

## COMPARACION DE MODELOS DE TURBULENCIA BI Y TRIDIMENSIONALES PARA RECINTOS CALENTADOS POR DEBAJO

Sonia Esteban<sup>a</sup>, Ana María Aramayo<sup>b</sup> and Luis Cardón<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas, UNSa.*

<sup>b</sup>*Departamento de Física - INENCO Facultad de Ciencias Exactas, UNSa. Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina (aaramayo@unsa.edu.ar).*

**Keywords:** convección natural, tridimensional, turbulencia, transferencia de calor.

### Abstract.

El estudio, tanto numérico como experimental, de la transferencia de calor y masa en desalinizadores indica que el régimen de flujo es turbulento. La literatura reporta que para estos casos los modelos que mejor describen el comportamiento fluido-dinámico en el recinto son: DNS, TRANS y LES. Nuestro grupo de trabajo ha modelado el problema de convección natural en recintos calentados por debajo, en distintas geometrías (triangular, rectangular y trapezoidal) utilizando códigos computacionales restringidos a casos bidimensionales. Para todas las geometrías estudiadas a altos valores de  $Ra$  (mayores que 107) se ha observado oscilaciones en la evolución temporal del número de Nusselt, este comportamiento podría deberse a que el régimen a estos valores de  $Ra$  ya no sea laminar sino turbulento o bien a que la bidimensionalidad impuesta al problema no es la adecuada. El objetivo del presente trabajo es aplicar distintos modelos de turbulencia (RANS y LES) al problema de convección natural en recintos aplanados, calentados por debajo. Los saltos de temperatura impuestos varían de 10°C a 40°C, se ha considerado una cavidad de altura 0.2,  $Pr=0.7$ . Para implementar los modelos de turbulencia, se han incorporado o modificado módulos computacionales a fin de adaptar librerías existentes en un programa de cálculo (OPENFOAM) con capacidad para resolver problemas tridimensionales. Se analiza la transferencia de calor en las paredes inferior y superior a través de los perfiles de temperatura sobre líneas en las direcciones más representativas. En particular, para la simulación tridimensional se describen los patrones de flujo en distintos planos verticales, los cuales se comparan con los resultados obtenidos para caso bidimensional.

## 1 INTRODUCCION

El creciente interés en los flujos térmicos, reflejan que el proceso de movimiento y transporte de fluido generado o alterado por la fuerza de flotación son de interés práctico en muchos campos de la ciencia y la tecnología.

En la convección natural turbulenta la flotación es la única fuerza que impulsa el movimiento del fluido e impone condiciones en la evolución de la turbulencia en la capa límite cercana a la pared.

La convección de Rayleigh-Bénard en régimen turbulento se caracteriza por dos escalas: una escala grande con estructuras de vórtices y plumas coherentes que ascienden desde los bordes más externos de la capa límite, y la turbulencia generada principalmente dentro de la capa límite de la pared y que son arrastradas por las estructuras de gran escala. La característica de flujo de las grandes estructuras permiten que la convección de Rayleigh-Bénard sea el caso adecuado para la implementación de la simulación de grandes remolinos (LES).

A diferencia de la convección de Rayleigh-Bénard, el flujo en una cavidad calentada de lado está caracterizada por la formación de capas límites en las superficies de la cavidad y una región de recirculación central. Las capas límites interactúan con la pared así como con la región central, que puede presentar distintos patrones de flujo, uno o más rollos dependiendo de las condiciones en las paredes y de la magnitud del número de Rayleigh.

Se han propuesto diferentes modelos de turbulencia para los esfuerzos de Reynolds  $\langle u_i u_j \rangle$ , flujo de calor turbulento y la difusión turbulenta, para completar el conjunto de ecuaciones. Debido a que los procesos de transporte turbulento depende de la geometría, las propiedades del fluido y de los patrones de flujos, se requieren de parámetros empíricos. Estos valores, sin embargo, son solamente válidos para determinados flujos y en cierto rango de flujos. De hecho, no existe un modelo de turbulencia universal para flujos en cavidades.

La turbulencia isotrópica son modelos que suponen que la viscosidad turbulenta  $mT$  es isotrópica. El cociente entre los esfuerzos de Reynolds y la deformación media es el mismo en todas las direcciones. El transporte de calor, masa y otras cantidades escalares pueden ser modeladas de manera similar en términos de una difusividad turbulenta.

Peng y Davidson (2001) estudian numéricamente una cavidad calentada de lado utilizando técnicas LES. El flujo se caracteriza por niveles de turbulencia relativamente bajos y estratificación térmica. Los autores encuentran que sus resultados reproducen razonablemente el flujo medio global y los campos térmicos, encontrados experimentalmente. El modelo de Smagorinsky produce resultados con mayor discrepancia que los del modelo dinámico, cuando se lo compara con los datos experimentales.

Dol y Hanjalic (2001) realizan un estudio numérico de la convección natural turbulenta en recintos calentados de lado a números de Rayleigh altos ( $Ra = 4.9 \cdot 10^{10}$ ) cuyo principal objetivo es tener una mejor comprensión de los patrones de flujos obtenidos, especialmente en la esquinas. Realizan simulaciones para el caso bi y tri-dimensional utilizando segundo momento de clausura diferencial (SMC) para el esfuerzo/flujo a bajos números de Reynolds; y el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  simplificado (KEM). Sus cálculos muestran que la clausura de segundo momento es mejor en cuanto a que reproduce los efectos de la tridimensionalidad y la fuerte curvatura de las líneas de corriente en las esquinas. Por otro lado, el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  simplificado produce resultados razonables lejos de las esquinas.

El modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar, en general, se utiliza para estudiar flujos inducidos por sistemas con ventilación. En este modelo existe dos ecuaciones de transporte adicionales para los parámetros turbulentos: la energía cinética turbulenta  $\kappa$  y su disipación  $\epsilon$ . En cambio, para estudiar flujos inducidos por diferencia de densidad, la flotación tiene que ser descripta cuidadosamente. Debemos notar que los términos transitorio, convectivo y difusivo no son afectados directamente por la flotación. El efecto de la flotación aparece solamente a través de

un término fuente en las ecuaciones de conservación. Chow y Li (2007), plantean un modelo en el cual la flotación afectaría las ecuaciones  $\kappa$ - $\epsilon$ , solamente proporcionando nuevos términos fuentes.

Kenjeres y Hanjalic, (2006) reportan distintas aproximaciones para simular problemas de convección a altos números de Rayleigh. Los autores realizan una comparación entre los modelos LES, TRANS (transient Reynolds-averaged-Navier-Stokes) y aproximaciones híbridas para el problema de Rayleigh-Bénard.

