tres

orientaciones con respecto al flujo principal. La dirección del flujo incidente se detallada con una flecha.

En la caracterización del aire incidente al recinto se consideró flujo medio estacionario, asumiendo un valor para la velocidad media de  $u = 0.4$  m/s. Las condiciones iniciales para la temperatura se suponen constantes tomando los siguientes valores: temperatura del flujo incidente  $T = 4^\circ\text{C}$  (277 K), temperatura del recinto de  $19^\circ\text{C}$  (292 K), para las paredes (lado interno) de  $17^\circ\text{C}$  (289 K). Además en el caso del obstáculo visto de perfil se suponen dos alternativas: 1º sin fuente de calor y 2º con una fuente de calor constante, ubicada en el piso que entrega una energía de 1500 J. En el caso de la vista de planta y para todas las orientaciones, se considera la misma fuente de calor en unas de las paredes de costado, señalada en la figura 2. Esta disposición de las fuentes de calor y valores de temperatura fueron impuestas de forma arbitraria, el programa acepta la posibilidad de imponer cualquier valor y disposición.

El post proceso se realizó utilizando GiD con la opción *ContourFill* para la temperatura y *DisplayVector* para la velocidad.

La figura 3 muestra la distribución de temperatura luego de iniciado el proceso de ventilación (caso sin fuente de calor). En dicha figura puede observarse una recirculación desde la parte posterior, fenómeno que se debe a los vórtices generados por toda la estructura sobre el flujo externo. Además en la misma figura puede identificarse claramente que el aire caliente del interior es expulsado hacia atrás, aportando aire fresco a través de la abertura de adelante.

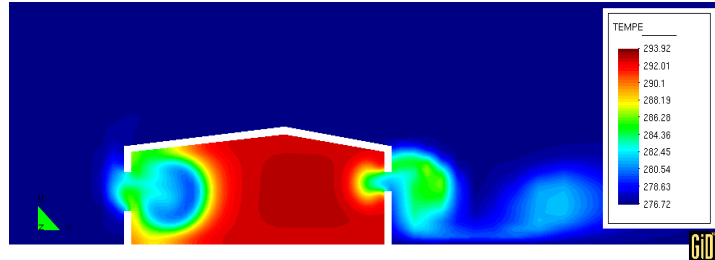


Fig 3. Distribución de temperatura.

En la figura 4 se puede observar la distribución de velocidades en el interior del recinto luego que el aire alcanzó su estado estacionario. En esta figura puede identificarse con claridad la dirección de la circulación predominante dentro del recinto.

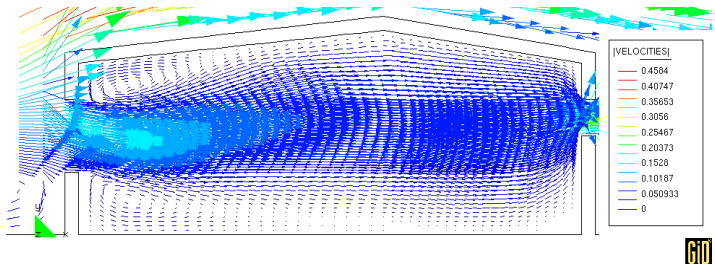


Fig 4. Distribución vectorial de la velocidad del flujo en el interior del recinto

Las figuras 5 y 6 muestran como varía la temperatura considerando al recinto con fuente de calor y sin fuente de calor, respectivamente. Esta se supone ubicada en el piso.

El programa permite ubicarla en cualquier lugar de la geometría.

La simulación completa contempla distintas situaciones en el tiempo, en estas figuras se muestran solo la situación final después que ha transcurrido un tiempo de 150 segundos luego de iniciado el proceso de ventilación.

En todas las figuras se puede apreciar la estela generada en el flujo hacia atrás de la vivienda. La característica a tener en cuenta es que su forma depende fundamentalmente de las variaciones de presión del flujo externo, que no se muestra.

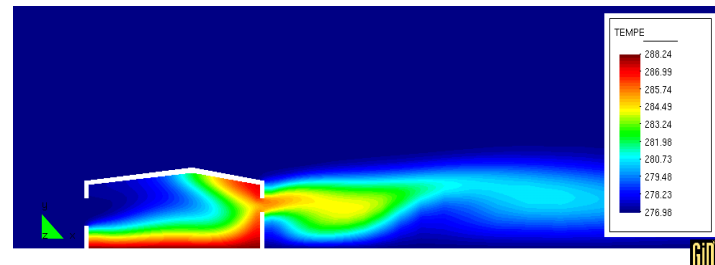


Fig 5. Distribución final de temperatura, con fuente de calor.