Hasta el presente se ha trabajado con problemas bidimensionales y en régimen laminar basado en una formulación adimensional, para proporcionar generalidad a los problemas planteados. Debido a esta metodología empleada se ha podido avanzar en las simulaciones a altos valores de número de Rayleigh (hasta  $10^9$ ), rango en el cual algunos autores reportan que se encuentran en régimen turbulento, por lo que no era posible validar nuestros resultados.

Nuestro grupo de trabajo ha modelado el problema de convección natural en recintos calentados por debajo, en distintas geometrías: triangular, Esteban (2003), rectangular, Esteban (2007) y trapezoidal, Aramayo (2004); utilizando códigos computacionales restringidos a casos bidimensionales. Para todas las geometrías estudiadas a altos valores de  $Ra$  (mayores que 107) se ha observado oscilaciones en la evolución temporal del número de Nusselt, este comportamiento podría deberse a que el régimen a estos valores de  $Ra$  ya no sea laminar sino turbulento

La dificultad planteada anteriormente ha conducido a la búsqueda de un software que trabaje con geometrías tridimensionales. OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es una herramienta de CFD (Dinámica de Fluido Computacional) capaz de simular flujos complejos que involucren reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor, dinámica del sólido y problemas de electromagnetismo. La parte central de OpenFOAM es un conjunto de módulos escritos en C++. El código es libre y bajo licencia GNU (General Public Licence). OpenFOAM usa el método de volúmenes finitos para resolver sistemas de ecuaciones parciales y trabaja con redes 3D no estructurada, cuyas celdas son poliedros. Se utilizó el programa OpenFOAM para realizar el pre-procesamiento de la red, la resolución del problema y el post-procesamiento de los datos (paraFOAM), presentados en este trabajo.

OpenFOAM posee numerosos resolvers pre-configurados, utilidades y librerías que pueden utilizarse como cualquier paquete de simulación. Si bien, existen distintas aplicaciones en OpenFOAM, por ejemplo para utilizar redes no uniformes, zonas con distinto tipo de geometrías, distintos materiales, etc.; en la mayoría de los casos el usuario debe realizar modificaciones en estas librerías-utilidades.

El usuario puede utilizar:

- los módulos existentes para construir sus propios resolvers, para simular un problema específico;
- las utilidades disponibles para realizar pre y post-procesamiento de datos;
- las librerías para crear herramientas a las que pueda acceder los resolvers.

El presente trabajo estudia numéricamente la convección natural turbulenta, transitoria en un recinto prismático de base cuadrada y rectangular (Fig. 1). El recinto consiste de cuatro paredes verticales de altura 0.2 m, las que están aisladas térmicamente y dos paredes horizontales paralelas en las cuales se impone un salto de temperatura ( $\Delta T$ ).

Se consideran distintos saltos de temperatura y distintas dimensiones de la base de la cavidad. Se muestra algunos patrones de flujo y de temperatura, para los modelos de turbulencia programados en OpenFOAM.

Para llevar a cabo las simulaciones, fue necesario modificar distintos módulos ya existentes (librerías y utilidades), esto implica el entendimiento de la metodología de trabajo de este software.

## 2 MODELO MATEMATICO Y NUMERICO

Las ecuaciones de conservación de momento y energía, bajo el régimen de convección natural turbulenta, para flujos incompresibles dominados por la flotación (bajo la aproximación de Boussinesq), son:

De energía

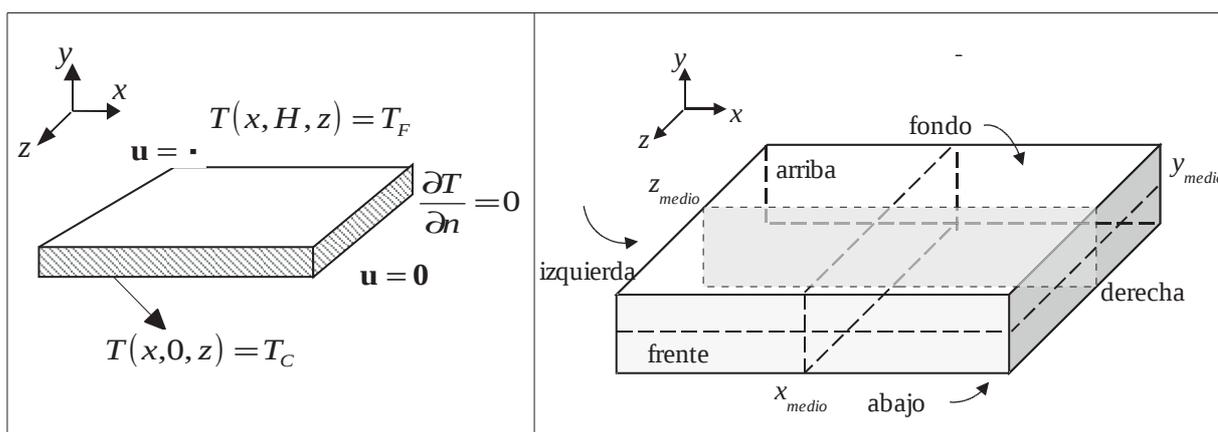
$$\frac{D\langle T \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} - \tau_{\theta j} \right) \quad (1)$$

De momento:

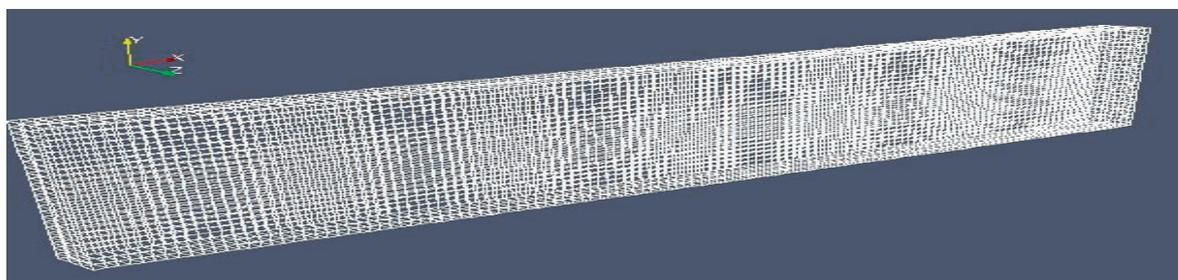
$$\frac{D\langle U_i \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} - \tau_{ij} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\langle P \rangle - P_{REF})}{\partial x_i} - \beta g_i (\langle T \rangle - T_{REF}) \quad (2)$$

donde  $\langle \rangle$  indica el promedio de Reynolds en el tiempo (para el método RANS) ó el promedio espacial (para el método de LES). El esfuerzo turbulento  $(\tau_{ij})$  y el flujo de calor  $(\tau_{\theta j})$  representa las contribuciones turbulentas no resueltas.

El programa OpenFOAM, version 1.6, tiene incorporado distintos modelos de turbulencia (RANS, LES y DNS) los cuales a su vez incorporan distintos modelos de transporte. Por ejemplo, para el modelo LES incompresible, se puede elegir como modelo de transporte a: Modelo de Smangorinsky, de Spalart-Allmaras, oneEqEddy (modelo de viscosidad de remolino para la ecuación de k), etc..



**Figura 1:** Condiciones de borde y nomenclatura utilizada.



**Figura 2:** Discretización del dominio de cálculo.

La figura 1 muestra las condiciones de borde impuesta y los distintos planos utilizados para la descripción de los campos de temperatura o velocidad; mientras que la figura 2 el dominio de cálculo utilizado para la implementación de los distintos modelos de turbulencia.

La red utilizada es de  $125 \times 25 \times 3$  o  $125 \times 25 \times 125$ , dependiendo de las dimensiones de la

base. En todos los casos se ha realizado hasta 2000 iteraciones, con pasos de tiempo variable; para los distintos modelo de turbulencia; y paso de tiempo fijo para el caso tridimensional laminar.

Se debe señalar que los cálculos tridimensional ha tomado aproximadamente veinte días de cálculo ininterrumpido, ocupando la máxima potencia de hardware disponible (Core Duo-Intel), por lo tanto se ha decidido trabajar en una cavidad de poca profundidad, tomando tres volúmenes de control en el eje z para probar los distintos modelos de turbulencia.

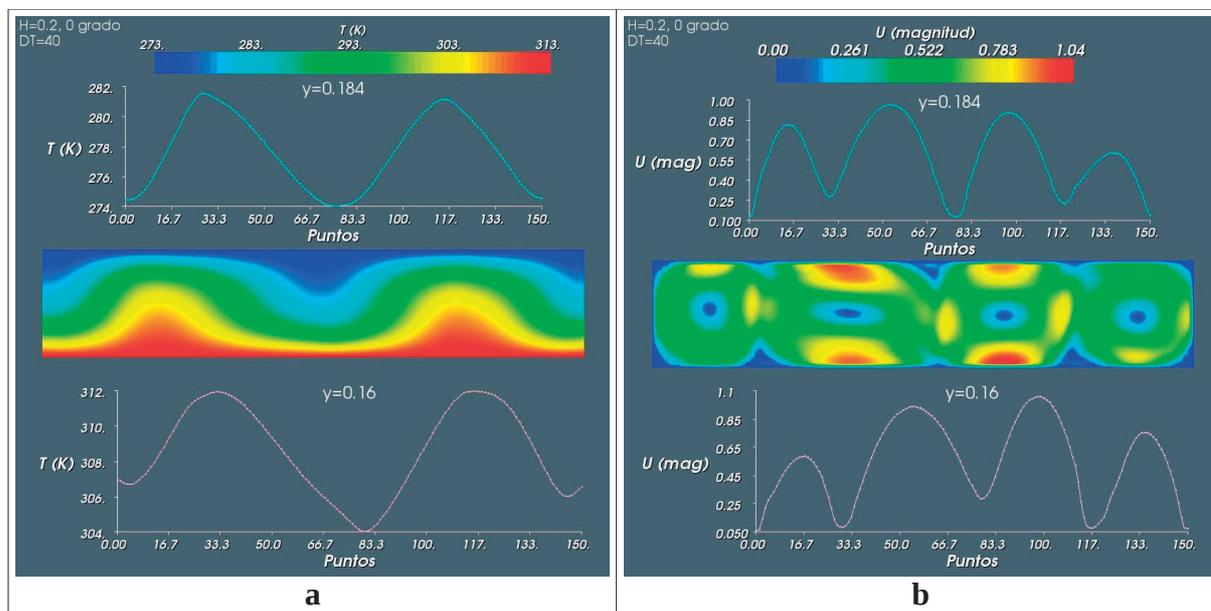
### 3 RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se muestran los campos de velocidad y temperatura en distintos planos. Para poder analizar los resultados obtenidos se ha graficado los perfiles longitudinales para distintas direcciones. Los patrones mostrados corresponden a la última iteración, la velocidad está expresada en  $m/s$  y la temperatura en  $^{\circ}K$ .

La figura 2 muestra las isotermas y los perfiles longitudinales de temperatura adyacentes a las paredes inferior y superior (figura 2-a) y la magnitud de la velocidad (figura 2-b), para un recinto de altura 0.2,  $\Delta T = 40^{\circ}C$ ; para el caso bidimensional.

La característica principal de estos perfiles de temperatura es la presencia de picos y valles. Esto da cuenta de la existencia de plumas ascendentes y descendentes, que provocan el calentamiento o enfriamiento de las placas superior e inferior, respectivamente. La variación máxima de esta distribución de temperatura es de aproximadamente  $8^{\circ}C$ .

Los patrones observados corresponden al problema típico de convección natural de Bénard, con la consideración de que las paredes verticales que definen la tercera dimensión se encuentran inactivas.