El aire caliente del recinto es impulsado hacia atrás y arrastrado por la estela generada en el flujo principal.

Para todas las figuras el programa predice difusión térmica de la energía contenida en el recinto.

A partir del análisis de las figuras queda claro que la ventilación del recinto es muy rápida por efecto de tener ambas aberturas enfrentadas.

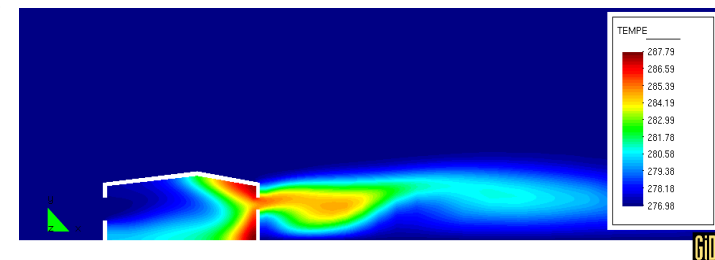


Fig 6. Distribución de temperatura final, sin fuente de calor.

Las características del flujo por detrás de la vivienda se alteran por presencia del obstáculo.

En la figura 7 se muestra el campo de velocidades en una vista de planta para el caso de dos aberturas no enfrentadas. Estas están ubicadas en ambos costados de la vivienda. En la misma figura pueden apreciarse los vórtices generados por el edificio. La simulación los tiene en cuenta y a partir de ellos se generan vórtices de menor intensidad en el interior del recinto.

Esto demuestra que las condiciones fluidodinámicas externas interaccionan fuertemente con el ambiente interior de la habitación.

Estos vórtices externos generan recirculación en el interior produciendo fuertes variaciones de los valores de la velocidad del aire en el interior, lo que influye fuertemente en las condiciones térmicas de la habitación.

En la figura 8 se muestra el campo de velocidades en una etapa posterior de la simulación. Queda claro a partir de la comparación de ambas figuras (7 y 8) el cambio que sufre el aire en el interior.

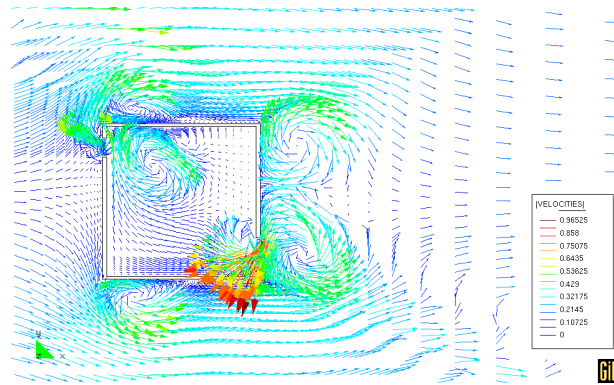


Fig. 7. Campo de vectores de velocidad (instantes iniciales).

Puede observarse que se establece una dirección preferencial del flujo a través de la habitación. En la zona central se forma un centro de recirculación interna.

En la figura 9 y 10 se muestran las distribuciones de temperatura en el interior del recinto. Estas imágenes corresponden a dos momentos diferentes de la simulación.

La figura 9 demuestra que parte de la energía se pierde por la abertura que esta enfrentada al flujo. El motivo de esto se debe a un aumento de presión que se genera en la parte posterior de la vivienda por efecto de los vórtices mostrados en las figuras anteriores.

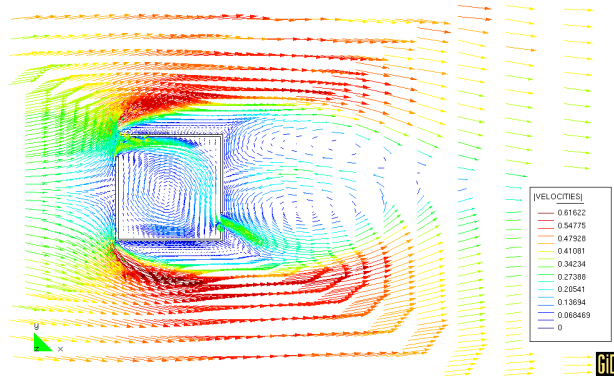


Fig. 8. Campo de vectores de velocidad (instantes finales).