**Figura 3:** Isotermas y campo de velocidad para el caso bidimensional  $\Delta T = 40^{\circ}C$ .

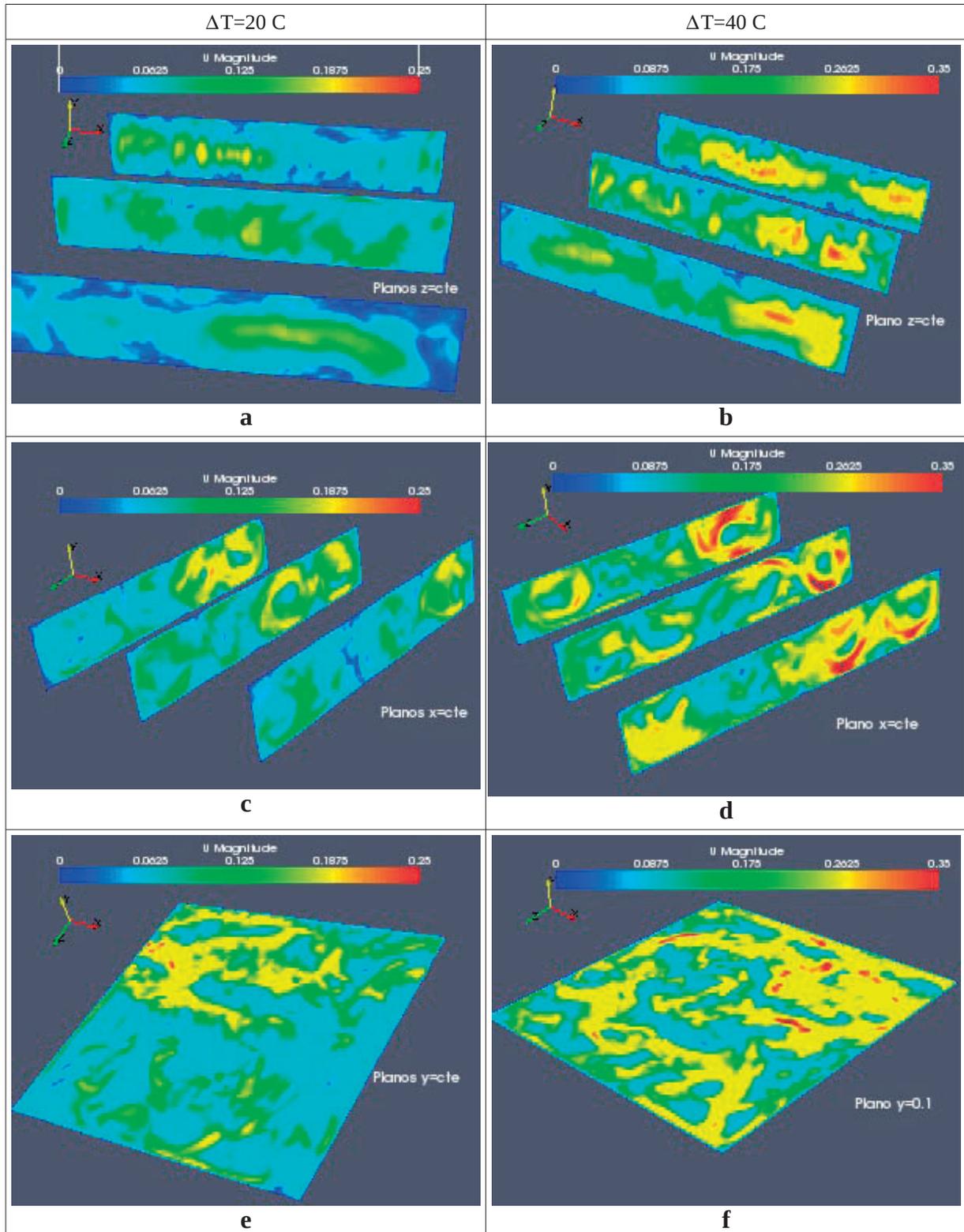
#### 3.1 CAVIDAD TRIDIMENSIONAL

Con el objetivo de adquirir experiencia en el estudio de geometría tridimensional se ha analizado el comportamiento térmico de una cavidad tridimensional en régimen laminar.

Se ha considerado distintos saltos de temperatura: 20, 30 y 40 C en las superficies inferior y superior, en tipos de recintos uno con base cuadrada (Caso A) y otro de base rectangular (Caso B).

### Caso A: cavidad de base cuadrada

La figura 4 muestra el campo de velocidad en distintos planos del recinto para dos saltos de temperatura impuesta  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ . En todos los casos los planos se tomaron a mitad de la cavidad y dos planos cercanos a los bordes: derecho, izquierdo, frente y fondo; salvo en el corte correspondiente a  $y=\text{cte}$ , para el cual sólo se muestra el plano medio,  $y=0.1$ .



**Figura 4:** Campo de velocidad para un recinto cuadrado  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ .

Si bien el desarrollo de las celdas convectivas debiera ser independiente de las direcciones  $x$  y  $z$ , se observa celdas de poca intensidad, en los planos  $x=cte$ , figura 4-c y 4-d. En tanto que en los planos  $z=cte$ , para la misma escala de velocidad, no se distingue celda alguna, figura 4-a y 4-b. Para el plano  $y=cte$  no se observa un patrón de velocidad definido, que permita describir el comportamiento dinámico del fluido, esto puede deberse al hecho de que la base de la cavidad sea cuadrada.

### **Caso B: cavidad de base rectangular**

A fin de observar la influencia de la geometría en el comportamiento de flujo dentro de la cavidad se ha duplicado la dimensión  $z$  de la cavidad.

La figura 5 muestra el campo de velocidad y de temperatura en distintos planos del recinto para un salto de temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ .

La gráfica de la figura 5-a, presenta un patrón de temperatura característico de un régimen conductivo, con suaves ondulaciones que parecen indicar la presencia de celdas de muy baja intensidad que no permiten la formación de plumas ascendentes y descendentes.

En las gráficas de la figura 5-e y 5-f, se muestra la magnitud y el campo vectorial de la velocidad. Los planos mostrados son: uno adyacente a la superficie inferior, con condición de borde de impermeabilidad y no deslizamiento y otro ubicado a mitad del recinto. En ambos casos se puede observar patrones de recirculación, que para el plano cercano al piso se visualiza tanto en la gráfica de la magnitud como del campo vectorial contenidos en dicho plano mientras que en el plano medio los vectores no están contenidos en un único plano, por lo que en la gráfica de la magnitud no se observa un patrón definido.

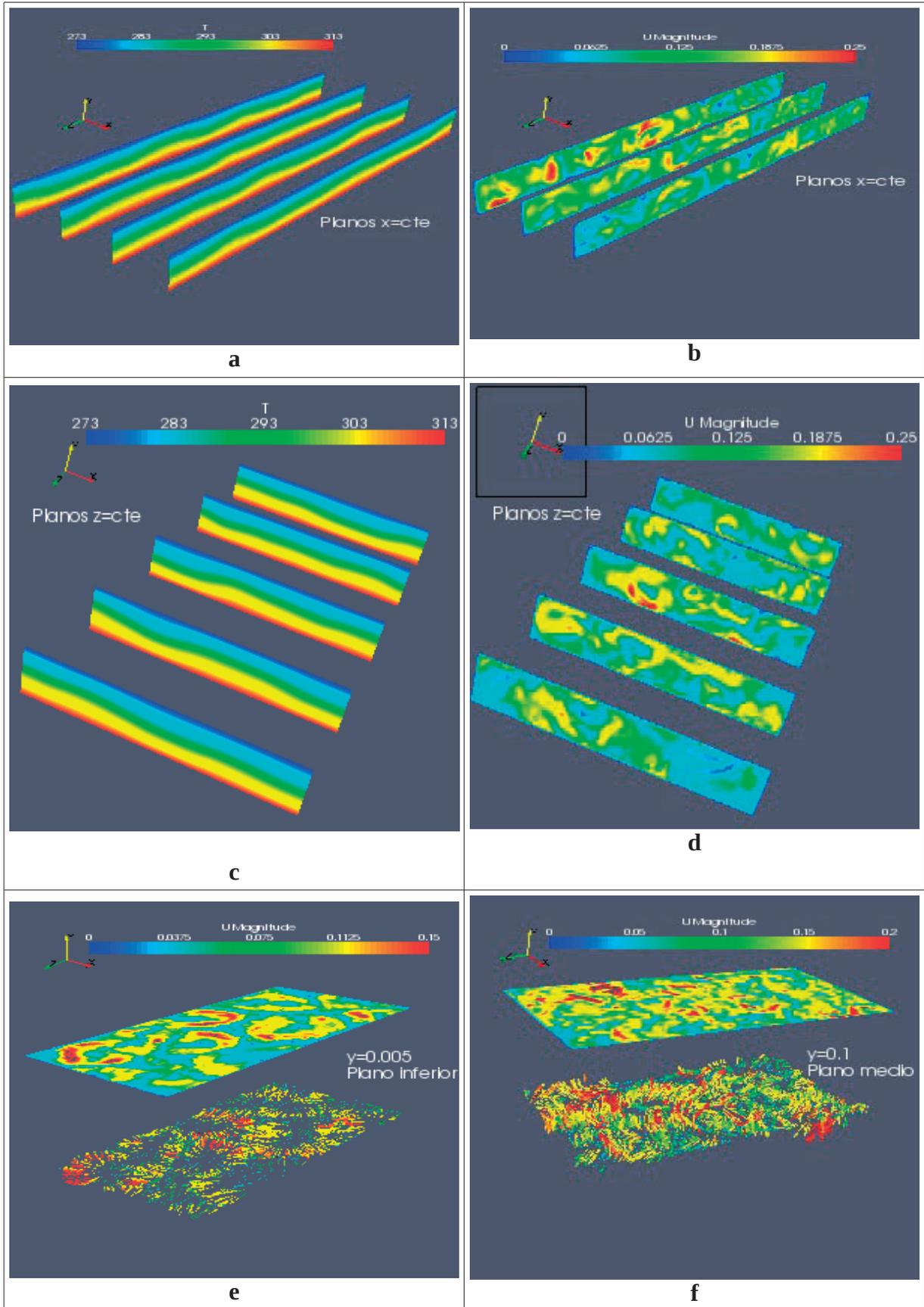
## **3.2 PERFILES DE VELOCIDAD**

Para describir cuantitativamente el comportamiento dinámico, descrito en la sección anterior, se han dibujado distintos perfiles de las componentes de velocidad, para cada uno de los planos medios verticales y horizontal. Dicha elección obedece a que los perfiles correspondiente a planos adyacentes a los bordes, tienen un orden de magnitud menor a los mostrados a continuación.

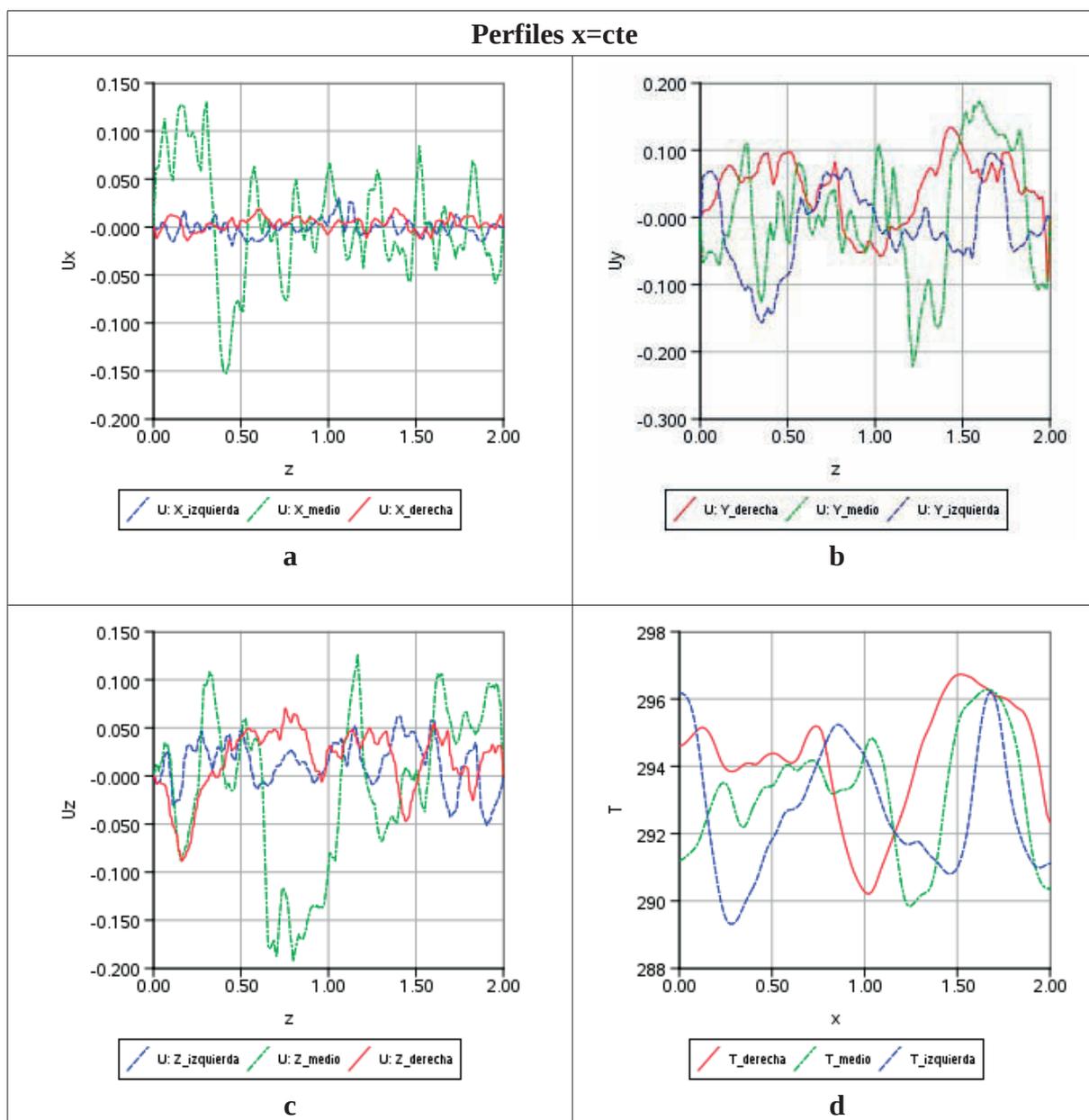
### **Plano horizontal $y=0.1$**

En esta sección se describe los perfiles de velocidad  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  y temperatura, en un plano horizontal a  $y=0.1$ , mostrado en la figura 5-f.