El análisis de estas figuras debe realizarse en comparación con los patrones de flujo descritos anteriormente porque las características fluidodinámicas del flujo son responsables del transporte de energía convectivo.

En ambas figuras queda claro que la interacción externa e interna cobra importancia a medida que transcurre el tiempo. En la figura 10, la estela es responsable de la difusión de energía hacia atrás del obstáculo.

El tiempo transcurrido entre una y otra figura es el mismo que el mencionado anteriormente (150 s) y las dimensiones del obstáculo son las mismas.

En este caso como en la figura 5, existe una fuente de calor que se encuentra en la pared superior, la disposición de las aberturas provoca que todo el aire caliente próximo a esta pared se desplace hacia la parte menos ventilada del recinto provocando un amplio gradiente térmico.

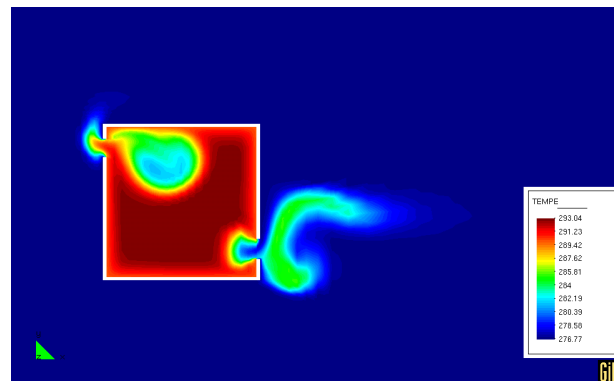


Fig. 9. Distribución de temperatura (instantes iniciales).

Un análisis global de las situaciones planteadas demuestran que en una primera aproximación la disposición de las aberturas influyen drásticamente en las características de la calidad del aire en el interior de un recinto.

La situación que se plantea a continuación y que se muestra en las figuras 11 y 12 se refieren al campo de flujo y distribución de temperaturas para etapas finales de la simulación.

La característica principal es que el objeto se encuentra en diagonal con respecto al flujo principal.

El objetivo básico de presentar este ensayo es determinar bajo que condiciones se altera la ventilación del recinto.

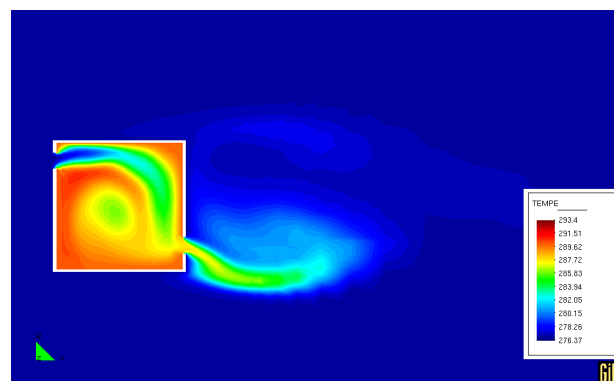


Fig. 10. Distribución de temperatura (instantes finales).

En la figura 11, el patrón de flujo modifica en forma muy débil las características del aire en el interior. Los vórtices generados por todo el obstáculo pueden visualizarse correctamente en la parte posterior del mismo.

Estos vórtices ahora tienen poca influencia en el interior del recinto. Esto se pone de manifiesto en el fenómeno de

transferencia de energía que se muestra en la figura 12. Ambas figuras corresponden a instantes finales de la simulación numérica.

La abertura que se encuentra adelante es la responsable del ingreso de aire fresco y la abertura posterior solo contribuye a evacuar el aire caliente del interior. Esto se pone de manifiesto si se comparan las figuras 8 con 11.

La tercera orientación es tal que ninguna de las ventanas se encuentran enfrentadas directamente a flujo principal de aire (figuras 13, 14, 15 y 16)

Esta disposición del recinto, produce un movimiento interno del aire en forma oscilante en contraste a las orientaciones donde la circulación interior tiende a ser estacionaria después de un determinado tiempo.

Pudo observarse en las primeras iteraciones de la simulación que el movimiento no se establece correctamente.