El perfil  $u_x$  muestra que esta componente en las adyacencias de superficies izquierda y derecha es despreciable comparada con la observada en la mitad de la cavidad, figura 6-a. Las componentes  $u_y$  y  $u_z$ , en cambio, tienen el mismo orden de magnitud tanto en el borde como en el medio. Los valores numéricos alcanzados por las componentes tangenciales a la superficie izquierda y derecha indica que existe movimiento cercano a las paredes. Lo que determina la distribución de temperatura observada en la figura 6-d. Las distribuciones de velocidad mostradas en la figura 5, indican un comportamiento dinámico bastante complejo que no permite una descripción a través de perfiles a lo largo de una única recta.



**Figura 5:** Campo de velocidad y temperatura, para un recinto rectangular  $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 6:** Perfiles de velocidad y temperatura, para un recinto rectangular, plano  $y=0.1$ .

### Plano vertical $z=1$

La figura 7 muestra los perfiles de temperatura sobre las dos direcciones posibles en el plano considerado:  $y=0.005$  (inferior),  $y=0.1$  (medio),  $y=0.195$  (superior),  $x=0.05$  (derecha),  $x=0.5$  (medio) y  $x=0.95$  (izquierda).

En los perfiles a  $y=cte$  se puede observar que la temperatura se mantiene prácticamente constante en las cercanías de los bordes inferior y superior; mientras que a  $y=0.1$  se observa una pequeña variación, la cual corresponde al patrón de temperatura mostrado en la figura 5-c. Por otro lado, los perfiles de temperatura prácticamente lineales, para  $x=cte$ , indica que la convección es débil que no permite la formación de capas límites.

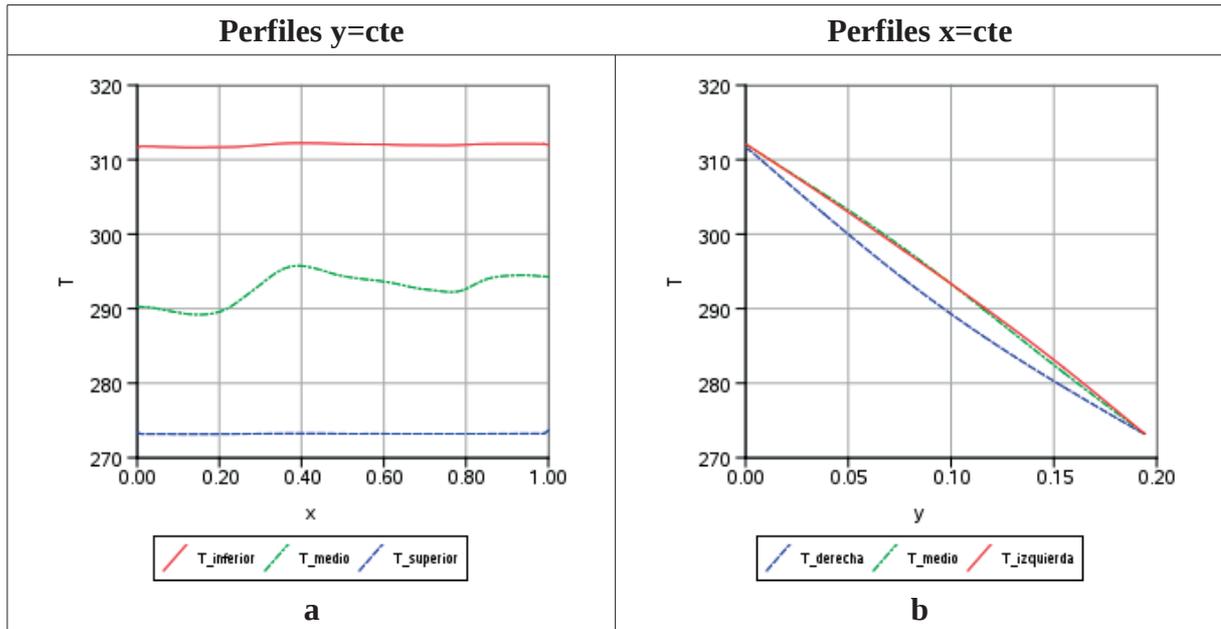


Figura 7: Perfiles de temperatura, para un recinto rectangular, plano  $z=1$ .

### 3.3 DISTINTOS MODELOS DE TURBULENCIA

Como los distintos modelos de turbulencia implementados en OpenFOAM no permiten la utilización de redes bidimensionales, se ha trabajado con una red tridimensional en la cual las paredes en la dirección  $z$ , están activas pero a una distancia mucho menor que las otras dimensiones.

En la figura 8 se presentan, a modo de ejemplo, distintos campos relacionado con el modelo RANS de turbulencia, para  $\Delta T=40$  C. Los campos de velocidad ( $U$ ) y Nusselt turbulento ( $nut$ ) se grafican sobre el plano  $z=0.025$ ; mientras que las gráficas inferiores corresponden a iso-superficies  $\kappa=0.0003$  y  $\varepsilon=0.00025$ .

Usando el modelo RANS se obtienen celdas convectivas como en el caso bidimensional, aunque de menor intensidad y menor cantidad, fig 3-b.