Esto puede deberse a diferentes razones:

Desde el punto de vista fluidodinámico puede explicarse a partir que la distribución de presiones no se establecen en forma definitiva por efectos de los vórtices que genera la estructura toda del objeto analizado (turbulencia). Luego cuando avanza el tiempo de simulación los flujos comienzan a ser más estacionarios. Promediando el tiempo de simulación (150 s) las condiciones siguen sin ser estacionarias aunque el programa predice que existe un un patrón de flujo en el interior.

Las figuras 15 y 16 evidencian este comportamiento oscilante para esta orientación de la vivienda con respecto al flujo principal.

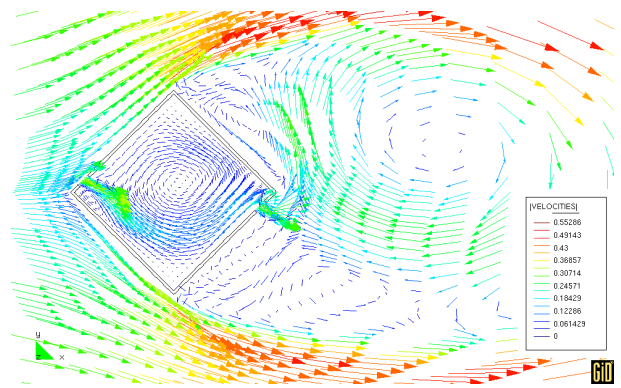


Fig. 11. Distribución de velocidades (instantes finales)

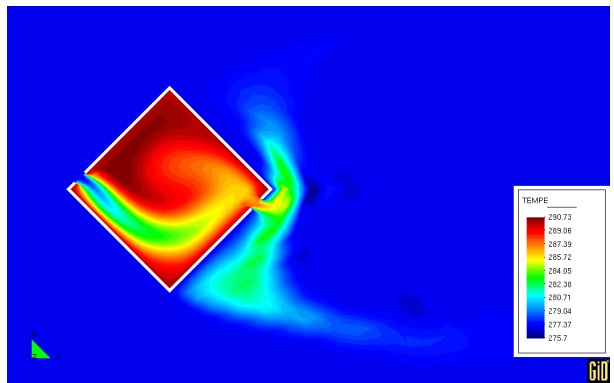


Fig. 12. Distribución de temperatura (instantes finales)

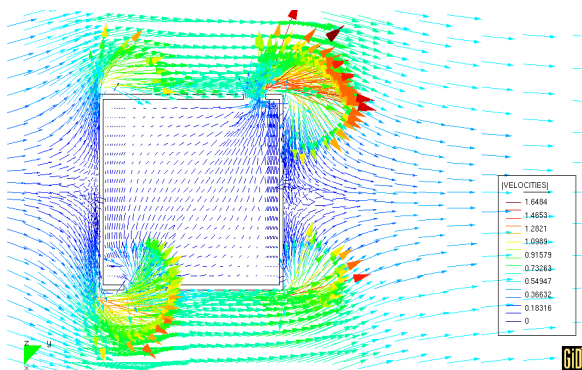


Fig. 13. Distribución de velocidades (instantes iniciales).

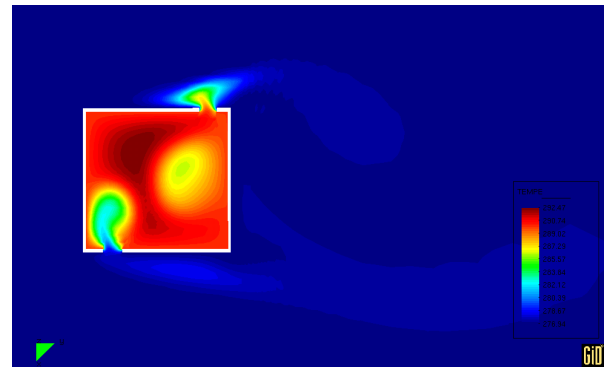


Fig. 14. Distribución de temperatura (instantes iniciales).

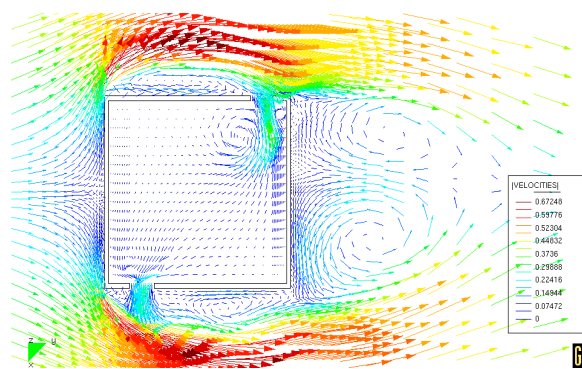


Fig. 15. Distribución de velocidades (instantes finales).

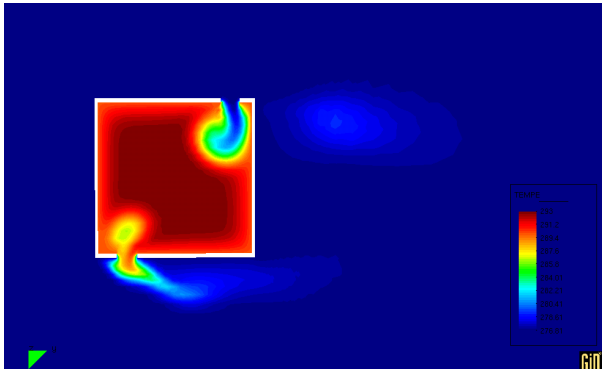


Fig. 16. Distribución de temperatura (instantes finales)

## CONCLUSIONES

A partir de los diferentes resultados obtenidos se puede considerar que se cuenta con una herramienta capaz de predecir la circulación en el interior y exterior de un recinto ya que se pueden establecer las direcciones principales de circulación. Las diferentes figuras demuestran que las características del movimiento del aire en recintos que permiten la circulación en su interior depende fundamentalmente de varios factores. Uno de ellos es la orientación del obstáculo con respecto al flujo principal y otro a tener en cuenta es la disposición de las diferentes aberturas en el recinto.

Para las simulaciones realizadas con fuentes de calor, el programa predice de que forma y en que dirección un determinado recinto transfiere energía. Por lo general este tipo de estudio se realiza en túneles de viento para geometrías semejantes a las simuladas pero los ensayos en general no cuentan con el acoplamiento térmico. La ventaja de este tipo simulación radica en la predicción de lo que sucede en las aberturas. En el caso analizado de un flujo variable, se establece en algunos momentos fenómenos de succión hacia el recinto en la ventana posterior y en otros, la circulación principal hace que el aire interior salga del recinto directamente. Esta variación periódica del flujo implica la generación de vórtices dentro del recinto lo que se pone de manifiesto en las figuras 9, 10 y también en las figuras 14,16.

Esta variabilidad de las características del flujo interior es importante cuando se desea analizar varios recintos contiguos. En este caso la distribución de los recintos tendrán importancia como también la disposición de las aberturas y la dirección del flujo principal. En el caso de querer evaluar coeficientes convectivos, las correlaciones que se utilizan en general dependen de la velocidad del aire por lo tanto poder evaluarla representa un dato importante a tener en cuenta a la hora de diseñar un vivienda si se quiere que tenga cierta eficiencia con respecto a las pérdidas de calor. Por lo tanto teniendo la planta del edificio es posible visualizar el movimiento del aire interior.

Para este trabajo solo se consideraron las ventanas completamente abiertas, pero puede realizarse la simulación cambiando el tamaño de las mismas o sea considerando una ventana parcialmente abierta. Esta información debe ser tenida en cuenta cuando se establece la definición de la geometría a simular.

## BIBLIOGRAFIA

R. Codina (1993) "A finite element formulation for viscous incompressible flow". - Monografía CIMNE.

M. Sandberg (2005) "Rapid time varying ventilation flow rates as a mean of increasing the ventilation efficiency". - University of Gavle.

H. T. Xu, J. L. Niu (2003) "A new method of CFD simulation of air flow characteristics of swirling floor diffusers"

V. Molina, N. Salvo, (2003) Simulación en 2d del efecto del viento sobre una vivienda utilizando diferentes modelos de viscosidad. - AVERMA Vol.7 N° 2 pags 8.127 – 132.

**ABSTRACT:** When the wind impacts on any geometry the patterns of the flow non alone be modify for the presence of the obstacle but rather they also modify the thermal conditions it was and inside this. The ventilation of a certain enclosure depends among other factors of the orientation of openings with regard to the main flow that surrounds. It's disposition to determine circulation of airflow in the indoor of a room. In that sense the results are presented, for the temperature and vectors of velocity, obtained of considering an enclosure that contains two openings and this inside of a turbulent flow.

**Keywords:** Numerical simulation, ventilation, airflow recirculating.