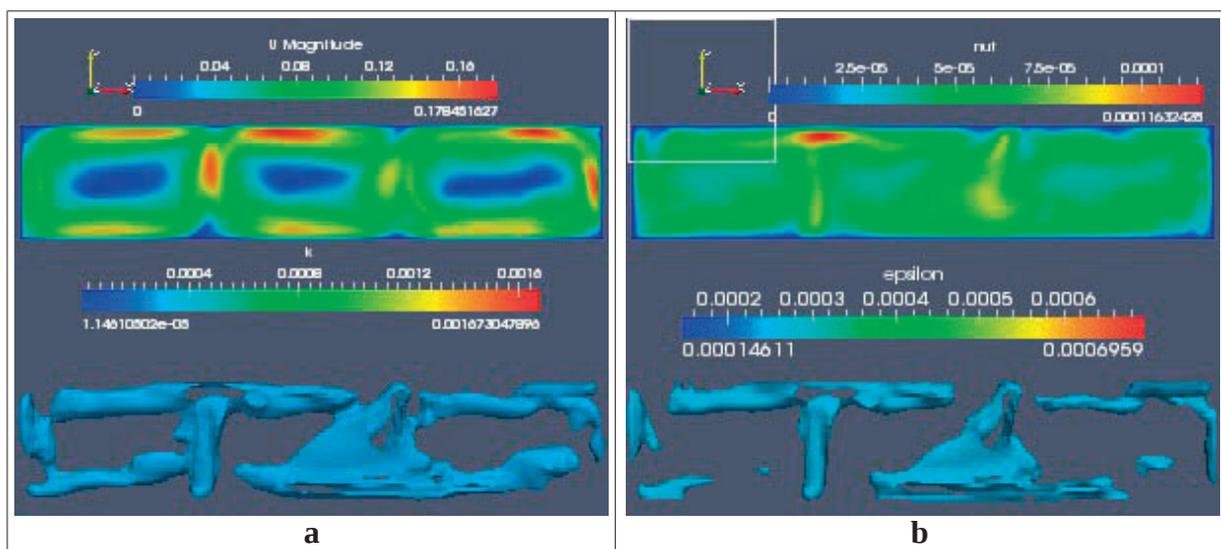
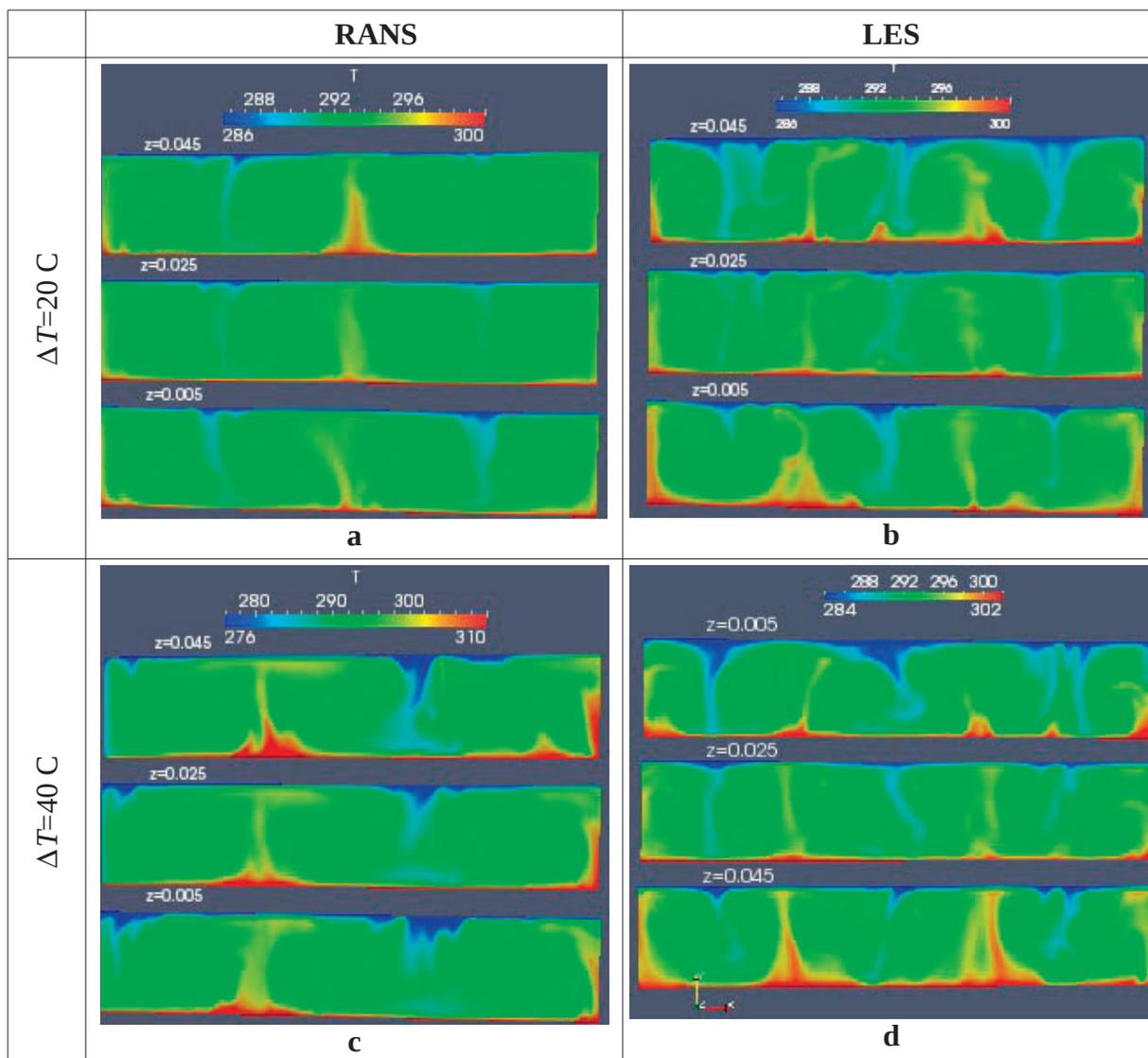


Figura 8: Campos varios modelo RANS,  $\Delta T=40$  C.

La figura 9 presenta los patrones de temperatura para los modelos RANS (izquierda) y LES (derecha) para saltos de temperatura de 20 y 40 C.

Los resultados obtenidos con el modelo RANS muestran un número menor de celdas convectivas que los producidos con el modelo LES, lo que está de acuerdo con lo sostenido por Kenjeres (2006), ya que el primero al promediar en el espacio minimiza el efecto de las celdas convectivas.



**Figura 9:** Campos de temperatura modelos RANS y LES,  $\Delta T=40\text{ C}$ .

La figura 10 presenta los perfiles de las componentes de velocidad y temperatura utilizando el modelo de turbulencia LES.

La componente  $u_x$  de la velocidad presenta perfiles caracterizados por máximos y mínimos lo que indica la presencia de celdas convectivas, con distintos sentido de circulación. El perfil  $u_y$  muestra un comportamiento similar al anterior para la parte media de la cavidad.

Los perfiles correspondientes a la temperatura evidencian un salto de temperatura menor al impuesto como condición de borde, lo cual implica que en la delgada zona de capa límite se tendrá el salto de temperatura restante (figura 10-d).

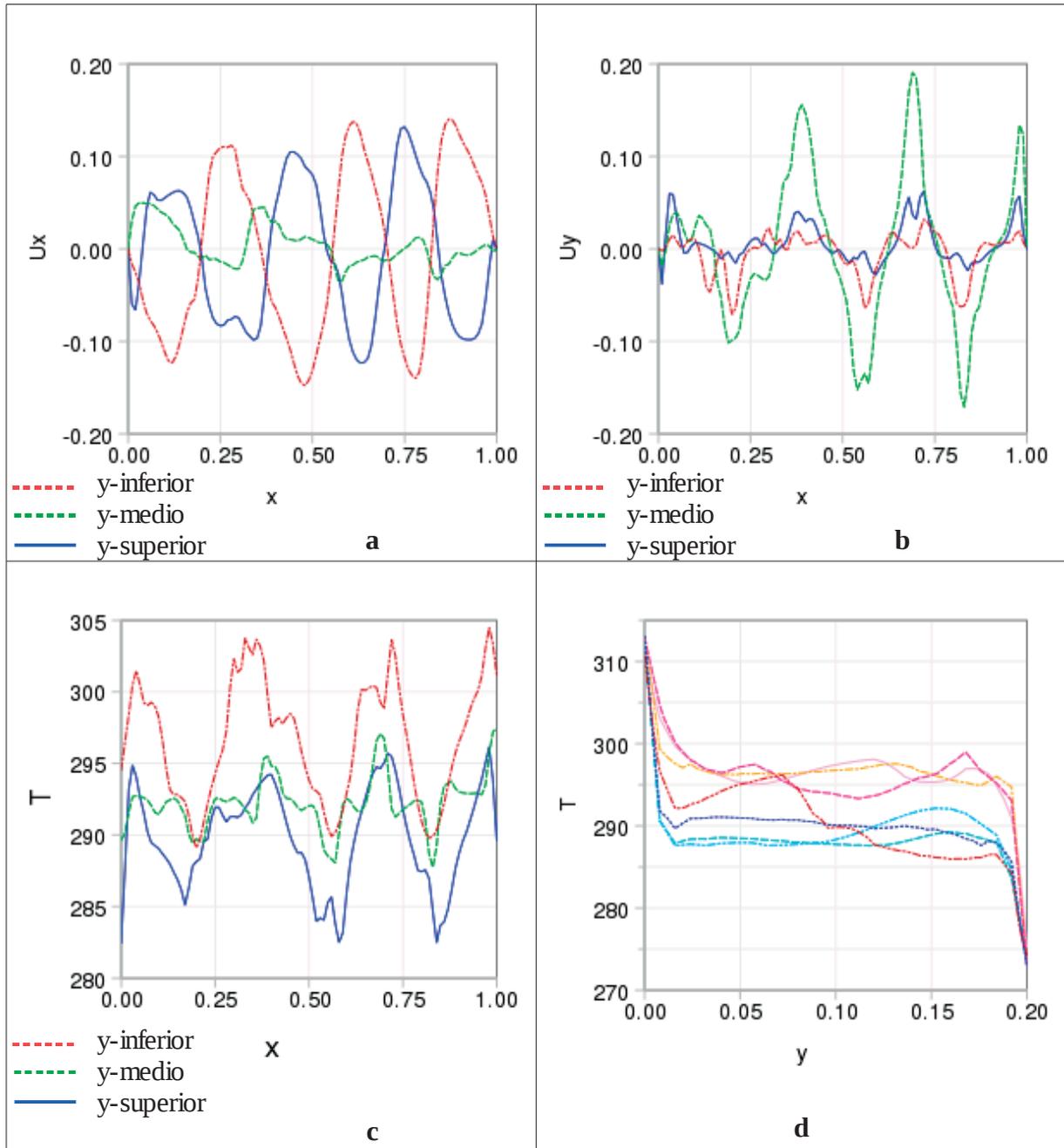


Figura 10: Perfiles de velocidad y temperatura modelo LES,  $\Delta T=40$  C.

#### 4 CONCLUSIONES

Nuestro grupo de trabajo ha modelado el problema de convección natural en recintos calentados por debajo, en distintas geometrías bidimensionales.

En el caso tridimensional presentado resulta bastante dificultoso el análisis de los patrones de flujo a través de los campos obtenidos sobre determinados planos, ya que la tridimensionalidad de los vórtices formados requiere otro tipo de variable que describa la presencia de los mismos. Con las dimensiones consideradas no se pudo reproducir los resultados bidimensionales, esto es atribuible a que el máximo salto de temperatura impuesto (40 C) no es suficiente para desarrollar campos de velocidad cuya magnitud sea la obtenida en el caso bidimensional.

Se ha simulado el problema de convección natural turbulenta en una cavidad de muy poca profundidad con modelos tipo RANS y LES. Estos primeros resultados muestran que si bien, con el modelo LES obtenemos patrones de flujo característicos al problema de Rayleigh-Bénard, no es posible completar el estudio de la transferencia de calor ya que es necesario calcular el coeficiente convectivo,  $h$ ; el cual se obtiene integrando el gradiente del campo de temperatura en las cercanías de las paredes horizontales, donde se sabe que el modelo LES no es el adecuado para describir los fenómenos a escalas pequeñas.

Como trabajo futuro queda por implementar otros modelos de turbulencia que describan mejor el comportamiento dinámico en las capas límites.

## 5 REFERENCIAS

- Aramayo, A., Esteban, S., Cardón, L., (2004) "Convección natural conjugada en recintos trapecoidales apilados". *Mecánica Computacional*, 23, pgs. 2067- 2078.
- Esteban, S.; Aramayo, A.; Cardón, L. (2003), "Conveccion natural multicelular en recintos triangulares rectangulares enfriados por arriba" *Mecánica Computacional*. ISSN 1666-6070, vol: XXII. Pags. 1625-1639.
- Esteban, S.; Aramayo, A.; Cardón, L. (2007), "Transferencia de calor en un recinto rectangular inclinado y particionado", publicado en *Mecánica Computacional*, vol: XXVI. Pags.3530-3546.
- Peng, S.; Davidson, L. (2001) "Large eddy simulation for turbulent bouyant flow in a confined cavity". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22, pgs: 323-331.0
- OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide. <http://www.openfoam.org/doc> (2007)
- Dol H. , Hanjalic, K. , Computational study of turbulent natural convection in a side-heated near-cubic enclosure at a high Rayleigh number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 44: 2323-2344, 2001.
- Chow, W; Li, J. (2007) "Numerical simulations on thermal plumes with k-e types of turbulence models". *Building and enviroment*, 42, pag.: 2819-2828.
- Kenjeres, S.; Hanjalic K (2006) "LES, T-RANS and hybrid simulations of thermal convection al high Ra numbers". *International Journal of Heat and Fluid Flow*,27, pag.: 800-810